

T.C.
GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

LAMEL GRAFİTLİ (GRİ) DÖKME DEMİRLERDE DOLUM HIZI, DÖKÜM
SICAKLIĞI VE METALÜRJİ KALİTESİNİN FARKLI KESİT
KALINLIKLARINDA AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS

Sami KÖSE

TEMMUZ-2022
GÜMÜŞHANE



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LAMEL GRAFİTLİ (GRİ) DÖKME DEMİRLERDE DOLUM HIZI, DÖKÜM
SICAKLIĞI VE METALÜRJİ KALİTESİNİN FARKLI KESİT
KALINLIKLARINDA AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FILLING SPEED, CASTING
TEMPERATURE AND METALLURGICAL QUALITY ON FLUIDITY
PROPERTIES AT DIFFERENT SECTION THICKNESSES IN LAMEL
GRAPHITE (GRAY) CAST IRON CASTING**

YÜKSEK LİSANS

Sami KÖSE

**TEMMUZ-2022
GÜMÜŞHANE**



T.C.

**GÜMÜŞHANE ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**LAMEL GRAFİTLİ (GRİ) DÖKME DEMİRLERDE DOLUM HIZI, DÖKÜM
SICAKLIĞI VE METALÜRJİ KALİTESİNİN FARKLI KESİT
KALINLIKLARINDA AKICILIK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF FILLING SPEED, CASTING
TEMPERATURE AND METALLURGICAL QUALITY ON FLUIDITY
PROPERTIES AT DIFFERENT SECTION THICKNESSES IN LAMEL
GRAPHITE (GRAY) CAST IRON CASTING**

YÜKSEK LİSANS

Sami KÖSE

Danışman: Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU

**TEMMUZ-2022
GÜMÜŞHANE**

BİLİMSEL ETİĞE UYGUNLUK BEYANI

Yüksek Lisans olarak hazırlamış olduğum “**Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demir Dökümünde Dolum Hızı, Döküm Sıcaklığı ve Metalürji Kalitesinin Farklı Kesit Kalınlıkları Üzerinde Akıcılık Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi**” isimli bu tezimin, tamamen kendi çalışmam olduğunu, her alıntıya kaynak gösterdiğimi, alıntı yaptığım tüm çalışmaları kaynakçada belirttiğimi ve Gümüşhane Üniversitesi’nin lisanslı kullanıcısı olduğu 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

.....
Sami KÖSE

TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusu, deneysel çalışmaların yönlendirilmesi, sonuçların değerlendirilmesive yazımı aşamasında yapmış olduğu katkılarından dolayı Danışman Hocam Sayın Doç. Dr. Ebru Emine ŞÜKÜROĞLU başta olmak üzere Sayın Doç. Dr. Murat ÇOLAK Hocama, Sayın Dr. Öğretim Üyesi Demet DEMİR ŞAHİN Hocama, değerli yeğenim İnşaat Yüksek Mühendisi Ahmet Emir Köse'ye ve Konya'da faaliyet gösteren KONDÖKSAN Döküm Sanayi ve Ticaret Limited Şirketi çalışanlarına, ayrıca KONDÖKSAN Üretim Müdürü Sayın Halil AKTAŞ Hocama, Konya'da öğretmen olarak çalışan Mehmet COŞAR kardeşime son olarak kıymetli eşim ve oğluma gösterdikleri ilgi, sabır, anlayış ve yardımlarından dolayı saygılarımı ve teşekkürlerimi sunarım.

Sami KÖSE
GÜMÜŞHANE-2022

ÖZET

Bu çalışmada, lamel grafitli dökme demir malzemelerin farklı döküm sıcaklıkları, farklı kesit kalınlıkları ve değişen döküm parametrelerinde alaşımın akıcılık özellikleri araştırılmıştır. Bunun için döküm sıcaklığı, metalürji kalitesi, farklı malzemeler, özel olarak tasarlanmış kesit kalınlıkları bulunan akıcılık testi modeli ile hazırlanmış kum kalıplarına dökümü gerçekleştirilmiştir. Böylece değişen döküm koşullarında akıcılık özelliklerinin etkisi ve belirlenen kesit kalınlıklarında sıvı metal ilerleme mesafeleri incelenmiştir. Değişen döküm koşullarında kum kalıbında yapılmış dökümlerde kesit kalınlıklarına bağlı sıvı metal ilerleme mesafesi belirlenerek, FlowCast Döküm simülasyon yazılımları ile modellemeler gerçekleştirilmiştir. Böylece çalışma kapsamında belirlenen parametrelerde değişen döküm şartlarında sıvı metalin akıcılığı ve ilerleme mesafesi deneysel ve modelleme teknikleri ile karşılaştırmalı olarak tespit edilmiştir.

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

SUMMARY

In this study, the fluidity properties of the alloy were investigated at different casting temperatures, different section thicknesses and varying casting parameters of lamellar graphite cast iron materials. For this purpose, casting was carried out in sand molds prepared with a fluidity test model with casting temperature, metallurgical quality, different materials, and specially designed section thicknesses. Thus, the effect of fluidity properties in changing casting conditions and liquid metal advance distances at determined section thicknesses were investigated. Modeling was carried out with FlowCast Casting simulation software by determining the liquid metal advance distance depending on the section thickness in the castings made in sand molds under changing casting conditions. Thus, the fluidity and propagation distance of the liquid metal under the changing casting conditions in the parameters determined within the scope of the study were determined comparatively with experimental and modeling techniques.

Keywords: Fluidity, Cast iron, Casting temperature, Casting simulation, Modelling

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.....	XIII
1.GİRİŞ	1
2.KURAMSAL TEMELLER	8
2.1.Dökme Demirler.....	8
2.2.Dökme Demir Çeşitleri	10
2.2.1.Beyaz Dökme Demirler.....	10
2.2.2. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler.....	11
2.2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirler	12
2.2.4. Kompakt (Vermiküler) Grafitli Dökme Demirler.....	13
2.2.5. Temper Dökme Demirler	14
2.3. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler.....	14
2.3.1. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirin Bileşimindeki Elementler.....	16
2.3.2. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirin Yapı Bileşenleri (Mikro Yapısı)	18
2.3.3. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirin Mühendislik Özellikleri	18
2.4. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirlerde Katılaşma.....	20
2.4.1. Demir – Karbon – Silisyum Alaşımının Katılaşması.....	21
2.5. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin grafit tipleri.....	21
2.6. Aşılama	23
2.7. Akıcılık.....	24
2.8. Döküm Simülasyonları.....	27
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
3. 1. Deney Parametreleri.....	29
3.2. Akıcılık Modeli Tasarımı ve Model Plakası İmalatı.....	31

3.3. Kum Kalıpların Hazırlanması	32
3.4. Alaşımların Ergitme İşlemleri.....	34
3.5. Dökümlerin İncelenmesi	34
3.6. Mikro yapı İncelemeleri.....	35
3.7. Modelleme Çalışmaları	36
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	39
4.1. Döküm Deneyleri Sonuçları.....	39
4.2. Mikro yapının İncelemeleri ve Değerlendirilmesi	44
4.2.1. Döküm Sıcaklığına Bağlı Mikro yapı Değişiminin İncelenmesi	45
4.2.2. Metalürji Kalitesine Bağlı Mikro yapı Değişiminin İncelenmesi	47
4.2.3. Sıvı Metal Kalıba Dolum Hızının Mikro yapı Üzerine Etkisinin İncelenmesi	48
5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME.....	50
KAYNAKÇA.....	59
ÖZGEÇMİŞ	63

TABLÖLAR DİZİNİ

Tablo 1. Dökme demir içeriğinde var olan elementler (Erdoğan, 2000).	10
Tablo 2. Lamel grafitli (gri) dökme demirin kimyasal bileşimi (MEB, 2011).	16
Tablo 3. Lamel grafitli (gri) dökme demirin mühendislik özelliklerinin karşılaştırılması (URL-3, 2022).....	19
Tablo 4. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin mekanik özellikleri (Akkurt, 1985).....	20
Tablo 5. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin mekanik özellikleri (Hoper, 1977).	20
Tablo 6. Deney parametreleri.....	30
Tablo 7. Deney şartları.....	30
Tablo 8. Alaşımın içerisindeki elementler	34
Tablo 9. Alaşımın simülasyon veri tabanında kullanılan termofiziksel özellikleri	36
Tablo 10. Dökümler sonucunda ölçülen sıvı metallerin ilerleme mesafesi değerleri	44
Tablo 11. Değişen modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçlar	51

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. Fe-C denge diyagramı (Pollack, 1988).	8
Şekil 2. Dökme demirlerde Si ve C oranına göre içyapı oluşumu (Maurer Diyagramı) (Demirci, 2004).	9
Şekil 3. Beyaz dökme demirin mikro yapısı (Yalçın, 1999).	11
Şekil 4. Lamel grafitli (gri) dökme demirin mikro yapısı	12
Şekil 5. Küresel grafitli dökme demirin mikro yapısı (Mozumder, 2015).	12
Şekil 6. Kompakt (vermiküler) grafitli dökme demirin mikro yapısı (URL-1, 2022). ...	13
Şekil 7. Temper dökme demirin mikro yapısı (URL-2, 2022).	14
Şekil 8. Lamel grafitli (gri) dökme demir yapısında grafit dağılımı (Kurt, 2019).	15
Şekil 9. Gri dökme demir grafit tipleri (Uçal, 2019).	22
Şekil 10. Döküm simülasyonları için tasarım modelleri	27
Şekil 11. Flowcast programı kullanılarak kalıba doldurulan sıvı metal görüntüsü (Şirin ve Çolak, 2009).	28
Şekil 12. Bir simülasyon programıyla parçaların çözümü (Çolak ve Kayıkcı, 2009). ...	28
Şekil 13. Bir simülasyon programı kullanılarak bir dökümde büzülme meydana gelecek alanların temsili (Çolak ve Şirin, 2010).	29
Şekil 14. Akıcılık testi model görüntüsü ve ölçüleri.	31
Şekil 15. Akıcılık testi plak model görüntüsü	32
Şekil 16. Akıcılık testi plak model görüntüsü	33
Şekil 17. Akıcılık testi plak model görüntüsü	33
Şekil 18. Kalıptan çıkarılan örnek döküm resimleri	34
Şekil 19. Döküm kesit kanallarındaki sıvı metal ilerleme mesafesinin ölçümünün gösterilmesi	35
Şekil 20. Mikro yapı numunesi alınan bölgelerin gösterilmesi.	35
Şekil 21. Akıcılık modelinin SolidCast programına yüklenmesi, malzeme tanımlanması	37
Şekil 22. SolidCast programı ile modelin meş edilmesi	37
Şekil 23. FlowCast programı ile kalıbın doldurulması esnasından bir görüntü	38
Şekil 24. 1350 °C sıcaklık, %20 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm.	39
Şekil 25. 1350 °C sıcaklık, %20 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm	40

Şekil 26. 1350 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm	40
Şekil 27. 1350 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm	41
Şekil 28. 1425 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm	41
Şekil 29. 1425 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm	42
Şekil 30. 1500 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm	42
Şekil 31. 1500 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm	43
Şekil 32. Farklı büyütmelelerde 4 mm kesit kalınlığındaki mikro yapı resimleri	45
Şekil 33. Farklı döküm sıcaklıklarındaki mikro yapı resimleri (100X büyütme)	46
Şekil 34. Farklı metalürji kalitesi şartlarında mikro yapı resimleri (100X büyütme)	47
Şekil 35. Sıvı metal kalıba farklı dolum sürelerinde mikro yapı resimleri (100X büyütme)	48
Şekil 36. FlowCast akıcılık modelleme yazılımından örnek bir ekran görüntüsü	52
Şekil 37. 1350 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları	53
Şekil 38. 1425 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları	54
Şekil 39. 1500 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları	55

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
Fe ₃ C	: Sementit
GPa	: Giga Pascal
Mpa	: Mega Pascal
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
Mo	: Molibden
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
P	: Fosfor
S	: Kükürt
Si	: Silisyum
Sr	: Stronsiyum
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum
µm	: Mikrometre
BDD	: Beyaz Dökme Demir
CFS	: Kritik Katı Oranı
CLS	: Kritik Sıvı Oranı

DIN	: Alman Standartları Enstitüsü
GDD	: Gri Dökme Demir
KE	: Karbon Eşdeğer
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
MEB	: Millî Eğitim Bakanlığı
STL	: Üç Boyutlu Model Dosya Transfer Biçimi
TS	: Türk Standartları



1.GİRİŞ

Çok eski imalat yöntemlerinden birisi olan döküm yöntemi sıvının bulunduğu kabın şeklini alması ve sıvı metalin kalıba dolumu sonrası katılaşma, soğuma işlemlerini içermektedir. İşlemin ilk ve en önemli aşaması sıvı metalin kalıp boşluğunu eksiksiz ve zamanında doldurmasıdır. Tasarım, malzeme kalitesi ne olursa olsun düzgün dolmayan bir kalıptan sağlam bir parça imalatı söz konusu olamayacağı için döküm işleminde akıcılık ve dolum oldukça önemlidir. Akıcılık; döküm yapıldığında bir metalin katılaşma ile durmadan önce kalıpta ilerleyeceği mesafe ya da ergimiş metalin kalıp boşluğu içine tamamen doldurması olarak tanımlanmaktadır. Sıvı metalin akıcılığını, alaşım özellikleri, kalıp özellikleri, döküm sıcaklığı ve ilave edilen alaşım elementleri, aşılama, döküm uygulaması şartları gibi birçok faktörden etkilenmektedir.

Dökme demirler çok fazla bileşenli demir alaşımlarıdır ve ötektik olarak katılaşmaktadır. Dökme demirler, çelikten daha fazla Silisyum ile karbon içeriği bulunur. Fazla C içeriğinin sebebiyle, dökme demirlerin yapısı çeliğe göre daha fazla C fazı içerir (Davis, 1996). Dökme demirler rahatlıkla ergitildiğinde kusursuz döküm alaşımlarıdır ve sıvı halindeyken akışkanlık özellikleri iyidir (ASM, 1988). Dökme demirler ağırlıkça %4 ile %2.14 arasında Karbon ve %3 ile %0.5 arasında Silisyum içermektedir. Dökme demir çeliklerden daha düşük sıcaklıklarda ergirler. Akışkanlığı ve dökülebilirliği yapısal olmayan uygulama için istenen bir durumdur (Eisenmann, 2015).

Lamel grafitli dökme demir; aşırı Si ve C oranlı dökme demirin yavaş yavaş soğuması esnasında, sıvı demirlerdeki C ayrılır veya katılaşma sırasında ayrı grafit lamelleri oluşturmak üzere grafitleştiği dökme demir türüdür. Lamel grafitli dökme demirde genel olarak gelişmiş güzel yönlenmiş ve üniform dağılmış lamel grafitler mevcuttur. Gri dökme demirin kopma yüzey görünüşü gerçek bir gri renge sahiptir ve bu nedenle “gri dökme demir” olarak da adlandırılırlar. Grafitin dökme demir içerisindeki miktarı, biçimi, büyüklüğü ve dağılımı özelliklere etki eder. Kalın kesitlerde kalın grafit levhacıkları ve yapıda ferrit olması sebebiyle düşük mukavemet değerleri elde edilirken, ince kesitlerde ince grafit ve perlitik yapı nedeniyle yüksek mukavemet değerleri elde edilmektedir (Eisenmann, 2015). Gri dökme demirler demir alaşımlarının en akışkanıdır ve sonuç olarak karmaşık ve ince kesitli parçalar üretilebilir. Bu dökme demirler iyi aşınma direnci sağlayan sertliklerinde mükemmel işlenebilirliğe sahiptir. Gri dökme demirin en iyi özelliği, basma mukavemetidir. Basma mukavemeti, çekme mukavemetinin 3-5 katıdır. Yorulma limiti, çekme mukavemetinin yarısı kadardır. Demir

alaşımlar içerisinde işlenebilme kabiliyeti en yüksek olan gri dökme demirdir ve yüksek titreşim sönümleme özelliği vardır. Bu özellikten dolayı makine gövdelerinin yapımında kullanılırlar. Korozyona karşı dayanıklılıkları yüksek olup su tesisatlarında geniş uygulama alanı vardır (Eisenmann, 2015).

Akışkanlık, döküm terminolojisinde, belirli sıcaklıklarda döküldüğünde metalin katılaşması devam ederken test kalıbında akacağı mesafe, başka bir deyişle ergitilmiş metal kalıp boşluğu içinin tamamını doldurulmasıdır. İyi akmayan metaller özellikle kalıbın çok ince kısımlarında döküm hatalarına neden olur (Kharkiv, 2013). Akışkanlık, ergimiş metalin ergimeden önceki ne kadar uzaklığa akacağını belirlemek için kullanılır. Akıcılık, döküm alaşımların en önemli özelliklerini belirler (Vignesh vd., 2016). Aşırı sıcaklıklar bütün alaşımların ve metallerin akışkanlığını artırır, ancak metal olmayan yabancı cisimlerin dökümünün akışkanlığını düşürür. Kükürt, oksijen ve krom miktarı arttıkça dökme demirin akışkanlığı azalır. Artan miktarlarda fosfor, karbon, manganez, silisyum, alüminyum ve bakır miktarlarının akıcılığı etkilediği bilinmektedir (Kharkiv, 2013). Lamel grafitli dökme demirlerin akışkanlığını sıvı metalin kalıbı doldurma kapasitesi olarak ifade edebiliriz. Bu esas olarak alaşımın özelliklerinden, döküm işleminin özelliklerinden, döküm koşullarından, döküm yapısından vb. kaynaklanmaktadır. Akışkanlık metre veya milimetre cinsinden genelde spiral bir kalıpla ölçülmektedir. Dökme demirin akışkanlığını ölçmek için birkaç yöntem vardır: Spiral testi, U-şekilli test, çubuk tipi testi ve küresel testi bunlardan bazılarıdır. Akıcılığı ölçmek için en yaygın olarak kullanılacak testler, spiral testleri ve vakumlu akışkanlık testleridir. İlk yöntem, vakum pompası ile potadan emildiğinde bir dar kanaldan akan metalin uzunluğunu ölçer. Diğer bir yöntem ise metalin spiral memeden aktığı mesafeyi ölçmektir (LMC, 2019; Sabatino, 2013). Akışkanlık, metalürjik ve kalıp/döküm değişkenliğine ayrılacak çeşitli faktörlerden etkilenir. Metalürjik faktörlerin bazıları; viskozite, bileşim, aşırı ısınma, görünmez oksit filmi, ısı, ergimiş yüzey gerilmesi, ergime noktası, katılaşma şeklidir. Döküm faktörlerinden bazıları ise; ara yüzeyde ısı geçiş katsayısı, kalıp iletkenliği, kalıp sıcaklığı olarak sıralanabilir (Sabatino, 2013; Saxena, 2017).

Dökme demirin akışkanlığı ve nihai özellikleri için çok etkili bir işlem olan aşılama, aşırı soğumayı en aza indirir ve dökme demir grafitin büyümesi için mevcut olan çekirdeklenme alanlarının sayısını artırır. Yapının ve özelliklerinin kontrol edilmesinden oluşur. Aşılama işlem, dökme demir yapısını homojenliğini artırdığı için çok önemlidir (Seidu ve Ripoşan, 2011).

Aşılama, dökümden hemen önce bir sonraki katılaşmada grafiti ergimiş demire çekirdeklendirmek üzere en uygun faz oluşturan bir malzemedir. Çoğunlukla aş

malzemeleri ferrosilisyum ya da kalsiyum silisyum içermektedir. Bugün de yaygınca kullanılan aşılایıcılar; Alüminyum, Baryum, Kalsiyum, Stronsiyum ve Zirkonyum vb. az miktarlarda element bulunduran ferrosilisyumdur. Aşılایıcılar, döküm işlemlerine bağımlı olarak farklı uzunluklarda olabilir. Gerçekte, aşılایıcının eklenmesi fırının içerisinde, potada, akışta ve kalıpta yapılır. İlave olarak aşılانma, alaşımanın mukavemet ve süneklik gibi özelliklerinin de gelişmesine yardımcı olur (Koch ve Soulas, 2014).

Ergime sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda metalin akışkanlığı artsa da sıcaklıktaki aşırı artış birçok olumsuz etkiye sebep olabilir. Alaşım elementlerinin farklı tepkimelerde sıvıdan uzaklaştırılması, tane büyümesi ve şekil bozulması vb. etkilere sebep olabilmektedir. Bunu yapmak için, optimum bir sıcaklık belirlenmelidir. Döküm, ergime sıcaklığının 100-150°C üzerinde yapılmalıdır. Dökme demire karbon eşdeğerini artıran elementlerin eklenmesi akışkanlık üzerinde olumlu bir etki yaratmaktadır (Aslandoğan, 2009).

Han ve Xu (2005), yaptıkları çalışmada, akış boyutunun bir alaşımanın katılانma ısı mesafesiyle ters orantılı olarak bulmuşlar. Deneyler sonucunda, katılانma sıcaklık aralığı azaldıkça alaşımanın akışkanlık uzunluğunun arttığını bulmuşlardır. Ancak bu ilişkinin yüksek basınçlı döküm koşullarında geçerli olmadığını belirtmişlerdir (Han ve Xu, 2005).

Literatürde akıcılığı etkileyen parametreler üzerinde yapılmış farklı alaşımlarda da bazı çalışmalar mevcuttur. Haque (2007), yapılan çalışmanın iki ayrı dökme demir malzemeyi, değişik kesit kalınlıklarına sahip bir metre boyutunda akışkanlık modeli kullanıp hazırlanmış olduğu kalıba dökmüş ve döküm örneklerinin akışkanlık boyutlarını ölçmüştür. Deneysel sonucun Fe-C-2Si dökme demirin akışkan boyutunun, kesit kalınlıktan ayrı olması Fe-C-2Al dökme demirinden çok fazla olarak belirtilmiştir (Haque, 2007).

Ramadan ve Nomura (2005), yapmış oldukları çalışmada, yarı katı işlem görmüş gri demir için akışkanlık testleri, et kalınlıkları 2.5, 5 ve 14 mm olan akışkanlık şeritleri kullanılarak çeşitli derecelerde birincil fraksiyon katılarında gerçekleştirilmiştir. Yapılan bu dökümlerin mikro yapısı incelenmiştir. Kritik katı konsantrasyonu, katılانma aralığı ve dolum hızı gibi akışkanlık parametreleri incelenmiştir. Buradan, artan kesit kalınlığı ile kritik katı konsantrasyonunun arttığı sonucuna varılabilmektedir. Dolum hızı, kritik katı konsantrasyonuna çok yakın belirli bir katı fraksiyonuna aniden düşmektedir. Literatüre ve yarı katı işlem görmüş gri demirin mikroyapı çalışmasına dayalı olarak, bir akışkanlık katılانtırma modeli geliştirilmiştir. Yarı katı gri demirin boşluk doldurmasını analiz etmek için Flemings akışkanlık modeli modifiye edilerek katılانma modelinden matematiksel bir denklem elde edilmiştir (Ramadan ve Nomura, 2005).

Hiratsuka vd. (2006), yapmış oldukları çalışmada, Lamel grafitli dökme demirin deneysel olarak akışkanlığını belirlemek için, akışkanlık kanalı olarak silika tüp ve düzenlenmiş bir vakum sistemi kullanılmıştır. Akışkanlık numunelerinin katılma yapısını ve akışkanlık uzunluğunu tahmin etmek için bir simülasyon programı geliştirilmiştir. Akış hızı, yüzey gerilimi ve viskozite kaybı dikkate alınarak değiştirilmiş Bernoulli denklemi ile hesaplanmıştır. Hem simülasyon hem de deneylerden akışkanlık uzunluğu ile boru çapı arasında doğrusal bir ilişki elde edilmiştir. Artan emme basıncı ve eriyik sıcaklığı ile birlikte akışkanlık uzunluğu artmıştır. Akışkanlık uzunluğu, emme basıncının karekökü ile doğrusal olarak ilişkilidir. Bir akışkanlık numunesinin mikro yapısı, uçtan geriye doğru; ledeburit, hareketli ve lamel grafit yapısı olmak üzere üç bölgeden oluşur. Akışkanlık numunesi uzunluğu boyunca farklı konumlarda katılmanın sonuna yakın soğutma hızı hesaplanmış ve her yapı için kritik soğutma hızları varsayılarak farklı yapılarla başarılı bir şekilde ilişkilendirilmiştir (Hiratsuka vd. 2006).

Aslandoğan (2009), yapmış olduğu çalışmada, Döküm teknolojisinde parça yapısını ve kalitesini etkileyen en önemli faktörler katılma ve akışkanlıktır. Belirli koşullar altında erimiş metalin kalıp içindeki karmaşık davranışı, sıcaklık ve malzeme bileşimi gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Bu çalışmada döküm teknolojisinde akışkanlık kavramı ve akışkanlığı etkileyen faktörler kapsamlı bir literatür taraması ile araştırılmış ve malzeme bileşiminin akışkanlığa etkisi deneysel çalışmalarla test edilmiştir. Deneysel uygulamalarda, AISI 1040 yumuşak çeliği ilk olarak belirtilen döküm koşulları altında bir spiral kalıpta döküldü ve akışkanlığı ölçüldü. Daha sonra karbon çeliğine farklı miktarlarda krom ve Nikel ilave edilerek benzer döküm şartlarında 9 döküm daha yapılmış ve akışkanlık ölçülerek sonuçlar yorumlanmıştır. Döküm teknolojisinde akışkanlığı artıran en önemli faktör sıcaklıktır. Dökme çelikte yumuşak çeliğe Cr ve Ni'nin eklenmesi, çeliğin akışkanlığını artırarak katılmasından spiral şeklinde daha fazla hareket etmesine izin verdi (Aslandoğan, 2009).

Çolak vd. (2015), yapmış oldukları çalışmada, Dökme metallerin akışkanlığı, genellikle, sabit kesitli bir kalıp boşluğunda doldurma gerçekleştiğinde katılma tarafından durdurulan metalin uzunluğu ile ölçülür. Bu çalışmada, A356 alaşımının farklı döküm sıcaklıklarında (700, 725, 750 °C) akış özelliklerini modifikasyonlu ve modifikasyonsuz olarak ölçmek için farklı kesit kalınlıklarına sahip bir kum kalıp geometrisi kullanılmıştır. Ti'nin değişmesinin akışkanlık üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı bulundu. Öte yandan, düşük döküm sıcaklıklarında bile Sr modifikasyonu ile en yüksek akışkanlık elde edilmiştir. Sonuçlar bir simülasyon yazılımı (SolidCast) ile karşılaştırıldı ve kritik sıvı fraksiyonu (CFL) belirlendi (Çolak vd., 2015).

Yang vd. (2016), yapmış oldukları çalışmada Si ve Ni içeriklerinin Ni-Si-Al alaşımlarının akışkanlığı üstündeki tesiri, değişmez bir spiral kalıp kullanılarak incelenmiştir. Katılaşma sırasında akışkanlıkla alakalı karakteristik değişkenler, bilgisayar destekli soğutma eğrisi termal analizi (CA-CCTA) ile ölçülmüştür. Silisyum içeriği ağırlıkça yüzde üçten az olduğunda ve Nikel içeriği ağırlıkça yüzde iki ila ağırlıkça %6 aralığında olduğunda, artan Si ve Ni içeriği ile Al-Ni-Si alaşımlarının akışkanlığı da arttı. Bununla birlikte, Al_3Ni birincil fazının oluşumu nedeniyle Ni içeriği ağırlıkça %8'e yükseltildiğinde akışkanlık azalmıştır. Artan Si ve Ni içeriği ile, katılaşma aralığı (ΔTS), dendrit koherens sıcaklığı (TDCP) ve döküm sıcaklığı ile dendrit koherens sıcaklığı (TP-TDCP) arasındaki fark, akışkanlık değişim eğilimi ile iyi bir uyum içindedir. Soğutma eğrilerinin bu akışkanlık ve özellikleri testinin sonuçları, Al-Ni-Si alaşımlarının mikrografik analizi ile de desteklenmiştir. Ni-Al -Si alaşımların çekme mukavemeti, Si ve Ni ilavesi ile iyileştirilmiştir (Yang vd., 2016).

Çolak ve Kaya (2021), yaptıkları çalışmada, GGG60 alaşımının akışkanlık özelliklerini araştırmıştır. Çalışmada; sıvı metalin kalıp boşluğunu tam olarak dolduramamasının temel nedeni, kalıp boşluğunda ergimiş metalin kalıbın yüzeyle teması, kalıbın malzemesinin yüksek ısı geçiş katsayısı ve sıvı hareketleri sırasında ergimiş metalin çok fazla soğuması ve katılaşması olduğunu vurgulamıştır. Akışkanlık, döküm özellikleri, döküm sıcaklığı ve alaşım elementleri gibi birçok faktörden etkilenir. Bu amaçla, farklı kesit kalınlıklarına sahip yeni kalıp tasarımında dökümün ısısı, farklı aşılama miktarlarının ve farklı aşılama yöntemlerinin etkileri kullanılmıştır. Değişen döküm koşullarında kum kalıplara yapılan dökümlerde kesit kalınlıklarına bağlı olarak ergimiş metalin ilerleme uzunluğu tespit edilerek, FlowCast döküm simülasyonu yazılımlarıyla karşılaştırılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde; döküm sıcaklığı ve aşılama etkisine bağlı olarak farklı kesit kalınlıklarında farklı sıvı metal ilerleme mesafeleri ortaya çıktığı gözlenmiştir (Çolak ve Kaya, 2021).

Döküm proses modellemesi, bilgisayarın kalıp doldurulduğunda ve döküldükten sonra kalıba ne olacağına dair tahminler yapması gereken matematiksel bir tekniktir. Döküm simülasyonu programları; yeni bir teknik olarak döküm tasarımı; Kalıp hazırlamak zorunda kalmadan ve pahalı deneme yanılma öğrenme süreci gibi israfli bir şekilde atık üretmeden bilgisayarda modellerin yapılmasına olanak tanır. Simülasyonlar yardımıyla, gerekli besleyicilerin sayısı ve boyutu ve bunların 3 boyutlu hacim modeli üzerindeki konumları belirlenerek bilgisayarda kanal tasarımı gerçekleştirilebilir. Tasarlanan parça simüle edilerek döküm, katılaşma, büzülme gibi birçok sonuç bilgisayarda görüntülenebilir. Bu sonuçlardan yararlanarak, makul olan en ekonomik ve

en iyi ürünü elde etmek için gerekirse tasarımda teknik ayarlar yapılır. İlaveten sistem, optimum nitelik ve verimliliği sağlamak için parça tasarım optimizasyonunu otomatik olarak gerçekleştirebilir. Döküm simülasyonu, döküm hatalarını tahmin etmek ve bu sorunları tasarım aşamasında gerçek döküm üretmeden çözmek için 1990'ların başından beri dökümhaneler tarafından kullanılan bir tekniktir. Bilhassa memleketimizde döküm teknolojisi ve tekniğin faydalarını yeni anlaşılmaya başlanmış ve son yıllarda simülasyon teknolojisini kullanan dökümhanelerin sayıları hızlı bir şekilde artmıştır (Kayıkçı ve Nergiz, 2010).

Döküm simülasyonları, mümkün olan kısa süre de kusursuz bir döküm yapılan döküm sürecinin çok önemli bir tarafıdır. Dökümün simülasyon tekniğinin, çeşitli dökme metaller ve karışık işlemler için güvenilir ve çok verimli olduğu tespit edilmiş, fakat aşırı maliyeti, uygulamasını çok zorlaştırmıştır. Tipik olarak simülasyon süreci, tane yapısı, kalıp doldurma, stres analiz, deformasyon ve katılaşmayı içerir. Simülasyon işlemleri, hangi boyutta ve kaç tane besleyiciye ihtiyaç olduğunu ve bunların nereye yerleştirileceğinin tasarımının yapılmasına olanak tanır. Üretilen mamulün simülasyonun yapılarak döküm, çekinti ve katılaşma oluşumu vb. birden fazla sonuç bilgisayarda gözlemlenebilir. Bu sonuçlar kullanılarak tasarımın en ekonomik şekilde kalıplanması için bir revizyon yapılabilir. Ayrıca sistem parça parça otomatik olarak optimum kalite ve verimde tasarlanır. Bütün bunlar çok kısa sürede yapılabilir. Bu nedenlerle kaliteli parçalardan üretilen yapılarda simülasyon programlarının kullanımı her geçen zaman biraz daha artmaktadır (Şirin ve Çolak, 2009).

Bu simülasyonlar ile parçanın tasarımı sonucu; döküm mikro yapısı, mikro porozite ve makro porozite (çekinti) tahmini, döküm parçalarında zamana bağlı olarak katılaşma süresi ve sıcaklık dağılımı, kalıbın dolması sırasında sıvı metalin basıncı, türbülansı, hızı, soğuk birleşme bölgeleri, yönü, parça üzerindeki besleyicinin boyutu, yeri ve meydana gelen sıcak noktalar, parça üzerinde sıcak yırtılma riski oluşturan alanlar ve meydana gelen gerilme analizleri vb. sonuçlara ulaşılabilir (Çolak ve Şirin, 2010).

Döküm, simülasyon yazılımı yardımıyla metalin kalıba girmesinden, metalin kalıpta katılaşmasının sonuna kadar geçen süre izlenir. Döküm, katılaştırma ve soğutma sırasındaki hacim değişikliklerinin ve sıcaklık tahmininin belirlenmesinde kolaylık sağlar. Bu bitişik ısı-hacimsel yaklaşım farklı döküm sorunlarında, makro ve mikro poroziteyi, sıcak bölgeleri ve diğer yanlışlıkları kapsayan en çok tahmin gerçekleştirilen yoldur (Çolak ve Şirin, 2010).

Dökme demirlerde kalıplanma tasarımı, deneysel ve modelleme yöntemleri esnasında yapılmış olan aşamalar ve bu aşamaların sonuçlara etkileriyle ilgili olarak

birden fazla çalışma türleri araştırmacılar literatüre geçmiştir. Benzer çalışmaların bir kısmı aşağıdaki gibi verilmektedir.

Vijayaram (2005), çalışmasında; en iyi parça tasarımına yardımcı olan, çekinti ve gözenekliliği ortadan kaldıran sıcak nokta parçalarını bulmak için döküm katılaştırma simülasyon tekniğinin kullanıldığı sonucuna varmışlardır (Vijayaram, 2005).

Kermanpur vd. (2008), yaptıkları çalışmada, 2 otomobil döküm parçasını fazla besleyicili döküm kalıbında, üç boyutlu metal akışını ve katılma koşullarını simüle etmişlerdir. Simülasyon modeli, dökme demirin aşırı ısınması, döküm süresi, kalıp yüzeyi düzgünlüğü, besleyici tasarımı ve kalıp konfigürasyonu gibi çoklu döküm değişkenlerini kullanarak otomobil dökümlerinin dayanıklılık ve kalitesi üzerindeki etkisini simüle etmişler ve gerçek dökümler ile olumlu sonuçlar elde etmiştir (Kermanpur vd., 2008).

Choudhari vd. (2014), yapmış oldukları çalışmada, metallerin katılmasının metalurjistler, fizikçiler, yazılım geliştiriciler ve dökümhane mühendisleri için büyük bir öneme sahip olduğunu belirtmişlerdir. Simülasyon temelli yaklaşım besleyiciler ve döküm kalitesi, verimi ve besleyici datalarının iyileştirilmesi sağlanmıştır. Simülasyonun sonuçlarının deney verileri ile karşılaştırıldı ve karşılaştırmada uyumlu sonuçlar olduğu bulunmuştur. Bu nedenle, deneysel sonuçların simülasyon sonuçlarıyla doğrulandığı sonucuna varılmıştır (Choudhari vd., 2014).

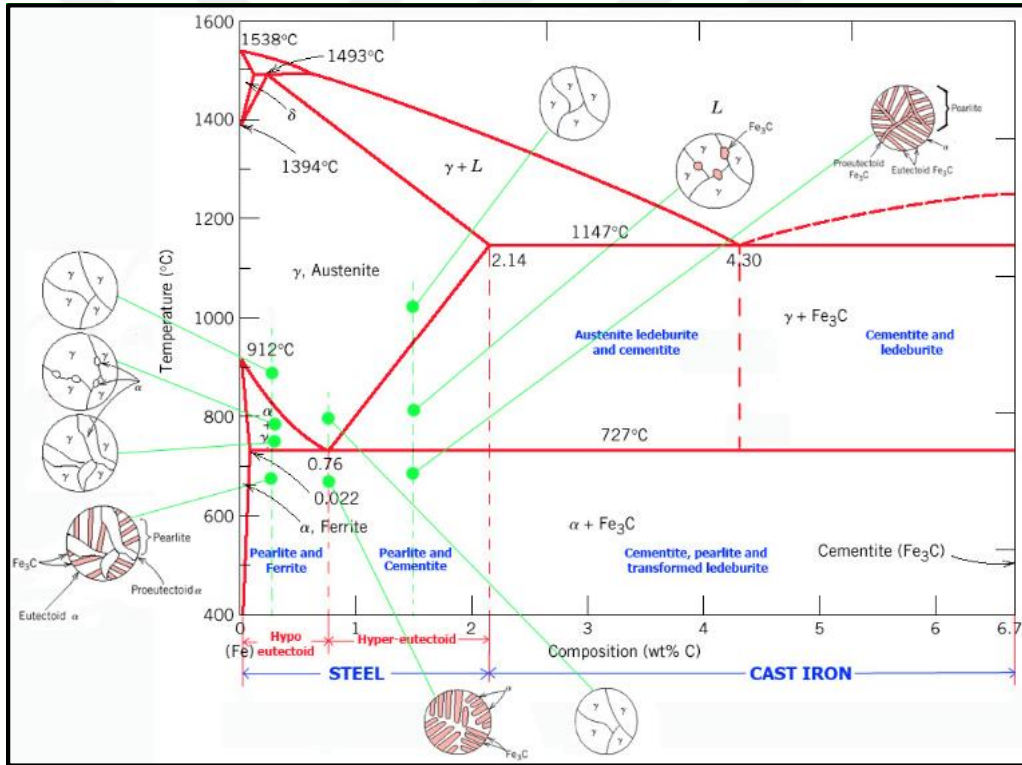
Nimbulkar ve Dalu (2016), çalışmalarında Auto-CAST X1 dökümü kullanılarak kalıplama tasarımını optimize etmek için çalışmalar yapmış ve döküm simülasyon yöntemi kullanılarak çekintiden kaynaklanan döküm reddi yüzdesinin %30 oranında azaldığı gözlemlenmiştir (Nimbulkar ve Dalu, 2016).

Hodbe ve Shinde (2018) yaptıkları çalışmada, hacimsel büzülme ve gözenekler gibi kusurların oluştuğu ve döküm kalitesini etkilediği için, döküm prosesindeki en kritik adımın hazırlanan kalıp boşluğunda ergimiş metalin dolumu olduğu belirtilmiştir. AutoCAST programı ile döküm simülasyonu yapılarak işçilik, enerji ve hatalı tasarımın önlenerek, simülasyon testleri sonrası yapılan dökümlerin kabul oranı arttığını bulmuştur (Hodbe ve Shinde, 2018).

2.KURAMSAL TEMELLER

2.1.Dökme Demirler

Dökme demirler Fe-C diyagramına baktığımızda %2 den %6.67'ye kadar dökme demir olarak gösterilir. Ancak yüksek karbon oranı kırılganlığa sebebiyet verdiği için pratikte %4.4'e kadar karbon ve %3.5'a kadar silisyum içeren bir Fe-C-Si alaşımı olarak bilinir Dökme demir geleneksel çeliklere göre daha düşük seviyelerde ergime noktasına sahiptir, bundan dolayı standart çeliklere göre rahat döküm yapılabilir. Yapısal materyaller istenilmeyen kırılgan olma yatkınlığındadır, ancak akışkanlık yanında döküm rahatlığı, yapısallık içermeyen uygulamalar içinde mükemmel olan adaydır (Kumruoğlu, 2003; Eisenmann, 2015).



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

Dökme demirlerde karbonun katılma sırasında ayrışması mikro yapısında ayrı bir eleman olarak görülür. Bu ortaya çıkan karbonun oluşturduğu şekil ve biçim dökme demirin tipini belirlemekte ve dolayısıyla özelliklerine de etki etmektedir (Kumruoğlu, 2003).

Dökme demirler döküm endüstrisinin en yüksek tonaja sahip ürününü teşkil etmektedirler. Dökme demirlerin iyi bir mühendislik malzemesi olması ve ucuz

üretilebilmesi bu malzemeye talebi arttırmaktadır. Dökme demirlerinde değişik mühendislik özelliklerinin bulunması kullanım sahasının genişlemesini sağlamaktadır (Çavuşoğlu, 1981). Dökme demirler, sünek olmadıkları için soğuk ve sıcak işlemler uygulanmak suretiyle şekillendirilemezler. Ama gerek döküm kolaylığı gerekse de mamul parça özellikleri ve aşağıdaki özelliklerinden dolayı geniş bir kullanım alanına sahiptirler (Yılmaz, 2003).

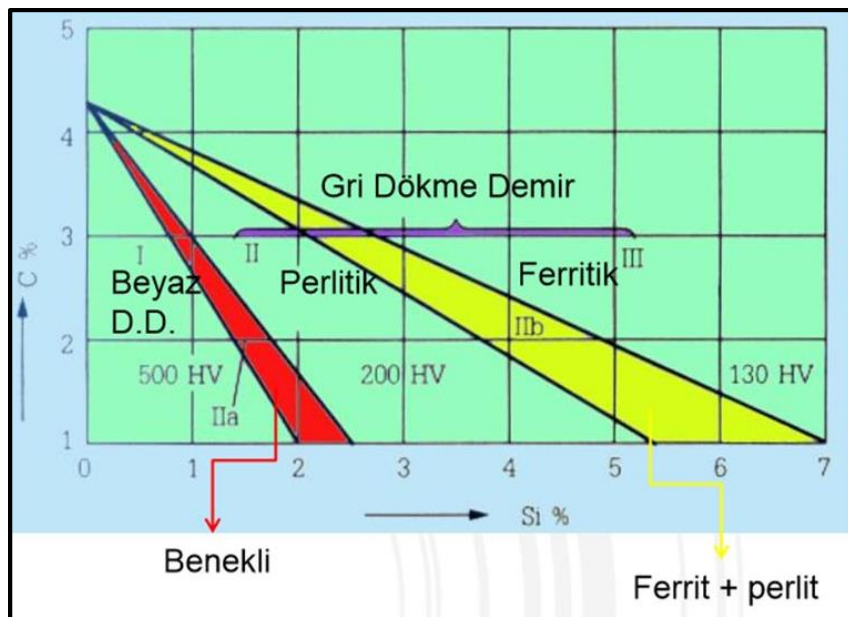
Kimyasal bileşimine ek olarak, öncelikle soğuma hızları ve alaşım elementleri yardımıyla içyapılarına oluşumu etkilenebilir. Böylece içyapı, kendisini oluşturan fazların şekil ve oranlarına, hangi fazlardan oluştuğuna göre isimlendirilir ve genel özelliklerinde bir değişikliği sağlar (Demirci, 2004).

Malzemede bir alfa fazı ve kararsız bir Fe_3C (sementit) fazı oluşur. Bunlar, normal soğutma ile kararsız pıhtılaşma için gereklidir. Bu tür malzemelerin kırılma yüzeyi, gümüşü bir parlaklığa sahip olduğu için beyaz dökme demir olarak adlandırılır. Aynı bileşim aralığında kararlı katılaşma gösteren (farklı oranlarda ve şekillerinde α ve C fazlarından oluşan) alaşımlara gri dökme demir denir. Benzer karbon miktarına bağlı olarak, katılaşma ve dönüşümlerin sonuç itibarıyla;

Kararsız (Sıvı) $\rightarrow \alpha + \text{Fe}_3\text{C}$ ve $\gamma \rightarrow \alpha + (\text{Fe}_3\text{C})$ veya

Kararlı (Sıvı) $\rightarrow \gamma + \text{C}$ (grafit) ve $\gamma \rightarrow \alpha + \text{C}$

İçinde yer aldığı sisteme (gri veya beyaz demir oluşup oluşmadığına) bağlı olarak, faz dönüşümünün gerçekleştiği soğuma hızı, alaşım elementlerinin türü ve oranı (Şekil 2) de verilmiştir (Demirci, 2004).



Şekil 2. Dökme demirlerde Si ve C oranına göre içyapı oluşumu (Maurer Diyagramı) (Demirci, 2004).

Soğuma hızının artması ve özellikle Mn, Cr, Mo, V gibi elementlerin varlığı kararsız katılaşmaya yol açar. Soğuma hızının kontrollü tutulması (fırında soğutma gibi) veya yüksek sıcaklıklarda tutarak soğutma ve Si başta olmak üzere Al, Ni, Cu, Ti gibi elementlerin varlığı, (C oranının artışı) grafit oluşumunu teşvik eder (Demirci, 2004).

Tablo 1. Dökme demir içeriğinde var olan elementler (Erdoğan, 2000).

Element	Küresel Grafitli Dökme Demir	Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir
Karbon	3.0- 4.0	2.5-4.0	1.3-3.6	2.00-2.60
Silisyum	1.8-2.8	1.0-3.0	0.5-1.9	1.10-1.60
Mangan	0.10-1.00	0.25-1.0	0.25-0.80	0.20-1.00
Kükürt	0.03 maksimum	0.02-0.25	0.06-0.20	0.04-0.18
Fosfor	0.10 maksimum	0.05-1.0	0.06-0.18	0.18 maksimum

Günümüzde dökme demirler endüstride kullanma durumlarına göre; küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demir, temper dökme demir ve gri dökme demir olmak üzere dört grupta sınıflandırılmaktadır (Tablo 1).

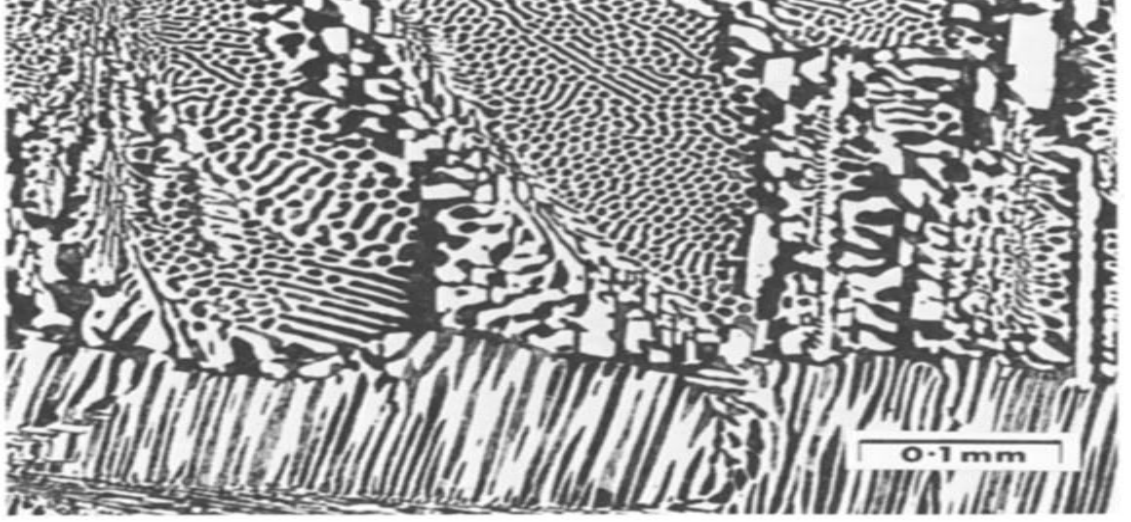
2.2.Dökme Demir Çeşitleri

2.2.1.Beyaz Dökme Demirler

Lamel grafitli dökme demir ergiyik halde ısıya tabi tutulduğunda, karbon demir içinde tamamen çözülür ve karbon demir ile kimyasal olarak birleşir. Bahsedilen erimiş metal hızlıca soğutulunca, iki eleman birleşmiş durumda bulunmaya devam eder ayrıca beyaz dökme demir meydana gelir. Buna benzer cins demirlerdeki C %2.5 veya %4.5 aralığında bulunur ayrıca birleşik C ismiyle de isimlendirilir. Beyaz dökme demir fazla kırılganlıkta ve sertliktedir, genelde de işlenebilmesi mümkün değildir aynı zamanda gümüşü beyaz kırılması da vardır (MWC, 2019).

Karbonun bütünü sementit ile bileşik oluşturur. Katılaşma sıcaklığında hızlıca soğutmayla elde edilirler ve tüm beyaz dökme demirler ötektik altı bir alaşımdır. Tipik yapısı sementit (Fe_3C) ve perlitten oluşur. Sementit sert ve kırılgan bir bileşiktir. Önemli bir oranda beyaz dökme demirde bulunur, bu nedenle sert ve aşınmaya dayanıklıdır. Çok kırılgan ve şekillendirilmesi zor bir malzemedir. Bu nedenle mühendislik uygulamalarında kullanımı sınırlıdır. Aşınma direncinin önemli olduğu ve sünekliğin istenmediği uygulamalarda kullanılırlar. Aşınma direnci gerektiren eksantrik milleri ve haddelerde kullanılan silindirler, beyaz dökme demirden yapılmış makina parçalarıdır.

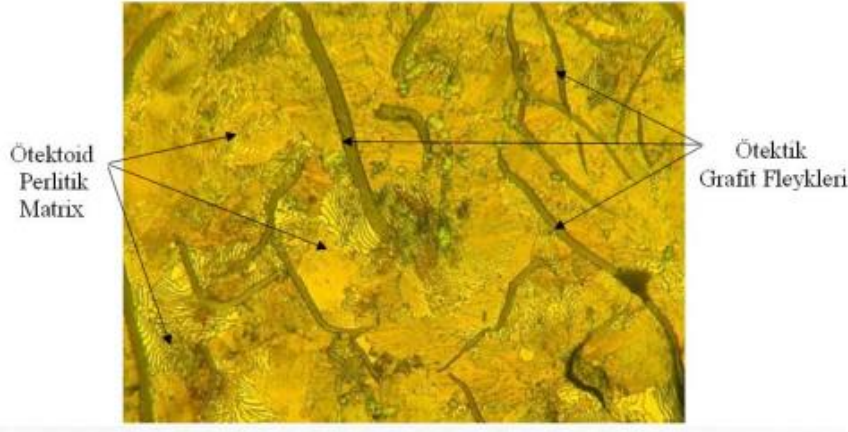
Soğutma hızı ve içyapı değiştirilerek bu tür makina parçalarının dış yüzeyi beyaz, içyapısı esmer döküm olması sağlanır. Bu yapı makina parçalarının kullanım kolaylığını artırır. Normal şartlarda işlenemeyen beyaz dökme demir, ancak taşlama yapılarak şekil verilebilir.



Şekil 3. Beyaz dökme demirin mikro yapısı (Yalçın, 1999).

2.2.2. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler

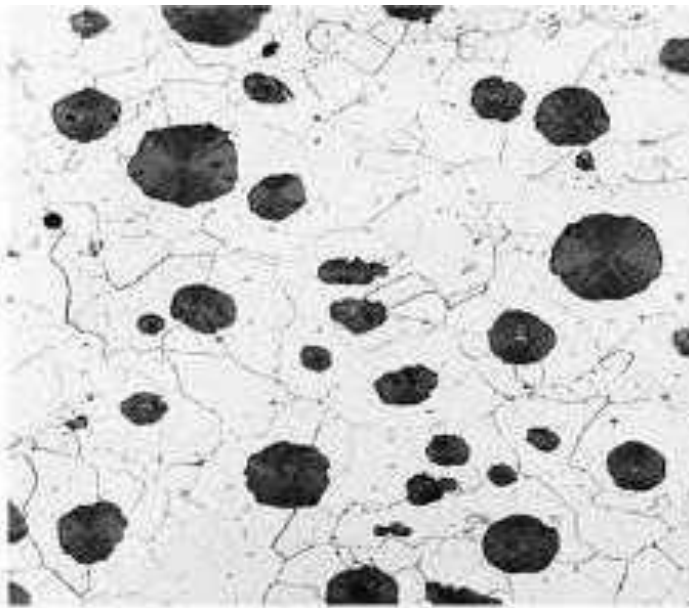
Çok fazla kullanılan dökme demir sınıfını oluşturur. Bileşimindeki karbonun çoğu serbest grafit lamelleri şeklindedir. Gri dökme demir, ötektik sıcaklıkta tutulabilecekten daha fazla C içeren katı bir çözeltide östenit ve C, Si ve Fe alaşımıdır ve C grafit pulları olarak çöker. Lamel dökme demirin ana bileşenleri % 1.7 ila % 4.5 C ve % 1 ila %3 silisyumdur. Lamel dökme demirin mekanik özellikleri, doğrudan döküm yapısı ve grafitin morfolojisi ile ilgilidir. Grafit ve ferrit karışımının mikro yapısı, en düşük mukavemetli gri dökme demiri sağlar. Karbon oranı arttıkça malzemenin mukavemeti ve sertliği de artar. Gri dökme demir, çeşitli özellikleri nedeniyle mühendisliğin birçok sahasında uygulanır. Başlıca özellikleri, titreşim sönümleme, yüksek mukavemeti ve düşük maliyetlidir.



Şekil 4. Lamel grafitli (gri) dökme demirin mikro yapısı

2.2.3. Küresel Grafitli Dökme Demirler

Sfero demir olarak da bahsedilen bu tip dökme demirde karbon, grafit küre şeklinde bulunur. Küresel grafitli dökme demir genellikle aşınma direnci, kolay dökülebilirlik, yüksek mekanik dayanım ve belirli gereksinimleri aynı zamanda karşılaması gerekli karmaşık biçimli yapısal parçalar için kullanılır (Gouveia vd., 2017). Lamelden küreye karbon transferini sağlamak için dökümden önce ergimiş demiri aşılama yapılır. Temperler, dökme demirden farklıdır, çünkü küreler katılaşma ile sağlanır. Grafitin şeklinin lamelden ziyade küresel şekli, dökme demire süneklik ve mukavemet kazandırır. Bunun nedenle, gri dökme demirin grafitler lamel halinde ve keskin köşeli olmasıdır. Malzeme gerilim yüklemesi yapıldığında, grafit köşelerde gerilim meydana gelir. Çatlaklar önce bu alanlarda başlar ve matriste süreksizlikler oluşturur.

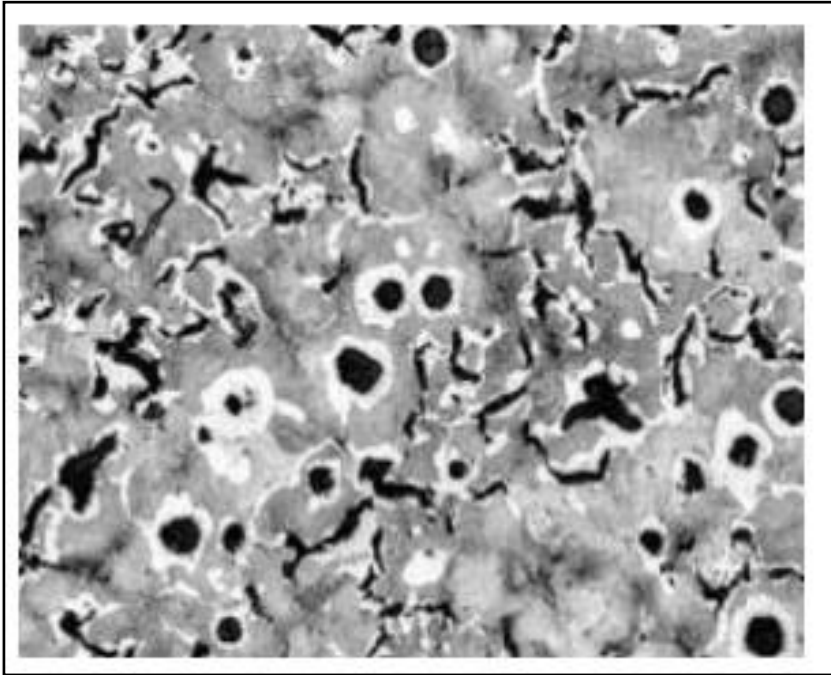


Şekil 5. Küresel grafitli dökme demirin mikro yapısı (Mozumder, 2015).

2.2.4. Kompakt (Vermiküler) Grafitli Dökme Demirler

Vermiküler gri dökme demir, lamel, grafit ve küresel grafitli dökme demir arasında benzersiz ara fiziksel ve mekanik özelliklere sahiptir. Bu özellikler, metal matris içerisindeki benzersiz gri morfolojisine bağlanır. Kompakt Grafit Dökme Demir Grafit parçacıkları, ötektik bir hücre içinde kısa, yuvarlak, birbirlerine bağlanmış kümeler biçimindedir. Vermiküler terimi, kompakt grafitli dökme demirin grafit morfolojisini belirtmek için kullanılır (Muhammed, 2011).

Son yıllarda sanayide dökülen parçalara baktığımızda, çoğunlukla gri ve küresel grafitli dökme demir parçalardan oluştuğunu görebiliriz. Uygulama alanına bağlı olarak, dökülebilirlik, işlenebilirlik, sönmüleme kapasitesi, ısı iletkenlik özelliklerine sahip lamel grafitli dökme demir veya daha yüksek mekanik özelliklere sahip küresel grafitli dökme demir tercih edilir. Başka bir deyişle, tercih edilen dökme demir kalitesine bağlı olarak bazı tavizler verilmesi gerekmektedir. Tercihimiz yüksek mekanik özellikleri veya lamel grafitin getirdiği diğer özellikleri tarafında kullanırız. Ülkemizde daha az yaygın olmasına rağmen, bu iki dökme demirden elde edebileceğimiz başka bir grafit yapı vardır. Vermiküler (veya kompakt) grafit. Bu yapı, lamel ve küresel grafit yapılar arasında bir ara geçiş formu olarak görülebilir ve motor blokları gibi hem yüksek mekanik özellikler hem de yüksek ısı iletkenliği gerektiren parçalar için uygun bir seçenektir. Sfero dökme demirin yüksek dökülebilirliği ve işlenebilirliği, onu sfero döküme çekici bir alternatif haline getirir.

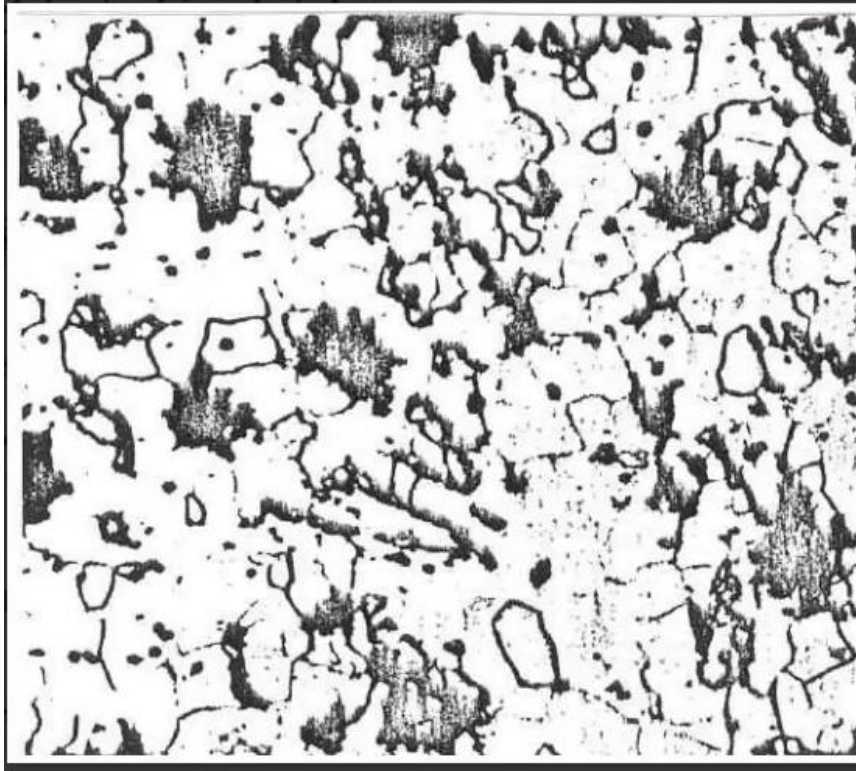


Şekil 6. Kompakt (vermiküler) grafitli dökme demirin mikro yapısı (URL-1, 2022).

2.2.5. Temper Dökme Demirler

Dövülebilir dökme demir olarak da bilinen bu dökme demir (DIN 1692), Si ve karbonun oranı ayarlanarak grafitsiz katılaştırılır. İlk aşamada elde edilen bu beyaz dökme demirin çekmesi ham dövülebilir dökme demir olup %1-2 arasında değişmektedir. Yoğunluğu 7.4 g/cm³'tür. Dövülebilir dökme demirin maksimum duvar kalınlığı, yüzeyden uzaklaştıkça daha yavaş soğuma hızı nedeniyle içeride grafit lamellerinin oluşmasını önlemek için genellikle kalınlık 40 mm ile sınırlandırılır. Aynı nedenle, diğer döküm malzemelerinin aksine, döküm parçaların kütlesi genellikle 1 kg'dan azdır.

Beyaz dökme demir, ancak ısıtılma işleminden sonra temper dökme demir haline gelir. Ham dökümün bileşimi ve ısıtılma ortamı, sıcaklık ve zaman yeni iç yapıyı belirler. Ayrıca, parçanın her tarafında benzer bir iç yapı elde etmek için duvar kalınlığı mümkün olduğunca sabit tutulmalıdır. Karbonu azaltılmış ve meydana gelecek grafitin şekli nedeni ile iç çentik etkisini azaltan olacak temper dökümün dayanım ve biçim değiştirme özelliği bakımından gri dökme demir ile çelik dökümü arasında olur. Kırılcılığının yüzeyinin görünümüne göre beyaz ve siyah olmak üzere iki çeşidi vardır.



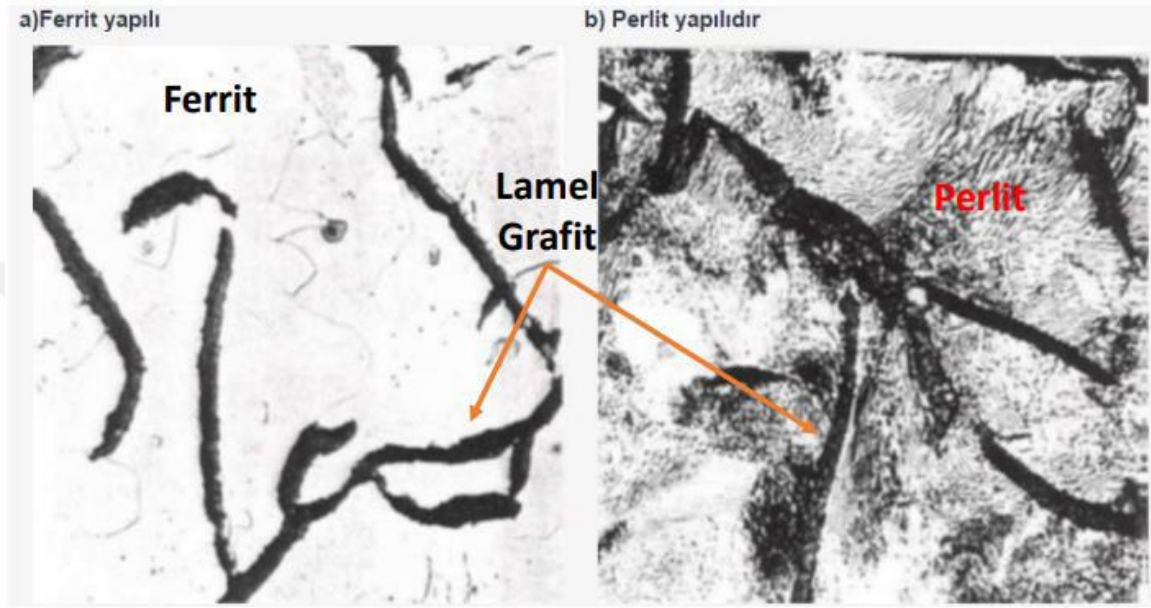
Şekil 7. Temper dökme demirin mikro yapısı (URL-2, 2022).

2.3. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirler

Katılaştıktan sonra bileşimindeki karbonun büyük bir kısmı serbest grafit yaprakları (lamel-pul) hâlinde bulunan bir dökme demir çeşididir. Kırıldığı zaman yüzeyi isli gri

görünüştür. Grafitten dolayı rengi esmer olan bu dökme demire lamel grafitli dökme demir veya gri dökme demir denir.

Lamel grafitli (Gri) dökme demirin bileşiminde ana yapısı demirden başka karbon, silisyum, manganez, fosfor ve kükürt bulunur. Bileşiminde bulunan bu elementler genel olarak ham demir (pik)den gelmektedir. Kükürt, gri dökme demirin içinde bulunması arzu edilmeyen bir elementtir. Fosforun ise pek az miktarı faydalıdır.



Şekil 8. Lamel grafitli (gri) dökme demir yapısında grafit dağılımı (Kurt, 2019).

Gri dökme demir, ötektik bileşime sahip bir alaşımdır, bu nedenle çok iyi akışkanlığa sahiptir. Bu avantaj, çok ince profillerin dökümünü yapmamızı sağlar. Gri dökme demir için, basınç dayanımı genellikle çekme dayanımının 3-5 katıdır. Yüksek basınç dayanımı, gri dökme demirin önemli özelliklerinden biridir. Grafit tabakası olan dökme demir durumunda sertlik, çekme mukavemetine paralel olarak değişir. Çekme mukavemeti ile sertlik arasındaki ilişki bir bağlantıyla ifade edilebilir (Kurt, 2019).

Gri grafit içeren dökme demir için, grafitin şekli ve yapısı alaşımın mekanik özelliklerinde önemli bir rol oynar. Grafit pullarının şekli, boyutu ve dağılımı katılaşma sırasında oluşur ve sonraki ısıl işlemlerle değişmez. Pul şeklindeki grafit dökme demiri (gri) mikroskop altında incelemek, yapısı boyunca dağılmış bir grafit yaprakların görüntüsündedir. Bu grafit yaprakların, kalın kesitli dökümün parçalarının şeklinde göz ile görülebilir. Pul grafitli dökme demir (gri) mikroskop altında incelendiğinde görülen yapı yukarıda gösterilmiştir. Gri dökme demirin kimyasal yapısı aşağıdaki gibidir (Akça, 2005).

Tablo 2. Lamel grafitli (gri) dökme demirin kimyasal bileşimi (MEB, 2011).

Element Adı	Miktarı %
Karbon	2.50-4.00
Silisyum	1.00-3.00
Manganez	0.40-1.00
Fosfor	0.05-1.00
Kükürt	0.05-0.25

2.3.1. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirin Bileşimindeki Elementler

Belirli özellikleri değiştirmek veya iyileştirmek için lamel grafitli dökme demire elementler eklenir. Bu elementlerin gri dökme demir üzerindeki etkileri aşağıdaki gibidir:

- Mikro yapısını ve grafitleşme özelliklerini değiştirir.
- Mekanik özelliklerini artırır.
- Sıvıların ve gazların oksitleyici etkilerine karşı direncini artırır.
- Bazı fiziksel özellikleri iyileştirir.

Lamel grafitli dökme demirler fosfor, manganez, kükürt, silisyum ve karbon elementlerini bünyesinde barındırır. Bu elementler tüm dökme demir çeşitlerinde bulunur.

-Karbon (C): Lamel grafitli dökme demirlerde bulunan karbon, demir karbür (sementit- Fe_3C) ya da serbest grafit olarak bulunmaktadır. Bu bileşimde yaklaşık olarak %3 ile %3.5 arasında karbon elementi bulunmaktadır. Bu element, gri dökme demire ait akıcılığı artırırken, ergime sıcaklığını ise azaltmaktadır. Bileşimin karbon oranı %3' ün altına düşüldükçe gri dökme demirin çekmesi artmaktadır.

-Silisyum (Si): Lamel grafitli dökme demirde yaklaşık olarak %1 ile %3 arasında silisyum bulunmaktadır. Silisyum oranı yükseldikçe, ötektoid ve ötektik bileşimleri bünyesindeki karbon oranı düşer. Ancak ötektoid ve ötektik sıcaklık artar. Silisyum elementi, gri dökme demire akıcılık ve yumuşaklık kazandırır.

-Manganez (Mn): Manganez, karbon elementinin grafit hâlinde ayrışmasına engel olmaktadır. Bileşimde yaklaşık olarak %0.4 ile %1 arasında bulunmaktadır. Eğer %2'lik dilimden çok olursa grafitleştirme olayı geciktirmektedir. Dökme demire sertlik özelliğini veren elementtir. Bu element, mangan sülfür halinde birleşmektedir. Ayrıca kükürt elementinin kötü etkilerini de önlemektedir.

-Fosfor (P): Fosfor demir içinde erimektedir ve demir ile demir fosfürü (Fe_3P) oluşturmaktadır. Karbonun grafit olarak ayrılmasında katkısı vardır. Bu element dökme demirin katılaşma süresini geciktirirken akıcılığının artmasına sebep olmaktadır. Lamel grafitli dökme demirde ortalama %0.50 ile %1 arasında bulunmaktadır. Yüksek fosfor içeren dökme demirlerin zayıf ve aşırı derece kırılğan yapıları vardır. Bu nedenle fosfor

miktarı %0.5 olmalıdır. Bu elementin miktarının artması dökme demirin de sertliğinin artmasına sebep olmaktadır.

-Kükürt (S): Lamel grafitli dökme demirde yaklaşık olarak %0.05 ile %0.25 arasında kükürt elementi bulunmaktadır. Yapıya olan etkisi azımsanmayacak kadar fazladır. Kükürt miktarının %0.15'in üzerinde olması, dökme demirde sertliğe bunun sonucunda işleme özelliğinin de azalmasına sebep olmaktadır. Bu element Manganez elementi ile birleşerek cürufa mangan sülfür olarak karışmaktadır.

-Nikel (Ni): Nikel, dökme demirin yapısındaki en önemli elementten biridir. Hem perlitin hem de grafitin yapısını inceltme etkisine sahip olan nikel, dökme demirin tokluğunu artırmakla kalmaz, kesitler arasındaki sertlik farklılıklarını da ortadan kaldırır. Güçlü bir östenit oluşturucu olan nikel, yüksek oranlarda eklendiğinde dökme demiri östenit bir yapıda katılaşması sağlıyor.

-Krom (Cr): Güçlü bir karbür oluşturucu olan krom, az miktarlarda ilave edildiğinde yapıdaki grafit miktarının azaltılıp çil oluşumunu tetikleyici etki yaratabilir.

-Bakır (Cu): Sıvı dökme demire bir fırın veya pota içinde %0.5 ile %2.5 oranında ilave edilen bakır çili azaltmakla kalmaz aynı zamanda grafit yapıyı seyreltir ve sıvının akışkanlığını artırır.

-Molibden (Mo): Molibden, karbür oluşturucu etkisinden dolayı hem grafit hem de perlit yapılar üzerinde seyreltici etkiye sahiptir. Dökme demire %0.3 ile %1 aralığında ilave edilen molibden, alaşımının yapısal sertliğini arttırmak maksadıyla sıklıkla bakır, nikel ve krom ile birlikte kullanılır.

-Vanadyum (V): Dökme demirin aşınma direncini ve sertliğini arttırmak için %0.15-0.5 oranında eklenebilir. Bu elementin karbür oluşturucu yapısı vardır (Alp, 2005).

Alüminyum: Dökme demire grafitleştirme artırıcısı olarak eklenir. Genellikle %0.25- %2.00 ve özel durumlarda %4'e kadar alüminyum eklenebilir. Alaşıma %2'ye kadar, katı olarak daha fazla ise sıvı halde eklenir. Yüksek alüminyum içeriği, dökme demir tanenin büyümesini ve yüzey oksit tabakası oluşumunu ortadan kaldırır.

Titanyum: Titanyum alüminyum gibidir. %0.005 ila %0.025 arasında kullanılır. Dökme demir ile aşırı soğutulmuş ince grafit oluşturur. Aşırı soğutulmuş grafit, ferrit oluşturma eğilimini gösterir mekanik mukavemeti azaltır. Öte yandan titanyum, ana yapıyı meydana getirir. Dökme demirin mukavemetini ve korozyon direncini artıracaktır (MEB, 2011).

2.3.2. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirin Yapı Bileşenleri (Mikro Yapısı)

Gri dökme demirin mikro yapısı aşağıda gösterilmiştir.

Grafit: Gri dökme demirin ana yapısal bileşeni. Dökme demirin şekline ve miktarına bağlı olarak, dökme demirin özelliklerini büyük ölçüde etkileyecektir. Dökümün, parçaların yavaş soğuması, kalınlıkların çok miktarda olması veya birleşiminde grafitleştirici elemanların fazla bulunması serbest grafiti artırır. Grafit yapılarında bulunan yaprakçıklar (pul pullar) şeklindedir. Grafit, gri dökme demirin çekme mukavemetini azaltır ve ötektik yapıların erime sıcaklığını da düşürür. (MEB, 2011)

Ferritler: Ferritler genellikle ferritik gri dökme demirde bulunur. Gri dökme demir serbestçe veya perlitin bir bileşeni olarak kullanılabilir. Bu element yumuşak olduğundan dökme demirlerin çekme dayanımları da düşüktür.

Perlit: Perlit gri dökme demirde daha yaygındır. Ferrit ve sementit karışımı. Perlit mikroskopla incelendiğinde; ince uzun veya kısa paralel bir tabaka (parmak izi) olarak görünür.

Sementit: Gri dökme demirde perlitin içerisinde. Bir demir karbür bileşiğidir. Çok sert ve kırılgan bir yapıya sahiptir.

Steadit: gri dökme demir fosfor, düşük erime noktasında (Fe)-demir karbürün (Fe_3P) üçlü ötektik oluşturur. Buna steatit denir. Steatit yavaş soğuması nedeniyle gri dökme demir yapısında hücresel şeklinde görünür. Steadit, görünüşünün açık ve parlak üzeri benekli.

Mangan sülfür: Gri dökme demirde S ile birleşince mangan sülfür (MnS) oluşur. Yapıyı mikroskop altında incelenirse, fazla kenarlı açık mavi veya grimsi renktedir. Bu yapı gri dökme demirin özelliklerini etkilemez.

2.3.3. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirin Mühendislik Özellikleri

Lamel grafitli (Gri) dökme demirin kullanılma sahası, dökümü yapılan diğer metal ve alaşımlardan daha geniştir. İnce şekillerdeki parçaların dökümlerine elverişlidir. Mekanik dayanımı iyi olan gri dökme demirin dökülerek şekillendirilmesi de ucuzdur. İşlenmesi kolaydır. Bu nedenle otomotiv sanayinde, fırın ve ocak parçalarında, radyatörlerde ve makine gövdelerinde ve pek çok sanayi kolunda rahatlıkla kullanılır.

Tablo 3. Lamel grafitli (gri) dökme demirin mühendislik özelliklerinin karşılaştırılması (URL-3, 2022).

ÖZELLİK	LAMEL G.D.D.	VERMİKÜLER G.D.D.	KÜRESEL G.D.D.
Kopma Dayanımı N/mm ²	100-400	300-500	350-900
%2 Akma Sınırı N/mm ²	-	250-400	250-600
Kopma Uzaması %	Maks 1.5	1.5-8.0	3-25
Eğilme Dayanımı N/mm ²	300-600	500-800	800-1200
Basma Dayanımı N/mm ²	500-1400	600-1200	600-1200
BRİNELL Sertlik	140-130	140-240	120-350
E-Modülü KN/mm ²	75-155	140-170	165-185
Isıl İletkenlik W/cm ² K	0.46-0.50	0.38-0.50	0.25-0.30
Hacimsel Çekme %	1-3	1.5	7-10

-Gri grafitli dökme demirin akışkanlığı: Lamel grafitli (gri) dökme demir, tüm dökme demirler arasında en akışkan olanıdır. Bu amaçla motor bloklarını, radyatörleri ve karmaşık şekillerdeki parçaları dökmek için kullanılır. Lamel grafit (gri) dökme demirin akışkanlığı, bileşimindeki elementlerin sayısına ve döküm sıcaklığına bağlıdır. Lamel grafit (gri) dökme demirin ergime sıcaklığı ne kadar yüksek olursa, katılaşması o kadar yavaş olur. Bileşimindeki fosfor içeriği de akışkanlığını artırmaktadır.

-Lamel grafitli (gri) dökme demirin sertliği: Sertlik, gri dökme demirin kimyasal bileşimine bağlıdır. Gri dökme demirin sertliği, hızlı soğutma sırasında artar. Daha hızlı veya daha yavaş soğutma, dökümün kesit kalınlığına bağlıdır. Kesit kalınlığını kontrol ederek gri dökme demirin sertliğini kontrol etmek kolaydır. Normal gri dökme demirin sertliği 120 ila 200 Brinell'dir. Alaşımli gri dökme demirin sertliği 600 Brinell'dir.

-Lamel Grafit (Gri) dökme demirin çekme mukavemeti: Bu, lamel grafit (Gri) dökme demirin önemli özelliklerinden biridir. Çekme testi, bir gri dökme demir yüküne milimetre kare (mm²) başına kaç kilogram (kg) yük dayanabileceğini gösterir. Çekme mukavemeti de kimyasal bileşim ile yakından ilgilidir. Makine parçasının özel lamel döküm parçalarının çekme mukavemeti 18 ila 24 kg/mm²'dir. Sıradan gri dökme demirin çekme mukavemeti 20 ila 24kg/mm²'dir.

Tablo 4. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin mekanik özellikleri (Akkurt, 1985).

Norm Doku	GG-10	GG-15	GG-20	GG-25	GG-30	GG-30 GG-40
Isıl İletkenliği	7.2	7.2	7.2	7.2	7.35	7.35
Elektrikli Direnç	0.5-1.0	0.5-1.0	0.5-1.0	0.5-1.0	0.5-1.0	0.5-1.0
Özgül Isı	0.46-0.59	0.46-0.59	0.46-0.59	0.46-0.59	0.46-0.59	0.46-0.59
Manyetik Kuvvet	2.5	2.5	2.5	2.5	9.0	9.0

Tablo 5. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin mekanik özellikleri (Hoper, 1977).

Norm Doku	GG-10	GG-15	GG-20	GG-25	GG-30	GG-35	GG-40
Çekme Dayanımı kg/mm ²	10	15	20	25	30	35	40
Bükme Dayanımı kg/mm ²	20-31	23-37	29-43	35-49	41-55	47-61	53-67
Basma Dayanımı kg/mm ²	50-60	55-70	60-83	70-100	82-120	95-140	111-140
Sertlik HB	100-150	140-190	170-210	180-240	200-260	210-280	230-300
E-Modülü 10 ³ /mm ²	75-100	80-105	90-115	105-210	110-140	125-145	125-155

-Lamel grafitli dökme demirin aşınma direnci (gri dökme demir): Sertlik ve aşınma direncinin gerekli olduğu birçok yerde beyaz dökme demir gri dökme demire tercih edilir. Gri dökme demir kullanılan alanlar ise basınç yüksektir ve aşınma az olduğu alanlardır.

2.4. Lamel Grafitli (Gri) Dökme Demirlerde Katılaşma

Grafitin miktarı, şekli, boyutu ve dağılımı, dökme demirin katılaşmasında önemli bir rol oynar. Grafit yapısı diğer atomlarla kovalent bir bağ oluşturur, ancak grafit yapının kendileri arasında wader wals zayıf olan bağ yapısı oluşu grafiti kırılğan bir malzeme yapar.

Grafitin makro yapısı bir pervane veya yaprak şeklindedir. Üç eksen boyutunda grafit kristalleştiğinde, normal şeklini aldığı anda uzama ve kopma mukavemeti sıfır olacak malzeme meydana gelir. Dökme demirin istenen özelliklerini elde etmek için katılaşma sırasında grafitin şeklini ve miktarını kontrolde tutmak önemlidir. Grafitin dökme demir üzerinde iki olumsuz etkisi vardır (Kaya, 2019; Şen, 2018).

- a) Etkin iş yapılabilecek alanları azaltır
- b) Çentik etkisi oluşur

2.4.1. Demir – Karbon – Silisyum Alaşımının Katılaşması

Gri dökme demirlerde grafitleşmeyi özendirici en önemli bileşim etkeni, alaşımdaki Silisyumdur. Silisyumun etkisi, demir-karbon-silisyum üçlü sisteminden alınan düşey kesitler yardımı ile daha iyi gösterilebilir. %3.5 karbon ve % 2 Silisyum içeren bir demir, karbon, silisyum alaşımının katılaşması göz önünde tutulduğunda: dengeli katılaşma şartlarında primer ostenit dendritleri 1260-1127°C da yani liküdüs eğrisi ile ötektik katılaşmanın başlangıcını belirten eğri arasındaki sıcaklık aralığında, meydana gelirler. 1127-1099 °C aralığında ötektik (ostenit + grafit) katılaşması ile katılaşma olayı tamamlanmış olur (Kaya, 2019).

Söz konusu alaşımda katılaşma sonlandığında, mikro yapı %20 primer ostenit dendritleri ve %80 ostenit + grafit ötektiğinden oluşur. Sıcaklığın solüdis'ün altına düşmesi ile C, ostenitten grafit halinde kusulur ve ötektikteki grafit lamellerin üzerine çöker.

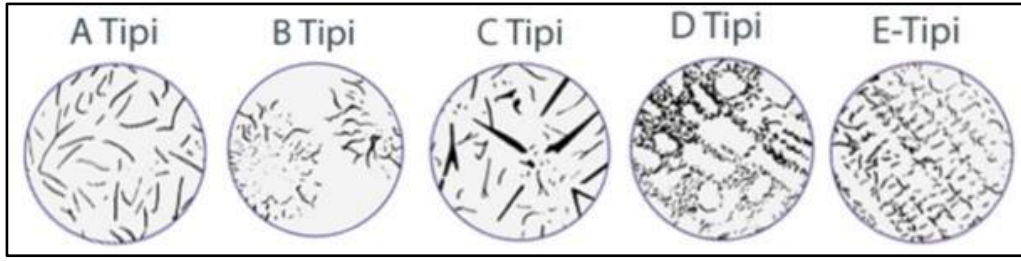
Karbonun çökmesi ötektoid sıcaklığına (%2 Silisyum için yaklaşık 801 — 706 °C) ulaşıncaya kadar sürer. Ötektoid sıcaklığında % 2.0 Silisyumlu östenit yaklaşık olarak % 0.60 C içerir; bunu takip eden dengeli soğumada ise ostenit ferrite dönüşür ve C'un sonraki kısımda grafit lamellerin üstüne çöker. Son mikro yapı, primer ostenit dendritlerin-den oluşan ferrit alanları ile ostenit grafit ötektiğinden oluşan ferrit ve grafit karışımı şeklindeki bölgeler halinde gözükür (Şen, 2018).

Satılan dökme demirlerde birden fazla başka elementin mevcut oluşu ve bundan dolayı diğer sebeplerinde işe katılmasıyla benzer katılaşma çok daha karışık şekilde oluşur. Grafitleşmenin üç önemli kademesini ortaya konmaktadır,

- a) Katılaşma esnasında grafitleşme,
- b) Ostenitten C çökmesiyle grafitleşme (katı halde)
- c) Ötektoid dönüşüm sırasındaki katı halde grafitleşme sürer. 538 °C'a kadar da bahsi geçen sıcaklıklarda geçecek zamanın çok fazla olmaması şartıyla grafitleşme meydana gelebilmektedir (Şen, 2018).

2.5. Lamel grafitli (gri) dökme demirlerin grafit tipleri

DIN EN ISO 945-1 standardına göre, lamel grafitli dökme demirde şekilde görülen grafit tipleri A, B, C, D ve E olarak beş ana grupta toplanmıştır:



Şekil 9. Gri dökme demir grafit tipleri (Uçal, 2019).

A tipi grafit:

Bu grafit, yapısında homojen biçimde dağılmış ve gelişigüzel yönelmiş yapraklar oluşur. Soğuma hızı aşırı olmayan ve doğru biçimde aşılانmış dökme demirlerdeki grafitin biçiminin meydana çıktığı dökme demirlerde soğumanın da aşırı düşük seviyedeler de gözükür. Bu tip grafit, önemli sayıda mekanik özelliklerin dolayı dökme demir yapısında çok tutulan bir tiptir (Kurt, 2019; Şen, 2018; Uçal, 2019).

B tipi grafit:

Çiçeksi grafit (rosette graphite) olarak da adlandırılan bu tip, ötektik kompozisyonu olan dökme demirlerin, A tipi grafitte göre bir miktar daha çok soğumanın olduğu zamanlarda ortaya çıkan bu tipin, genellikle kalın ya da ince kesitli malzemelerin yüzeylerine yakın kısımlarda görülür. Bazı zamanlarda aşılamanın verimsiz olduğu anlarda da bu tip grafit meydana çıkabilir (Kurt, 2019; Şen, 2018; Uçal, 2019).

C tipi grafit:

Kiş grafit (kish graphite) adında alan bu tip, yalnız karbon eşdeğerinin fazla olduğu, ötektik üzeri katılaştıran malzemelerdir. Çok iri kiş grafitler çekme ve darbe dayanımını düşürür işlenmiş yüzeylerde görünüm bozukluklarına rastlanır. Grafit oranının fazla olmasından dolayı dökme demire aşırı sıcaklık geçirgenliği sağlayan C tipi grafit şekli, bu özelliği sebebiyle aşırı sıcaklık geçirgenliği aranan yerlerde kullanılır (Kurt, 2019; Şen, 2018; Uçal, 2019).

D tipi ve E tipi grafit:

Her iki grafitin içeriği de karbür (sementit) oluşturacak düzeyde olmasa da, fazla soğumanın nispete yüksek olduğu zamanlarda gözlenebilir. Dendritler arası bölgede gruplaşmış halde incelediğimiz bu grafit yaprakları, D tipinde gelişigüzel yönetime sahip şekilde, E tipi grafit yapısı kısmen veya tesadüfen gözlenir. Bu tipler ne kadar ayrı belirtilmiş olsa bile dökülen malzemenin bütün kesitlerinde A tip grafit elde edilşinin çok zor olduğu ve özellikle ince kesitli olan parçalarda D ve E tip grafit A tipi ile birlikte bulunur (Kurt, 2019; Şen, 2018; Uçal, 2019).

2.6. Aşılama

Aşılama Eriyiğin çekirdek ihtiyacının uygun miktara getirilmesine aşılama işlemi denir. Özdeş kristalografik özellikte malzemeler ile yapılan çekirdeklenme işlemine homojen, farklı bir malzemenin çekirdek yapıcı özelliğine ise heterojen çekirdeklenme denilmektedir. Bu işlem tretman potasında yapılır. Amaç ise sıvı metalin dengesiz katılaşmasını, grafit kürelerinin fazla irileşmesini önlemek ve karbür oluşumunu engellemektir (Çekici, 2022; Demir, 2021; Yıldız, 2014).

Aşılama işleminin tesiri belli bir süreye bağlıdır. Buna aşının sönümlenme zamanı denmektedir. Aşının sönümlenme zamanı aşının eklenmesiyle beraber başlar ve ötektik katılaşma sıcaklığına ulaşınca sonlanır. Aşılama ile küre adedi artabilir, kürelerin sönümlenme süresi uzar. Bu sayede döküm daha uzun süre devam edebilir. Küreselleştirme işleminden sonra yaklaşık yedi dakika süresinde döküm yapılmalıdır. Aşılama bu süreyi uzatmaktadır. Kalın kesitli malzemelerde katılaşma zamanı uzadığı için aşılama malzeme etkisi de azalmasından dolayı daha az miktarda ve daha büyük küreler oluşur. Kalın kesitli malzemelerde geç aşılama ve döküm sıcaklığını düşük tutmak küre adedini artırılabilir. Geç aşılama kalıp içinde ya da metal akışında yapılması gerekir (Çekici, 2022; Demir, 2021; Yıldız, 2014).

Aşılama, çil oluşma meyillini azaltır. Bu da işlenmesini kolaylaştırmakta ve servis süresinde kırılmayı azaltır. KGDD de aşılama küresel grafit kristallerinin oluşumunu sağlayan heterojen çekirdekler oluşturur. Bu sayede karbür oluşumunu etkiler ve engeller. KGDD de baz eriyiğin Silisyum miktarının, aşılama ile kullanılan Silisyum miktarına oranı çok büyük ise metalürjik kalite düşük, zıttı olarak çok yüksekse grafit küre adedi azalarak döküm zamanında karbürlere sebep olacaktır (Çekici, 2022; Demir, 2021).

Aşılama, aşırı soğutmayı minimuma indirerek ve Küresel grafitli dökme demir, grafit küresellerin büyümesinde var olan çekirdeklenme alanların sayılarını artırılarak dökme demirin özelliklerini ve mikro yapısını kontrol etmenin bir başka yoludur. Bu işlem; dökme demirin yapısının homojenliğini arttırdığından dolayı önemli bir işlemdir, karbürlerin ince malzemelere veya göze alan açılar şeklinde oluşmasını meydana kaldırmasına kolaylaştırır. Belirli değişkenler aşılamanın etkinliğini etkiler, ergiyik ısı, şarj materyalleri, zaman, aşılama malzemesi, kesit büyüklüğü, döküm metodu, aşılama modu ve vb. Aşılama malzemesi ise dökümden evvel ergimiş metale, bir basamak sonraki katılaşma esnasında grafitin çekirdeklenmesi için uygun faz sağlayacak olan bir malzemedir. Geleneksel olarak, aşılama malzemesi grafit, ferrosilisyum veya Ca-Si bazlı olmuştur. Zamanımızda çok gözde aşılama malzemesi, Zr, Sr, Al, Ba ve Ca vb gibi az sayıda element içeren ferrosilisyumdur. Aşılama malzemesi, döküm işlemlerine bağlı olarak değişik ölçülerde bulunur. Aşılama

eklenmesi, akışta, fırın içinde, kalıpta veya potada yapılır. İlave olarak aşılama, demirin süneklik ve mukavemetini artırır. Demir katılaşma mekanizması, aşılama kifayetsiz olduğu zaman soğutulmuş demir yapılar düzenlemeye meyillidir bu halde kabul görmeyen bir durumdur. Soğutulmuş yapıların tercih edilmemesinin çok az sebepleri vardır. Bu yapılarda ilave ısı işlemlere ihtiyaç vardır. İşlenmeyi zorlaştırır, koşullara uymamaya sebep olur ve genelde toplam imalat giderlerini yükseltmektedir. Aşılama, stabil sistem karbon-demire göre katılaşmayı kolaylaştırır. Bu, Fe_3C olduğu metatit ötektik ısısının aşağısında aşırı derece soğutmanın önlenmesiyle yapılmaktadır. KGDD ve lamel dökme demirin aşılama, aşılama malzemelerin az miktarda eklenmesiyle meydana getirilir (Çekici, 2022; Demir, 2021; Yıldız, 2014).

Bu işleminde önemlenecek hususların en önemlisi aşılama malzemesinin tamamının kuru olması gereği yoksa döküm yüzeylerinde karıncalanmaya sebep olur. Aşılama malzemesinin uzunluğu çabuk ergiyecek kadar küçük ve hemen paslanma olmayacak, ani patlama göstermeyecek kadar büyük olmalıdır. Sıvılaşmış metal, aşılama sırasında cüruftan tam olarak temizlenmiş olması gerekir. Doğru netice almak için mümkün mertebe geç aşılama gerekir zira aşılama sonrası geçen süreyle aşılamanın tesiri sona erdiği gibi, bu sürede sıcaklık azalmasına sebep olmaktadır. Isısı azalan grafit küre sayısını da azaltacaktır. Bununla birlikte aşılama sıcaklığı arttıkça aşılama verimi de o miktarda düşer. Bu sebeple aşılamanın mümkün olacak düşük ısılarla ve son evresinde yapılması mükemmel sonuç vermektedir (Çekici, 2022; Demir, 2021; Yıldız, 2014).

2.7. Akıcılık

Akıcılık, döküm tekniğinde herhangi bir döküm sıcaklığında döküm yapıldığında metallerin katılaşmadan önce test kalıbına aktığı mesafedir. Bu sebepten dolayı akışkanlık, metre veya milimetre ölçüleriyle ölçülmektedir. Genelde akışkanlığı, ölçmek için spiral kalıp kullanılır. Mantığı ise akışkanlık testini çok küçük kalıba uydurmaktır. Akış uzunluğu tesviye hatalarına karşın milimetrik olmalı ki sıvı spiral yolu ile minimuma indirgenebilsin. Sıvı metal, kalıba bir veya birkaç adet yolluklar vasıtasıyla girer. Yolluktaki sıvı katılaşmadan önce kalıbın boşluğu doldurulmazsa, "sıvı metal yeterince akıcı değil" denir. Bundan dolayı akıcılık terimi dökümcülere fizikçilerden farklı bir anlam verir. Fizikçilere göre de akıcılık viskozitenin zıttıdır. Dökümcülere göre ise işlem karakteristiğinin ampirik bir ölçüsüdür. Dökümcünün bu özelliği farklı akıcılık deneylerinden bir tanesiyle ölçer. Bu deneylerde ısıtılmış metal, kesiti dar olan uzun bir kanal içine akıtılır. Akışın katılaşma dolayısıyla durmasından önceki kat ettiği mesafe akıcılığın ölçüsüdür (Aslandoğan, 2009; Kaya, 2019).

Akıcılık deney kanalına, sıvı noktasında dökülen katıksız bir metalin akma ve katılaşması incelendiğinde katılaşmanın metalin kanala girdiği anda kanal girişinde başladığı görülür. Bu sebeple, katılaşmanın öncelikle kanal girişinde başlamış olması sebebiyle burada akış tıkanır. Sıvı metalin duraklamadan aktığı toplam mesafe akıcılığı verecektir. Akışkanlık, metalurjik döküm/kalıp değişkenlere ayrılabilen birden fazla sebeplerden etkilenir. Bu sebepler; aşırı derecede sıcaklık, bileşim, gizli ısı, oksit filmi, ergiyik, katılaşma ve yüzeyin gerilim biçimidir. Döküm / kalıp etkenleri; kalıbın ısısı, kalıp iletkenliği ve ara yüzde ısı geçiş katsayısıdır (Aslandoğan, 2009; Kaya, 2019).

Metallerin ve alaşımın belli bir kalıp doldurma ısısı vardır. Ergimiş metal düşük sıcaklıklarda boşaltılırsa kalıbın içerisinde nispeten çabuk katılaşır ve dar kesitleri doldurmaz. Metal aşırı ısıtılmışsa, yolluk sistemindeki ve kalıp boşluğundaki kum, çok pürüzlü çıkar. Özenle kalıp doldurma sıcaklığının belirlenmesi gerekir. Ancak iyi bir döküm yapmak için sadece döküm ısısının iyi tespit edilmesi, yolluk sisteminin ve besleyici uzunluklarının doğru hesaplanması yeterli gelmez. Katılaşma esnasında oluşan sıcak çatlamlar, kalıcı gerilmeler veya talaş işleme sırasında distorsiyonlar benzeri sorunlarla da karşılaşılabılır (Kaya, 2019).

Metal akıcılığı, ergime sıcaklıklarının üzerindeki sıcaklıklarda artmakla beraber, sıcaklığın fazla artışı da birden fazla negatif etkiler oluşturur. Eklenen alaşım elementleri değişik tepkimelerde sıvıdan uzaklaşması, tane büyümesi, kalıpların bozulması benzer değişiklikler olur. Bunlar için uygun bir sıcaklık belirlenir. Ergime sıcaklıklarından 100-150°C daha fazla olacak sıcaklıklarda döküm yapılır. Bileşimlerin viskoziteye etkisi ise değişik olacaktır. Örnek verirken dökme demirlerde CE'yi artıran elementlerin eklenmesi viskoziteyi pozitif yönde etkiler (Aslandoğan, 2009).

Akışkanlık, sıvılaştırılmış metallerin erimeden önce hangi mesafelere akabileceğini belirleme de kullanılır. Akışkanlık alaşımların dökülmesi için önemli bir parametredir. Lamel grafitli dökme demirin ve KGDD'in akışkanlığı, dökme demirin ergimiş halde ki döküm kapasitesine ve dolumunu göstermektedir. Kapsamlı olarak akışkanlık; ergimiş metalin kalıp geçitlerinden dökülerek, kalıbın tamamını doldurabilmesidir. Akıcılık; yoğunluk ve viskozite gibi sıvının sadece kendisinin bir özelliği değil, ancak döküm kalıbının içerisindeki belirli şartlardaki karışık hareketidir. Bu, esasen alaşımın özellikleri, dökümün koşulları, döküm yapısı ve döküm işlemi özellikleri vb. ile ilgilidir. Dökme demirler test edilirken ve karşılaştırılırken aynı koşullarda yapılmalıdır. U şeklindeki numune, , çubuk şekilli numune, küresel örnek ve spiral numune olmak üzere dökme demirin akışkanlığını belirlemek için birkaç metot kullanılır. Bunlar dökümün malzemelerine göre; kum kalıp, metal kalıp ile spiral numunedir. İmalat şartlarına en

yakın olanı, spiral numune yöntemidir. Çok kullanılır, rahatlıkla kullanılabilir ve ölçülen değer açıktır (Aslandoğan, 2009; Kaya, 2019).

-Akıcılığı etkileyen faktörler

Dökümün akışkanlığını etkileyen birçok parametre vardır. Bu özellikler; kalıntı içeriği, yüzey oksit filminin karakteri, yüzey gerilimi, viskozite, aşırı ısınma, özel alaşımın katılacağı şekil, özgül ağırlık, ergime noktası ve bileşimdir.

***Viskozite**

Akış özelliklerini belirlenmesi ergimiş bir metalin sıcaklık, fiziksel özelliğinin, katıksızların varlığı, akıcılık katsayısı, inklüzyonlar ve eriyiğin bileşmesinden etkilenir. Viskozite ile sıvı metalin akışkanlığı ters orantılıdır.

***Yüzey gerilimi**

Kalıp-Metal ara yüzüne tesir eden yüzey gerilmesi, eriyik metalin kalıbın yüzeyindeki ıslatma özelliklerine etki eder. Metalin kalıbı ıslatılmazsa, kalıp kanalları uzunluğunca akışırken dahada kesirli kuvvet yaşayacak ve bu sebepten metal parçanın viskozitesini azaltacaktır.

***Aşırı ısınma**

Ergitilmiş metal eriyik sıcaklığının üzerine kadar ısıtıldığı sıcaklıktır. Isı artışı, metalin viskozitesini değişik yönlerde etkilemektedir. Isı artışı ile viskozite azalır ve dolayısıyla akışkanlık yükselir. Isıtma daha da artarsa sıvı ömrü de artar. Buda, metalin daha fazla zamanda akmasıdır.

***Katılma mekanizması**

Katıksız metaller ve katılma aralığı alaşımı, ergitilmiş metalin viskozitesini değiştirmeden bir tabaka biçiminde katılaştırır. Diğer taraftan enli katılma mesafesine sahip alaşımlar, belirli kıvama kadar katılaşmakta bu durum da sıvının akmasını önlemektedir.

***Oksit film ve metalik olmayan içeriğin oluşumu.**

Pas oluşması, yüzeyde gerilmelerini etkiler ve eriyik metalin kalıp erime özelliğini azaltır. Bundan dolayı akışkanlık azalmış olur. Aynı biçimde akma esnasında sıvılaştırıcı içine uzatılan ametal bir kaplamanın oluşumu akarken eriyik metalin üstüne akar ve bu şekil de akışkanlığı azalmış olur.

***Özgül ağırlık**

Ergimiş metalin özgül ağırlığı fazlaysa, uygulanacak metalostatik basınç da o kadar artacaktır. Bu da kalıbın içerisini dolduran eriyik metalin akışkanlığını ve hızını yükseltir.

****Ergime noktası (veya alaşım katılaşma sıcaklığı).***

Metallerin ergime sıcaklıkları yükseldikçe kalıp ile metal arasında da aşırı ısı değişimi olur ve buda birim zamana düşecek ısıyı yükseltir. Bu da metalin akması ve sıvı kalması için gerekli olan zamanı kısar ve bundan dolayı metal akışkanlığı düşer.

Benzer şekilde, alaşımın katılaşma sıcaklığı artması akışkanlığı da azaltacaktır (Aslandoğan, 2009; Kaya, 2019).

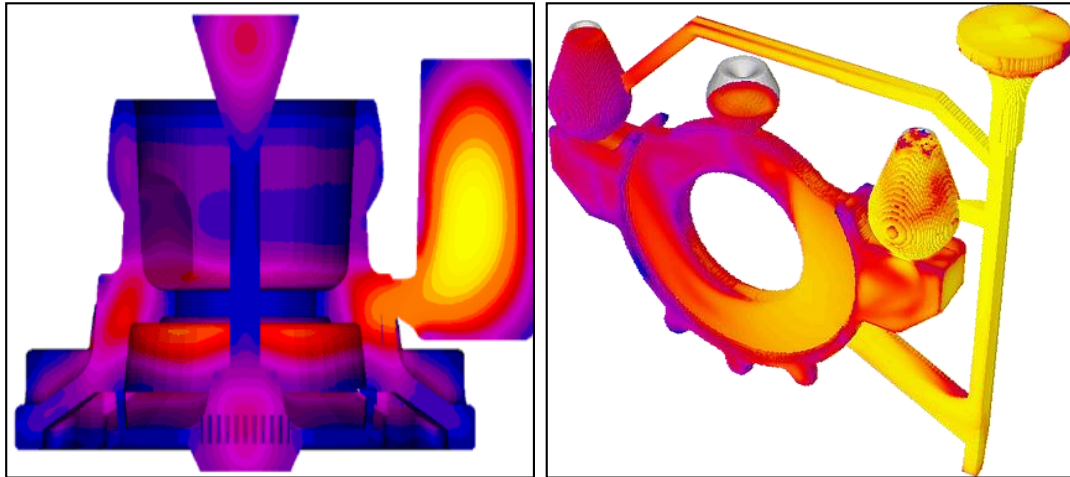
2.8. Döküm Simülasyonları

Döküm simülasyonu, döküm yanlışlarını düşündürmek ve bu sorunları tasarım aşamasında fiilen döküm yapmadan çözmek için 1990'ların başından beri dökümhanelerde kullanılan bir tekniktir. Türkiye’de simülasyon teknolojilerinden yararlanan dökümhanelerin sayıları son senelerde hızlıca yükselmeye başladı (Nergiz ve Kayıkcı, 2010).

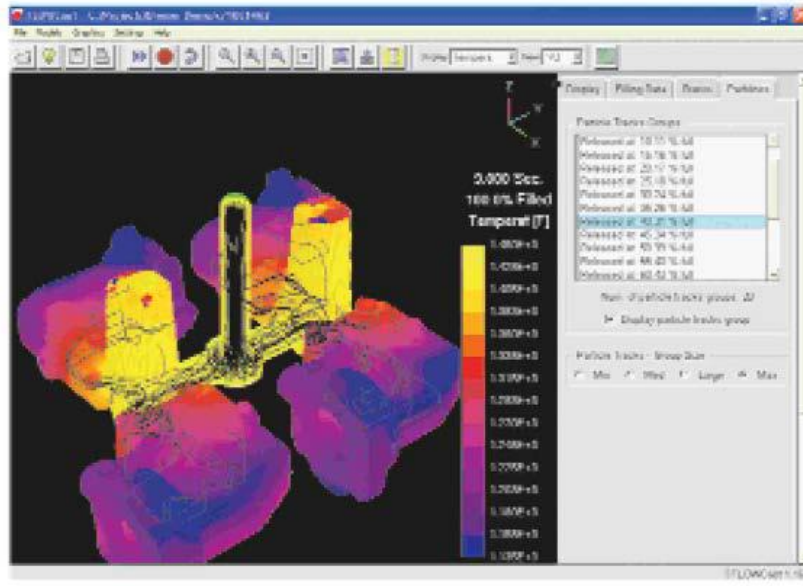
Simülasyon süreçleri tipik olarak kalıp doldurma, gerilim analizi, deformasyon, tane yapısı, katılaştırma ve diğer süreçleri içerir. Bir dökümhane simülasyon programının tasarım örneği gösterilmektedir (Şekil 10).

Bir döküm simülasyon programı yardımıyla, 3 boyutlu katı modelinde gerekli sayıda ve boyutta besleyici ve bunların yerleştirileceği belirleyerek besleyici yolluk tasarımı bilgisayarda yapılır. Tasarlanan parça simüle edilerek döküm, katılaşma, büzülme gibi birçok sonuç bilgisayarda görülür (Şekil 11).

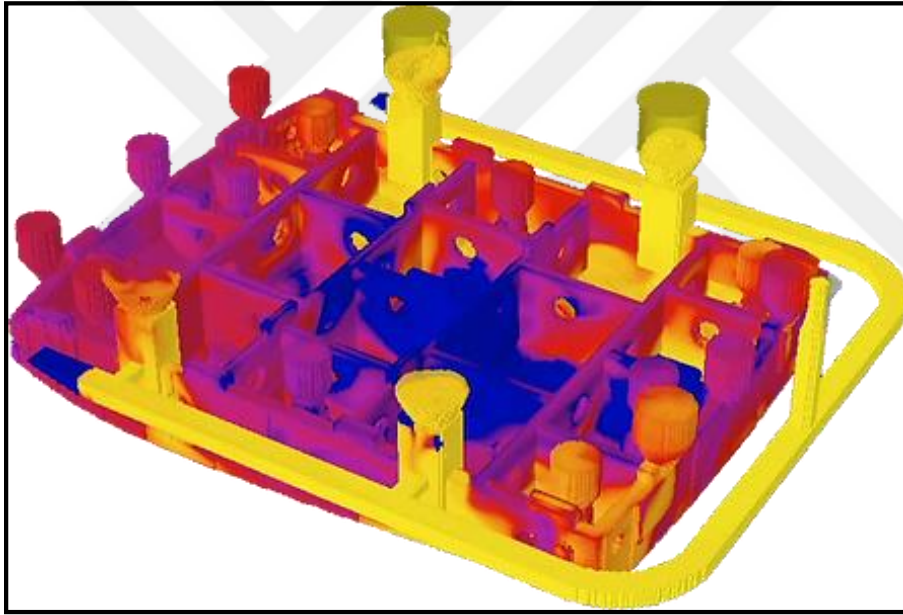
Tüm bunlar çok kısa sürede yapılabilmekte ve en önemlisi tasarım sırasında hepsini görme imkânı sağlamaktadır. Bu nedenlerden dolayı özellikle kusursuz parça imalat etmek amacıyla dökümhanelerin simülasyon programlarına olan talep her gün biraz daha artmaktadır (Şirin ve Çolak, 2010).



Şekil 10. Döküm simülasyonları için tasarım modelleri

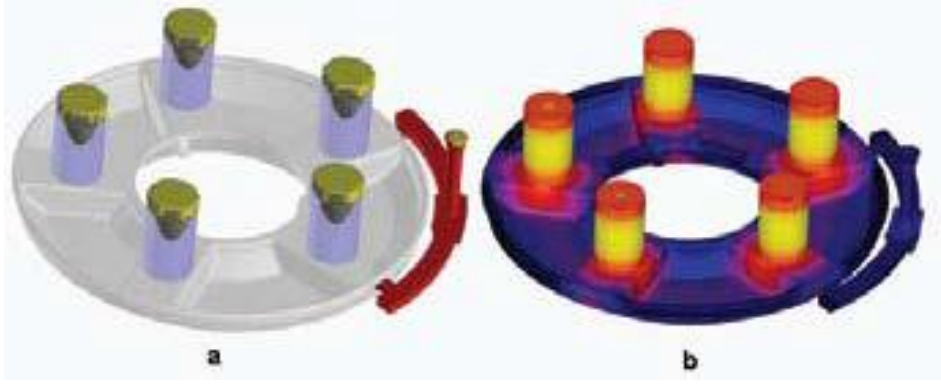


Şekil 11. Flowcast programı kullanılarak kalıba doldurulan sıvı metal görüntüsü (Şirin ve Çolak, 2009).



Şekil 12. Bir simülasyon programıyla parçaların çözümü (Çolak ve Kayıkcı, 2009).

Parçaların besleyicisiz ve yolluksuz olarak simülasyonları yapılır. Burada amaç parçadaki çekinti alanlarını tahmin etmek ve uygun yolluk ve besleyici tasarımı yapmaktır (Şekil 13).



Şekil 13. Bir simülasyon programı kullanılarak bir dökümde büzülme meydana gelecek alanların temsili (Çolak ve Şirin, 2010).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu tezin kapsamında gerçekleştirilen uygulamalı çalışmalar; tasarım, modelleme, döküm deneyleri, mikro yapı inceleme çalışmaları başlıkları altında anlatılacaktır. Tez kapsamında, Gri grafitli dökme demirde alaşımın akışkanlık özellikleri, farklı döküm sıcaklıkları, farklı kesit kalınlıkları ve değişken döküm parametrelerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Bunun için kum kalıba dökülerek hazırlanan kum kalıbı içeren özel tasarlanmış parçanın döküm sıcaklığı, metalurjik kalitesi, farklı malzeme, farklı kalınlıkları, akış özelliklerini etkilediği ve belirli bir kesit kalınlığında değişken döküm koşulları altında sıvı metal ilerleme uzunlukları incelenmiştir. Değişken döküm koşullarında kum kalıplarda yapılan dökümlerde, kesit kalınlıklarına bağımlı olarak sıvı metal ilerleme uzunluğu belirlenir ve FlowCast Döküm simülasyon yazılımı ile karşılaştırılır. Bu nedenle, araştırma çerçevesinde tanımlanan malzemelerde sıvı metalin akışkanlığı ve ilerleme uzunluğu belirlenir. Ayrıca değiştirilen parametreler, FlowCast döküm simülasyon yazılımı ile yapılan çalışmalarla gerçek yapılmış dökümlerle karşılaştırılır. Tüm parametrelerle yapılan dökümlerden elde edilen çeşitli kalınlıklardaki dökümlerden elde edilen numunelerin mikro yapısal analizi ile sonuçlar değerlendirilmiştir.

3. 1. Deney Parametreleri

Tez araştırmasının bir parçası olarak, değişen döküm koşulları altında gri dökme demir alaşımlarının akışkanlık özelliklerini incelemek meselesiydi. Bu sebeple, farklı döküm koşullarında özellikle tasarlanmış, değişik kesit kalınlıklarını kapsayan akışkan testi modeli kullanılmıştır. Akış özellikleri üzerindeki etki, hazırlanmış bir kum kalıba dökülerek incelenmiştir. Bunun için uygulama parametreleri dolum hızı, dökümün sıcaklığı, aşılama özelliklerine bağlı kalınarak dökümün simülasyon yazılımındaki tanımlamaların metalurjik kalite farkı, kesit kalınlığı olarak tanımlanmıştır. Uygulama parametreleri belirlenirken, elde bulunan bilgilerden yararlanılarak akış özellikleri üzerinde en büyük etkiye sahip olan ve dökümhanenin üretim sürecine müdahale etmesine uygun parametreler seçilir. Tablo 6, alaşımın akışkanlığını belirlemek için tezin bir parçası olarak gerçekleştirilen test parametrelerini ve döküm koşullarını gösterir.

Tablo 6. Deney parametreleri

Malzeme	Lamel Grafitli Dökme Demir											
Döküm Sıcaklığı (°C)	1350				1420				1500			
Metalürji Kalitesi (%)	20		80		20		80		20		80	
Kesit Kalınlığı (mm)	2	4	6	10	2	4	6	10	2	4	6	10
Dolum Hızı (sn)	5		10		5		10		5		10	

Tabloda görüldüğü gibi lamel grafitli dökme demir malzeme, 3 farklı sıcaklık, 2 farklı metalürji kalitesi seviyesi, 4 kesit kalınlığı ve 2 farklı dolum hızında toplam 12 adet döküm gerçekleştirilecek ve 48 adet sıvı metal ilerleme ölçümü yapılarak döküm kanalı elde edilecektir.

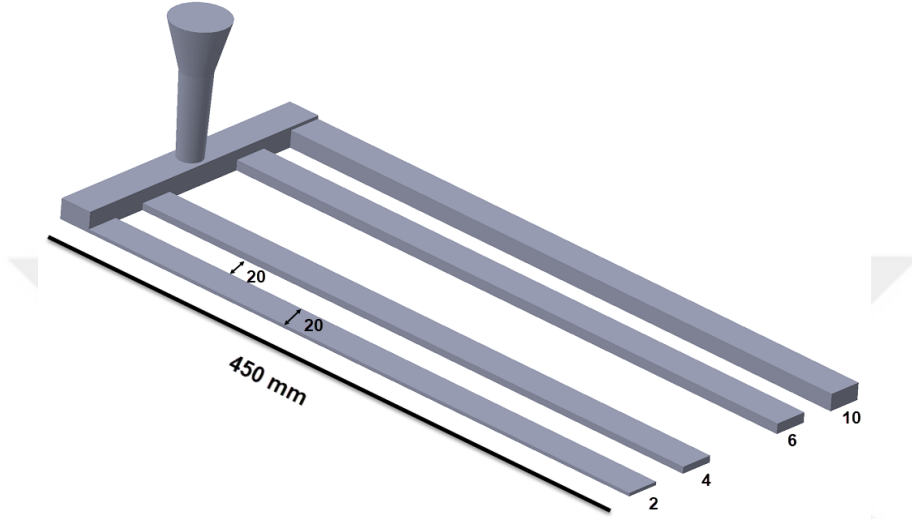
Tablo 7. Deney şartları

D.No	Malzeme	Döküm sıcaklığı (°C)	Metalürji kalitesi (%)	Dolum hızı (sn)
1	LGDD	1350	20	5
2	LGDD	1350	20	10
3	LGDD	1350	80	5
4	LGDD	1350	80	10
5	LGDD	1425	20	5
6	LGDD	1425	20	10
7	LGDD	1425	80	5
8	LGDD	1425	80	10
9	LGDD	1500	20	5
10	LGDD	1500	20	10
11	LGDD	1500	80	5
12	LGDD	1500	80	10

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, Lamel grafitli dökme demir malzemelerde değişen şartlarda sıvı metal ilerleme mesafelerini tespit edecektir. Tablo 7’de deney kapsamında yapılması planlanan deney şartları örnek tablosu verilmiştir.

3.2. Akıcılık Modeli Tasarımı ve Model Plakası İmalatı

Değişen döküm şartlarında sıvı metalin ilerlemesinin tespit edilmesi amacıyla model tasarımı gerçekleştirilmiştir. Model tasarımında farklı kesit kalınlıklarında 450 mm uzunluğunda kanallar kullanılmıştır. Burada amaç değişen şartlarda sıvı metalin akıcılığının nasıl değiştiğinin sayısal olarak tespit edilmesidir. Şekil 13’de tasarımı gerçekleştirilen modelin katı model görüntüsü ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 14. Akıcılık testi model görüntüsü ve ölçüleri

Şekil 14’te verilen tasarımda kanal uzunluğu değişen döküm şartlarında sıvı metal yürümesinin tam gerçekleşmemesi için bilinçli bir şekilde 450 mm olarak uzun tutulmuştur. Kanal boyunun kısa olması durumunda sıvı metal kalıbı tam olarak doldurup karşılaştırma da anlamsız sonuçlar çıkabileceği için bu şekilde tasarım yapılmıştır. Kesit kalınlıkları farkı da sıvı metalin hangi şartlarda hangi kalınlıkta döküm yapılabildiğini göstermesi açısından 2 mm ile 10 mm arasında tercih edilmiştir. 10 mm üstünde zaten akıcılıktan kaynaklanan bir problem olmayacağı düşünüldüğünden üst limit olarak belirlenmiştir.

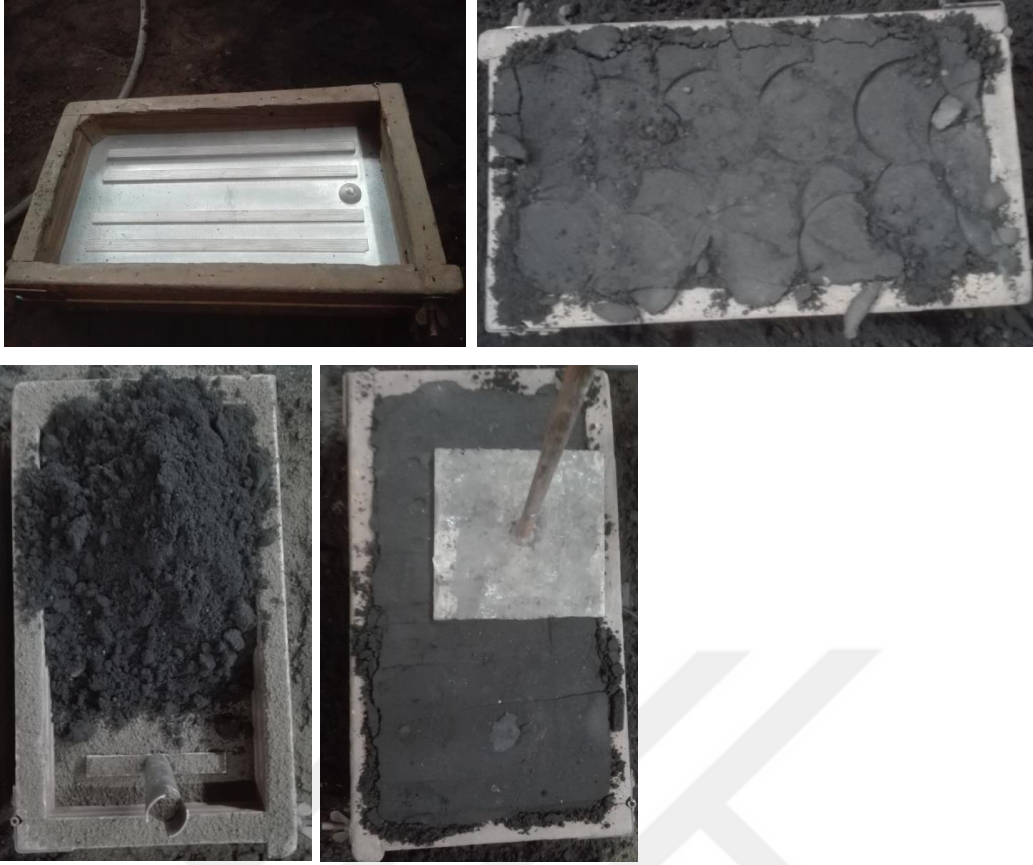
Model tasarımına uygun olarak belirlenen ölçülerde model plakası hazırlanmıştır. Şekil 15’te imalatı gerçekleştirilen model plakasına ait görseller verilmiştir. Model plakası imalatında koniklik, çıkma açıları ve merkezleme pimleri de dikkate alınarak imalat gerçekleştirilmiştir.



Şekil 15.Akıcılık testi plak model görüntüsü

3.3. Kum Kalıpların Hazırlanması

Tez kapsamında kalıplama alfa set reçine kumu kullanılarak yapılmıştır. Alfa reçine kumu hazırlanır iken 100 kilogram kuma 1.5 kilogram reçine ve 1 kilogram sertleştirici eklenmiştir. Alfa set reçine kumu, gerekli ilave ve kum karıştırıcıda karıştırılarak elde edilir. Kalıbı hazırlamak için döküm içerisindeki kumun modele yapışmasının önüne geçmek ve kalıptan ayırmak için grafit serpildi. Daha sonra hazırlanan kalıbın kumu yavaş yavaş dereceye dökülür ve tokaç ile sıkıştırılır. Derece tümü kumla doldurulduğunda, kum düz bir tokaçla sıkıştırılır ve fazla kum düzgünce düzeltilir. Kalıbın hazırlanmasından sonra kumdaki sertleştiriciye göre kalıbın hava ile gürleştirilerek sertliği sağlanır ve kalıplar hazırlanır. Alfa set reçine kum döküm işleminin örnek bir görüntüsü Şekil 16'da gösterilmektedir.



Şekil 16. Akıcılık testi plak model görüntüsü

Şekil 16’da verildiği gibi döküme hazır hale gelen kalıplar aralarına kum ile tamponlar yapıp ve sıvı metal basıncını karşılamak için ağırlıklar ile desteklenmiştir. Sonrasında Tablo 7’de uygun deney şartlarında belirtildiği gibi dökümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 17’de döküm sonrası kalıp görüntüsü verilmiştir.



Şekil 17. Akıcılık testi plak model görüntüsü

3.4. Alaşımların Ergitme İşlemleri

Ergitme Konya'da ticari bir dökümhanede yapılmıştır. Ergitme işlemi için şirket, 500 kg ergitme kapasiteli bir indüksiyon ocağı kullanmıştır. Eritme işleminden sonra, sıvı metal, kepçe tipi bir pota içinde küreselleştirme ve aşılama işlemi yapılmıştır. Ocaklarda hazırlanan sıvı metale aşılama işlemi uygulanır. Döküm için hazır olan sıvı metal, hazırlanmış kum kalıba dökülür. Şirketin spektrometre ekipmanı, dökümden sonra üretilen numunelerin kimyasal bileşimini belirlemek için kullanılır. Alaşımın kimyasal bileşimi Tablo 8'de verilmiştir.

Tablo 8. Alaşımın içerisindeki elementler

Malzeme	Alaşımın Elementi (%)								
	Mg	Sn	Cu	Cr	S	P	Mn	Si	C
LGDD	0.031	0.050	0.024	0.025	0.020	0.032	0.27	2.53	3.31

Tablo 8’de verilen kimyasal bileşim değerleri incelendiğinde döküm alaşımının karbon eşdeğerliği CE 4.0 olacak şekilde GG25 için istenilen standarda uygun olduğu anlaşılmaktadır.

3.5. Dökümlerin İncelenmesi

Döküm sonrası kalıplar açılmış, döküm numunelerin kumları temizlenmiştir. Döküm numuneler temizleme sonrası önce makro olarak gözle kontrol edilmiştir. Şekil 18’de kalıptan çıkarılmış döküm numuneleri ile ilgili örnek resimler verilmiştir.



Şekil 18. Kalıptan çıkarılan örnek döküm resimleri

Makro kontrollerde kalıplamadan kaynaklı, bazı kanallar kalıbın tam kapanmamasından, kum kopmaları, çapaklar birleşmesinden sıvı metal yürümesi gibi hatalar ile karşılaşılmıştır. Bu gibi dökümlerden elde edilen sonuçları değerlendirme dışı tutularak, ilgili şartlarda tekrar kalıplar hazırlanarak deneyler 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 19’da görüldüğü gibi tüm kanallardaki sıvı metal ilerleme mesafeleri tespit edilmiştir.



Şekil 19. Döküm kesit kanallarındaki sıvı metal ilerleme mesafesinin ölçümünün gösterilmesi

3.6. Mikro yapı İncelemeleri

Tablo 7’de verilen değişen döküm koşulları ve kesit kalınlığının içyapıya olan etkisinin incelenmesi için mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Mikro yapının incelemeleri için tüm döküm numunelerin yatay yolluk ile kanal birleşim bölgesinden tüm numunelerin aynı bölgelerinden numuneler alınmıştır. Şekil 20’de numune alınan bölgeler şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 20. Mikro yapı numunesi alınan bölgelerin gösterilmesi

Mikro yapı inceleme için numune alındıktan sonraki aşama olarak kalıplama işlemine geçilmiştir. Kalıplama soğuk bakalite alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece aynı andan birden fazla numune hazırlanması sağlanarak işlem kolaylığı gerçekleştirilmiştir. Sonrasında kaba zımparalama, ince zımparalama ve parlatma işlemleri ile numune hazırlamaya devam edilmiştir. Zımparalama için numuneler sırasıyla 60-180-400-800-1200-2500 gritlik zımpara hazırlanmıştır. Parlatma işleminde ise parlatma çuhalarında elmas pasta ile parlatılmıştır. Metalografik olarak hazırlanmış yüzeylerin mikroskobik incelemesi, Nikon Eclipse L 150 A ışık mikroskobuyla buna bağlanmış Clemex dijital kamerayla alınmış görüntülerin üzerinde Clemex Vision Lite imaj çözümleme programı kullanarak gerçekleştirilir.

3.7. Modelleme Çalışmaları

SolidCast döküm simülasyon programı ile entegre aktif bir akıcılık modelleme yazılımı olan FlowCast programı, döküm modelinin oluşturulmasında kullanılmaktadır. Deneylerde uygulanan parametreler modelleme yazılımında programa sayısal olarak girilmiştir. Dökümler simülasyon ortamında sayısal olarak tam ölçüsünde modellenmesini sağlamak, simülasyon kullanmanın başlıca amacı olup, başarılı ve sorunsuz sonuçlara ulaşılmasında en önemli faktördür. Bu nedenle gerçek dökümde oluşan kalıp dolum problemi simülasyon programında CLF olarak ayarlanan kritik sıvı yüzdesi değerinin döküm değişkenlerine göre ayarlanabilmektedir.

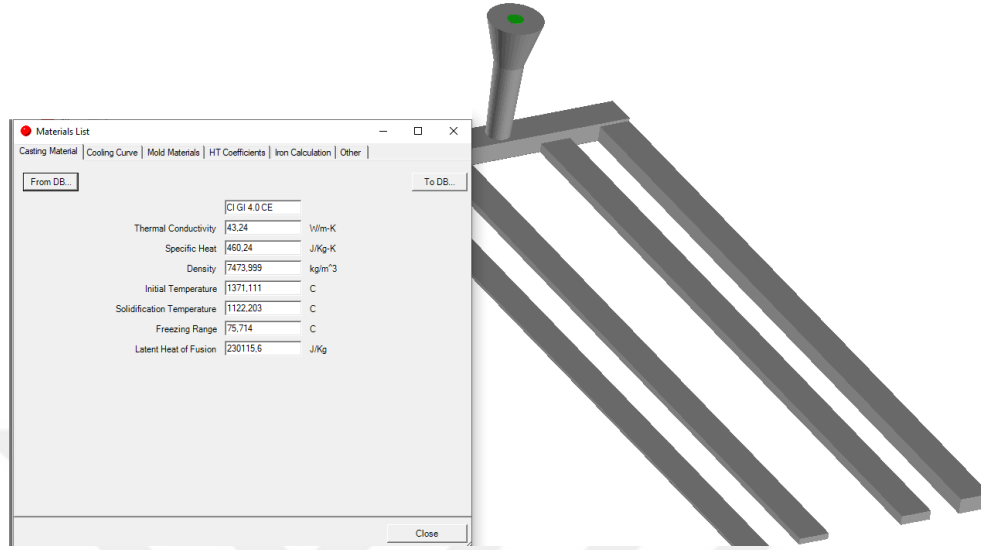
Modelleme çalışmalarında katı modeller ilk olarak SolidWorks'ün 3B bilgisayar tasarım programı kullanılarak oluşturulmuştur. Model döküm geometrisi SolidWorks programında katı modelleme olarak oluşturulur, ardından STL formatına dönüştürülür ve döküm simülasyon programlarına aktarılır. Daha sonra döküm alaşım ve kalıp malzemesinin çeşidi termal ve fiziksel özellikler belirlenmiştir. Tablo 9 simülasyon veri tabanındaki CIGI 4.0 CE alaşımının termo fiziksel özellikleri verilmiştir.

Tablo 9. Alaşımın simülasyon veri tabanında kullanılan termofiziksel özellikleri

Malzeme	Isıl iletkenlik (W/m.K)	Özgül ısı (J/kg.K)	Yoğunluk kg/m ³	Döküm Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Sıcaklığı (°C)	Katılaşma Aralığı (°C)	Ergime Gizli Isısı J/kg.
CIGI 4.0 CE	43.24	460.24	7473.99	1350-1500	1122.203	75.714	230115.6

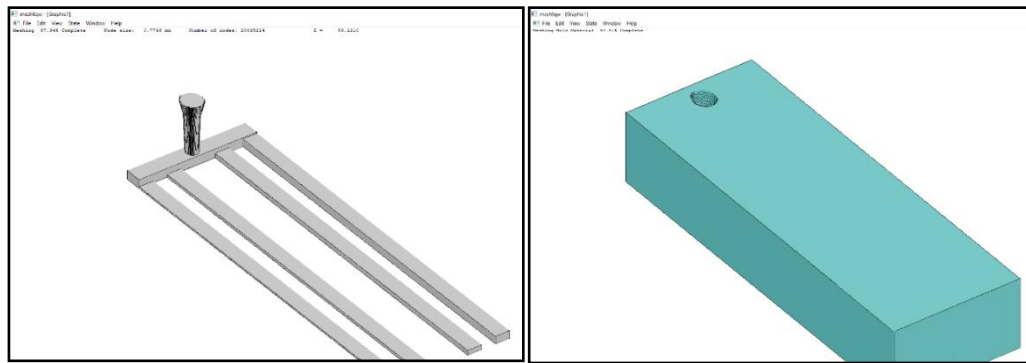
Birçok alaşımın termofiziksel özellikleri standart olarak simülasyon veri tabanına yüklenir. İlgili alaşım için program veritabanından indirilebilir. Alternatif olarak istenirse standart dışı isteğe bağlı malzeme değerleri manuel olarak değiştirilerek girilebilir. Diğer

tarafından döküm alaşımı soğuma eğrileri, yüzde olarak hacimsel çekme oranı CFS değerleri gibi değişkenler önemli ölçüde değiştirilebilir. Şekil 21, parçayı programa yükleme ve malzeme tanımlama adımı göstermektedir.



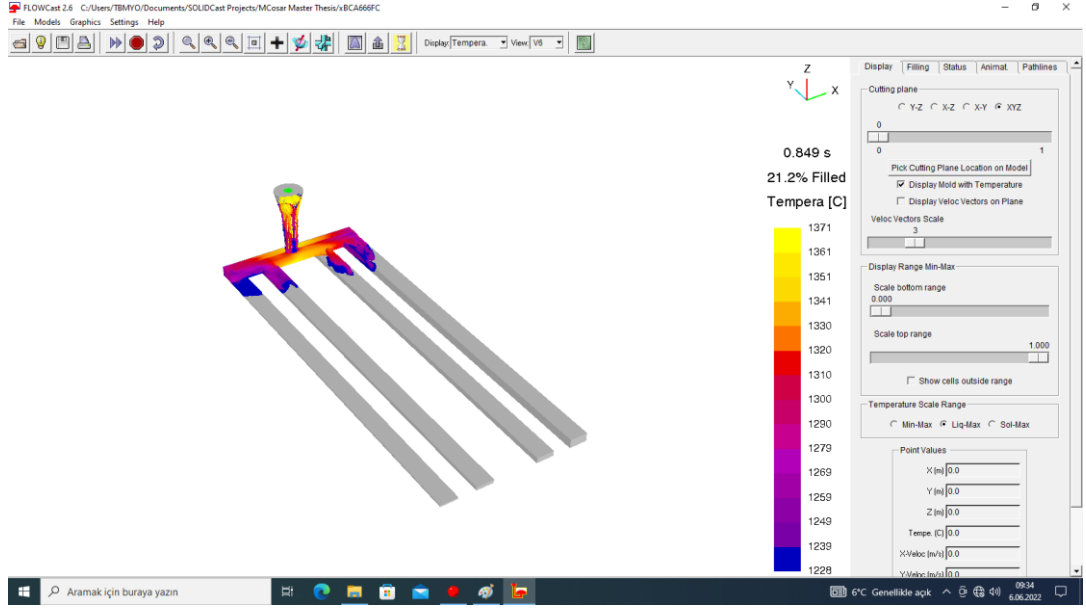
Şekil 21. Akıcılık modelinin SolidCast programına yüklenmesi, malzeme tanımlanması

Her bir mesh elemanı için malzeme özellikleri tanımlanmış, programa aktarılan katı modeli geometrisi meshlenmiş ve girilen sınır koşulları simülasyon programında çözümlenmiştir. Şekil 22’de meş işleminde örnek görüntüler verilmiştir. Meş işlemi yapılırken modelin en ince kesitli yerinden en az 3 adet kübik meş olacak şekilde 20 000 000 adet meş yapılmıştır.



Şekil 22. SolidCast programı ile modelin meş edilmesi

SolidCast simülasyon programının kalıp doldurma işleminde başka bir yazılım olan FlowCast modülü kullanılmaktadır. Kalıp boşluğuna sıvı metal enjekte edilirken türbülans, dolum, soğuk montaj, basınç vb. FlowCast'ın akışkanlar dinamik kriterlerine göre hesaplanır. (Şekil 23), bir simülasyon programında kalıp doldurmayı göstermektedir.



Şekil 23. FlowCast programı ile kalıbın doldurulması esnasından bir görüntü

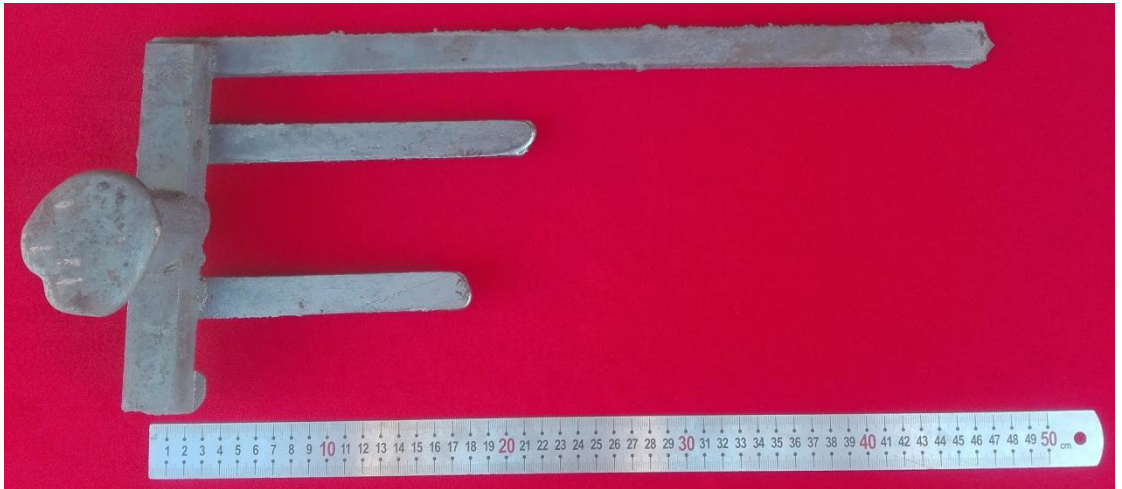
Bu model çalışmaları gerçek döküm ve dolum süresine göre yapılmıştır. Ayrıca değişen döküm koşullarının etkisini belirlemek için modellemede farklı değerlerde CLF değerleri alınmış ve gerçek döküm ile eşleştirme yapılmıştır. Ayrıca modelleme programında sıvı metallerin ilerleme uzunlukları ölçülür ve gerçek döküm ile karşılaştırılır.

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Bu bölümde tezin kapsamında yapılan modelleme çalışmaları, döküm deneyleri ve deney numunelerinden toplanan veriler sunulacak ve sonuçların karşılaştırılması sağlanacaktır. Deneysel sonuçlarda deney parametrelerine uygun olarak yapılan döküm sonuçları, sıvı metal ilerleme mesafeleri, kesit kalınlığına bağlı sıvı metal ilerleme mesafe değişimi, değişen parametrelerde mikro yapı sonuçları verilecektir. Ayrıca bu modelleme neticeleri değerlendirilerek gerçek döküm neticeleriyle karşılaştırılacak ve modelleme programı için CLF değerleri değerlendirilecektir.

4.1. Döküm Deneyleri Sonuçları

Tez çalışmaları kapsamında Deneysel Çalışmalar bölümünde detayları verildiği gibi deney parametrelerine uygun olarak dökümler yapılmış ve değişen döküm şartlarına bağlı olarak yapılan deneylerden elde edilen numuneler incelenmiştir. Döküm numuneler ilk olarak katılaştıktan sonrası kalıptan çıkarılmış ve gözle makro olarak kontrol edilmiştir. Döküm numunelerde çapak kanalların birleşmesi gibi deney şartlarının değişimine sebep olacağı düşünülmeyen bir problem olmadığı gözlemlendikten sonra incelemelere geçilmiştir. Akıcılık özelliklerinin kontrolü açısından kesit kalınlıklarının ilerleme mesafesi ölçümü gerçekleştirilmiştir. Şekil 24'te 1350 °C' de metalürji kalitesi %20 ve dolum hızı 5 s deney şartlarında ve Şekil 25'te aynı şartlar altında dolum hızı 10 saniyede gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 24.1350 °C sıcaklık, %20 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm

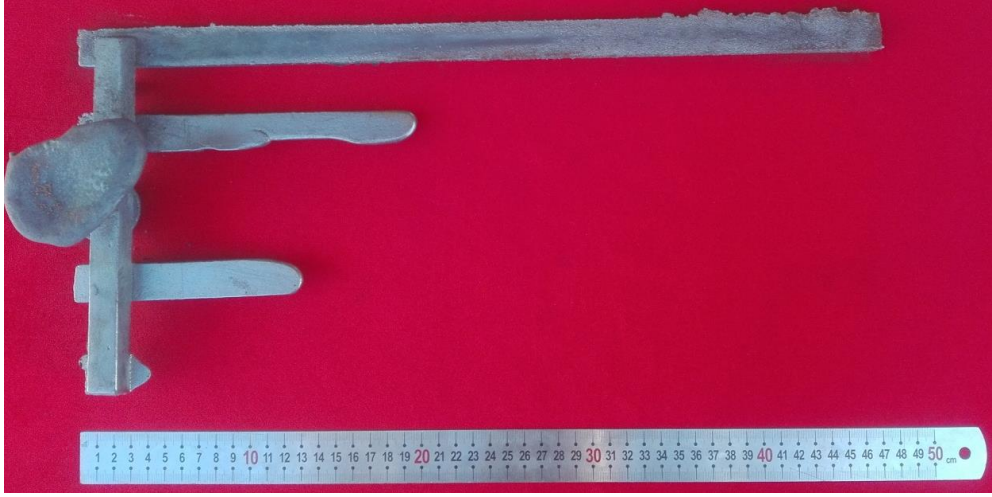


Şekil 25.1350 °C sıcaklık, %20 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm

Şekil 24 ve Şekil 25’de verilen görüntüler incelendiğinde her iki şartlarda da sıvı metalin 10 mm kesit kalınlığına sahip kanalda tam olarak ilerlediği, ancak 2, 4 ve 6 mm kanallarda tam olarak ilerleyemediği görülmektedir. Dolum hızının sıvı metal ilerlemesine etkisi karşılaştırıldığında 10 s dolum hızına sahip döküm deneyinde 4 ve 6 mm kanallardaki ilerleme mesafesinin 5 s de doldurulan kalıba nazaran daha az olduğu tespit edilmiştir. 2 mm kanalda ise 10 s dolum hızında neredeyse hiç ilerleme gözlenmezken 5 s dolum hızında çok az bir ilerleme tespit edilmiştir. Bu durumun yavaş dolum şartlarında sıvı metalin kalıp ile teması esnasında sıcaklığını yitirmesi ve sıvının akıcılığını daha kısa mesafelerde kaybetmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 26’da 1350 °C’ de metalürji kalitesi 80 ve dolum hızı 5 s deney şartlarında ve Şekil 27’de aynı şartlar altında dolum hızı 10 s de gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 26. 1350 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm

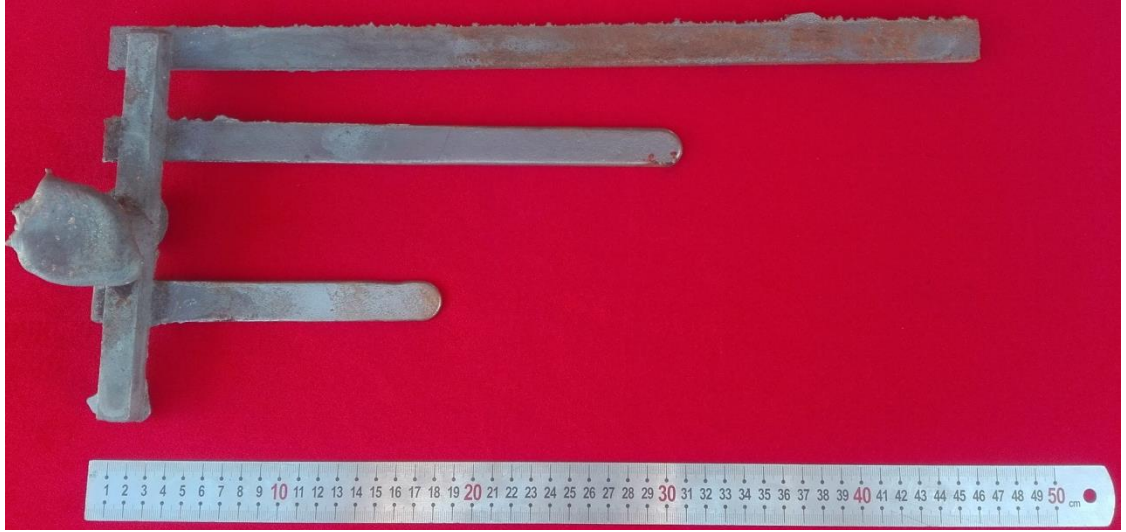


Şekil 27.1350 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm

Şekil 26 ve Şekil 27’de verilen görüntülerde 10 mm kesit kalınlığına sahip kanalda sıvı metalin tam olarak ilerlediği görülmektedir. Şekil 26’de verilen 5 s de dolum gerçekleştirilen dökümde 6 mm kanal tam olarak dolarken Şekil 27’de verilen dökümde dolum hızına bağlı olarak 6 mm kanalı tam olarak dolmadığı anlaşılmaktadır. Her iki dökümde de 2mm ve 4 mm kanallarda tam dolumu gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Dolum hızının etkisi karşılaştırıldığında yine metalürji kalitesi %20 olarak belirlenen dökümde olduğu gibi yavaş dolumda ilerleme mesafesi daha az tespit edilmiştir. Metalürji kalitesinin sıvı metal ilerleme mesafeleri Şekil 26, Şekil 27 ile Şekil 24 ve 25 arasındaki döküm görüntüleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Yapılan incelemelerde metalürji kalitesinin artmasının sıvı metal ilerleme mesafesine olumlu etki ettiği ve kalıpta tam olarak dolmayan kanallarda daha fazla ilerleme olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 28’de 1425 °C’ de metalürji kalitesi 80 ve dolum hızı 5 s deney şartlarında ve Şekil 29’de aynı şartlar altında dolum hızı 10 s de gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 28. 1425 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm



Şekil 29. 1425 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm

Şekil 28 ve Şekil 29’de verilen görüntülerde 4, 6 ve 10 mm kesit kalınlığına sahip kanallarda sıvı metalin tam olarak ilerlediği, ancak 2 mm kanalda tam dolumu gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Dolum hızının etkisi karşılaştırıldığında yine metalürji kalitesi %20 ve %80 olarak belirlenen dökümlerde olduğu gibi 5 s olarak belirlenen nispeten hızlı dolum şartlarında ilerleme mesafesi daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Metalürji kalitesinin sıvı metal ilerleme mesafelerine etkisi karşılaştırıldığında en fazla ilerleme miktarının %80 metalürji kalitesine sahip olan döküm şartlarında olduğu gözlenmiş ve metalürji kalitesinin de akıcılık üzerinde olumlu etkisi olduğu gözlenmiştir. Şekil 30’da 1500 °C’ de metalürji kalitesi 80 ve dolum hızı 5 s deney şartlarında Şekil 31’de aynı deney şartlarında dolum hızı 10 s de gerçekleştirilen döküm görüntüleri verilmiştir.



Şekil 30. 1500 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 5 s dolum hızı şartlarındaki döküm



Şekil 31. 1500 °C sıcaklık, %80 metalürji kalitesi, 10 s dolum hızı şartlarındaki döküm

Şekil 30 ve Şekil 31’de verilen görüntülerde 4, 6 ve 10 mm kesit kalınlığına sahip kanallarda sıvı metalin tam olarak ilerlediği, ancak 2 mm kanalda tam dolumu gerçekleşmediği anlaşılmaktadır. Metalürji kalitesi %80 ve 5 s dolum hızı şartlarında Şekil 26’da 1350 °C, Şekil 28’de 1425 °C ve Şekil 30’da 1500 °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 katılaşma için sıvının ilerlemesi için daha fazla vakit bulmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Döküm numunelerin değişen deney şartlarında sıvı metal kesit kalınlıklarındaki ilerleme mesafeleri deney numuneleri üzerinden ölçülmüştür. Farklı kesitlerde elde edilen değerler Tablo 10’da verilmiştir. Tabloda deney şartları değerleri kodlanarak verilmiştir. Kodlamalarda yazılan rakamlar sıcaklık, metalürji kalitesi ve dolum hızı şeklindedir. Örneğin 1350 °C sıcaklıkta 10 s dolum hızında metalürji kalitesi %80 olan döküm şartları için 1350-80-10 şeklinde kodlama verilmiştir. Döküm numunelerden yapılan gözle kontrol ile gerçekleştirilen makro incelemeler ve ölçümler ile sayısal olarak anlamlı bir şekilde ifade edilebilecektir.

Tablo 10. Dökümler sonucunda ölçülen sıvı metallerin ilerleme mesafesi değerleri

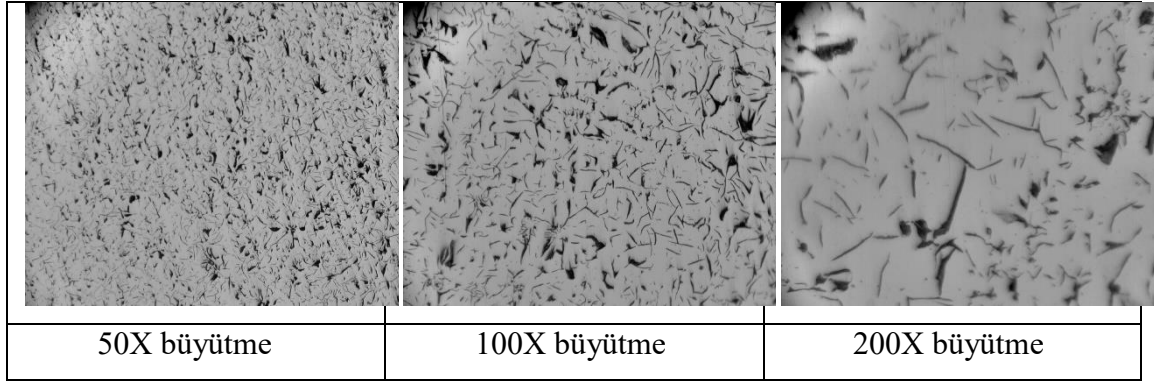
D.No	Deney Şartları	Kesit Kalınlığına Bağlı Sıvı İlerleme Mesafesi (mm)			
		2 mm	4 mm	6 mm	10 mm
1	1350 – 20 – 5	17	142	339	450
2	1350 – 20 – 10	12	110	295	450
3	1350 – 80 – 5	26	182	450	450
4	1350 – 80 – 10	23	114	417	450
5	1425 – 20 – 5	28	425	450	450
6	1425 – 20 – 10	21	416	450	450
7	1425 – 80 – 5	35	450	450	450
8	1425 – 80 – 10	32	450	450	450
9	1500 – 20 – 5	134	450	450	450
10	1500 – 20 – 10	121	450	450	450
11	1500 – 80 – 5	170	450	450	450
12	1500 – 80 – 10	154	450	450	450

Tablo 10’ da 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 dolum hızı olduğu anlaşılmaktadır. Sıvı metal kalıba daha hızlı doldurulduğunda kalıp içerisinde sıvı metalin daha uzun süre katılaşmadan ilerleyebildiği gözlenmiştir. Dökümhanelerin üretim prosesleri, kullanılan aşılایıcı, 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. Mikro yapının İncelemeleri ve Değerlendirilmesi

Mikro yapı çalışmaları için, her bir deneyin koşulu için aynı bölgeden kesit kalınlığının başlangıç noktasından numuneler alınmıştır. Örnekleme alanları ve yapılacak işlemleri deneysel çalışmalar bölümünde açıklanmıştır. Tüm döküm koşullarındaki numunelerin ve farklı kesitlerden alınan numunelerin mikro yapının incelemesi 200X, 100X ve 50X büyütmelemlerde yapıldı.

Farklı büyütmelemlerde mikro yapının gösteriminin örneklenmesi açısından Şekil 31’de mikro yapı resimleri verilmiştir. İlgili mikro yapı resimleri 1425 °C döküm sıcaklığında, %20 metalürji kalitesinde ve 10 s dolum hızı şartlarındaki 6 numaralı deney 4 mm kesit kalınlığındaki numuneye aittir.

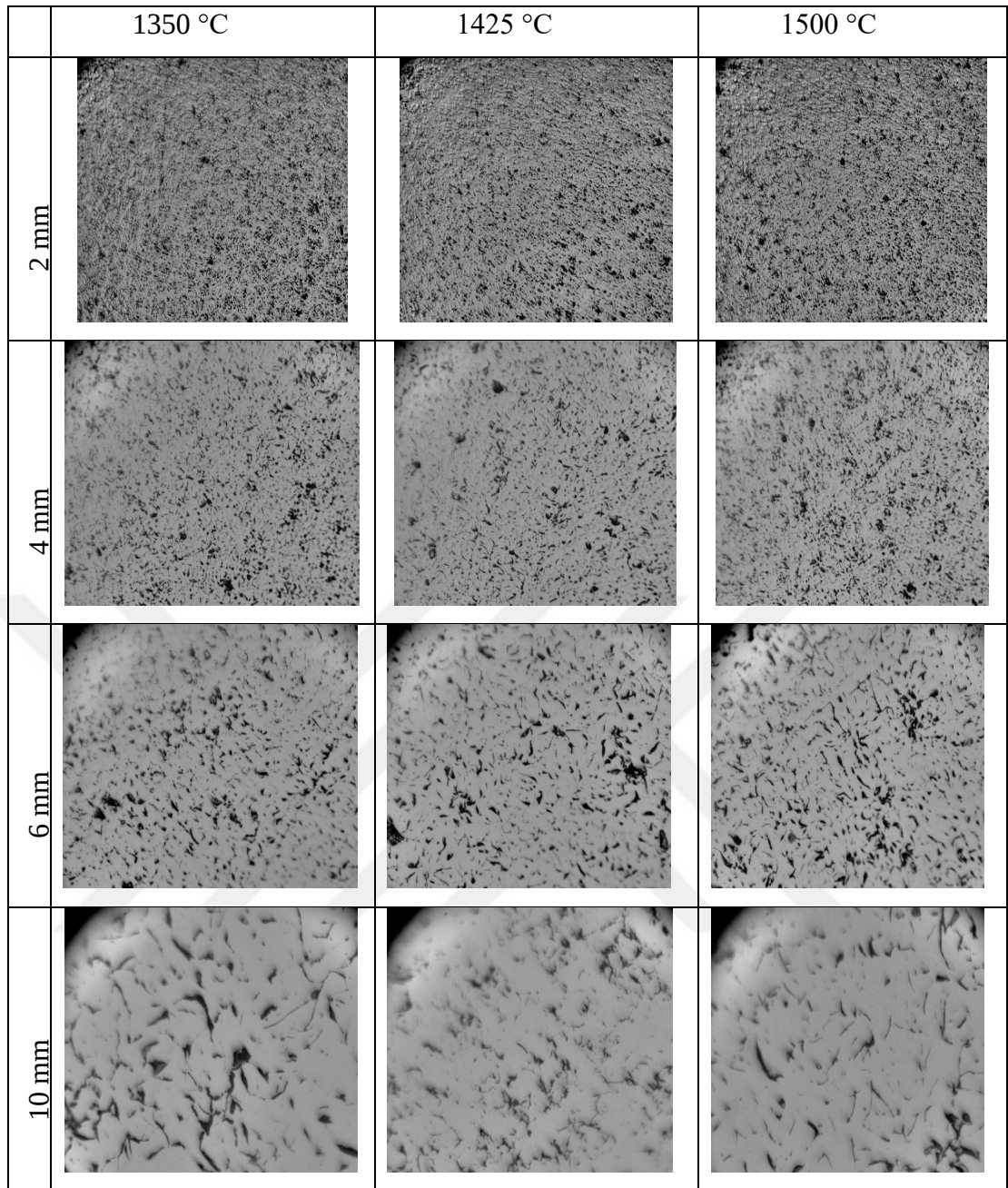


Şekil 32. Farklı büyütmelerde 4 mm kesit kalınlığındaki mikro yapı resimleri

Şekil 32’de verilen mikro yapı resimlerinde görüldüğü gibi numune lameller şeklinde oluşmuştur. Döküm deneylerinden elde edilen numunelerden farklı büyütme seviyelerinde yapıdaki detayların büyütme oranının artması ile birlikte daha da netleştiği anlaşılmaktadır. Ancak yapılan incelemelerde tez kapsamında çok fazla sonuç verilerek kafa karışıklığının önlenmesi açısından 100X büyütmenin yeterli detaya sahip olduğu ve daha geniş bir alanı inceleme fırsatı verdiği düşünüldüğünden bundan sonra karşılaştırma resimleri 100X büyütmede verilecektir. Mikro yapı resimleri inceleme aşamasında deney parametreleri bağlı olarak detaylı bir şekilde alt başlıklar altında incelenecektir. Deney parametreleri incelendiğinde sıvı metal döküm sıcaklığı, metalürji kalitesi, dolum hızı parametrelerinin mikro yapı üzerinde değişen kesit kalınlıklarındaki etkileri değerlendirilmiştir.

4.2.1. Döküm Sıcaklığına Bağlı Mikro yapı Değişiminin İncelenmesi

Tezin kapsamında deney parametrelerine bağlı olarak 12 deney gerçekleştirilmiştir. Döküm sıcaklığının mikro yapı üzerinde etkisini incelemek için diğer parametreler sabit tutularak sıcaklık değişkenine bağlı numune mikro yapıları incelenecektir. Şekil 33’te %80 metalürji kalitesi ve 10 s dolum hızı şartlarında 1350 °C sıcaklığında dökülen 4 numaralı deney, 1425°C sıcaklığında dökülen 8 numaralı deney ve 1500 °C sıcaklığında dökülen 12 numaralı deney numunelerinden elde edilen 100X büyütmede çekilen farklı kesitlerdeki mikro yapı resimleri verilmiştir.

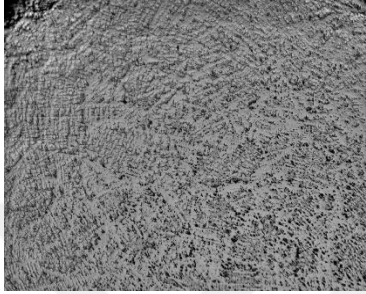
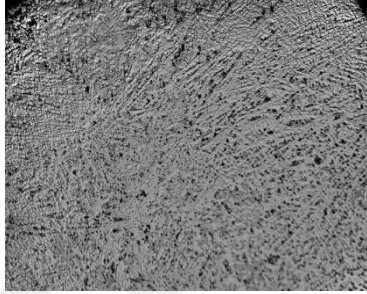
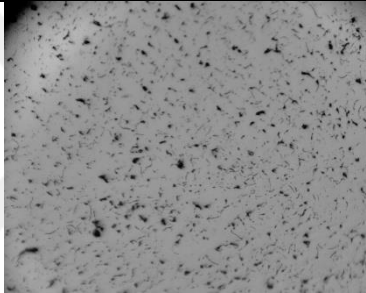
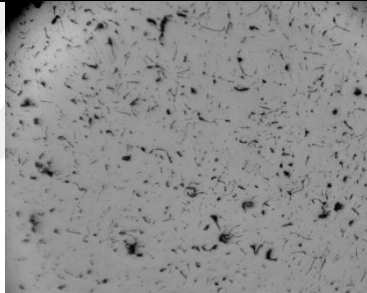
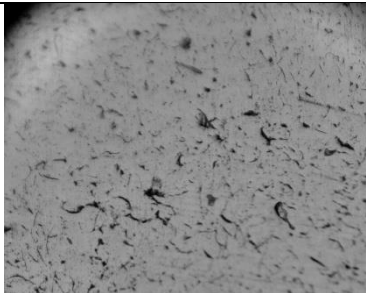
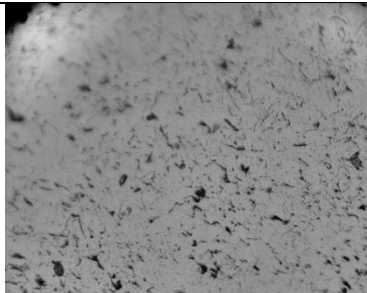
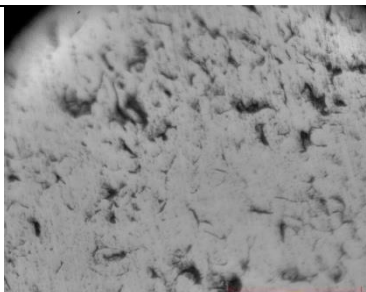
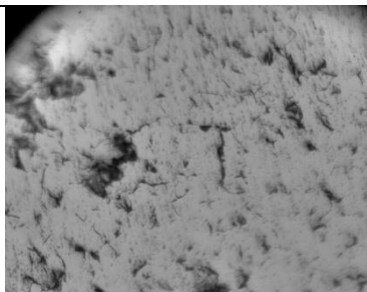


Şekil 33.Farklı döküm sıcaklıklarındaki mikro yapı resimleri (100X büyütme)

Şekil 33’de verilen mikro yapı resimleri incelendiğinde ilk olarak kesit kalınlığının artması ile birlikte ortaya çıkan yapıda grafit lamellerinin kalınlaştığı ve daha uzun lameller şeklinde ortaya çıktığı dikkat çekmektedir. Ayrıca döküm sıcaklığının artmasının yapıda sıcaklık kadar bariz farklar ortaya çıkarmadığı kesit kalınlık değişiminin yapı değişiminde daha etkili olduğu gözlenmiştir. Mikro yapı resimlerinde dikkat çeken bir diğer husus da artan kesit kalınlığı ile birlikte grafit lamellerinin tipinde bozulmalar başlamıştır. Grafitlerde artan kesit kalınlıklarında ortalama kalınlıklar arasındaki değişimde ince kesitlere nazaran daha fazla olduğu tespit edilmektedir.

4.2.2. Metalürji Kalitesine Bağlı Mikro yapı Değişiminin İncelenmesi

Metalürji kalitesinin mikro yapı üzerinde etkisini incelenmesi için 1425 °C döküm sıcaklığında, 5 s dolum süresinde gerçekleştirilen %20 metalürji kalitesi şartlarındaki 5 numaralı deney, %80 metalürji kalitesindeki 7 numaralı deney numunelerinden elde edilen 100X büyütmede çekilen farklı kesitlerdeki mikro yapı resimleri Şekil 34’de verilmiştir.

	%20	%80
2 mm		
4 mm		
6 mm		
10 mm		

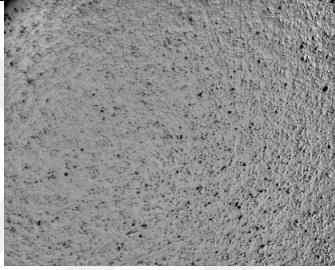
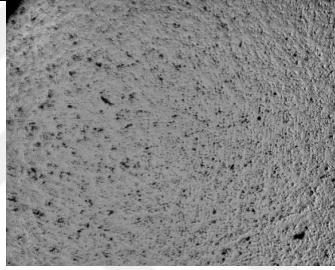
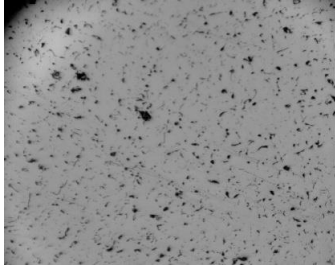
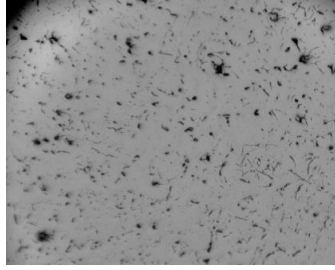
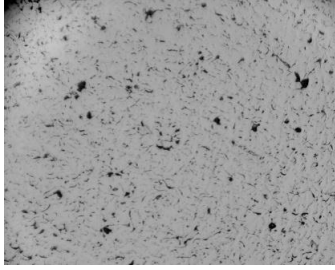
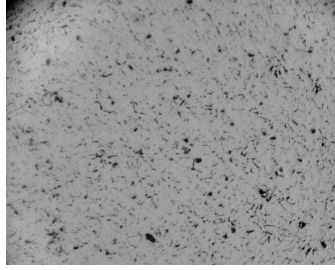
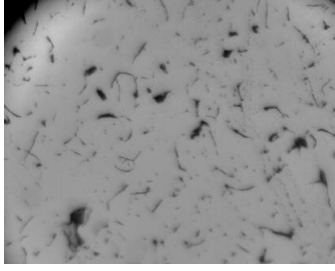
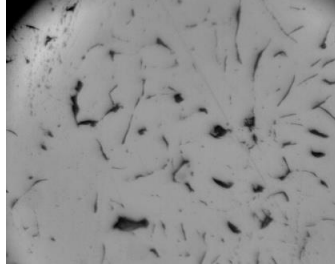
Şekil 34. Farklı metalürji kalitesi şartlarında mikro yapı resimleri (100X büyütme)

Şekil 34’te verilen mikro yapı resimleri incelendiğinde ilk olarak kesit kalınlığının artması ile birlikte ortaya çıkan yapının Şekil 33’te verilen resimler de olduğu gibi değiştiği anlaşılmaktadır. Metalürji kalitesi değişiminin yapıda grafit lamellerini

yapısında etkili olduğu gözlenmektedir. Metalürji kalitesinin artması ile birlikte grafitlerin daha düzgün boy ve kalınlığa sahip olduğu ve en iyi yapının tüm kesitler için %80 metalürji kalitesi şartlarında gerçekleştiği anlaşılmaktadır.

4.2.3. Sıvı Metal Kalıba Dolum Hızının Mikro yapı Üzerine Etkisinin İncelenmesi

Sıvı metal dolum hızının mikro yapı üzerinde etkisini incelenmesi için 1500 °C döküm sıcaklığı, %20 metalürji kalitesi şartlarındaki 5 s dolum ile gerçekleştirilen 9 numaralı deney ve 10 s dolum süresinde gerçekleştirilen 10 numaralı deney numunelerinden elde edilen 100X büyütmede çekilen farklı kesitlerdeki mikro yapı resimleri Şekil 35'te verilmiştir.

	5 s	10 s
2 mm		
4 mm		
6 mm		
10 mm		

Şekil 35. Sıvı metal kalıba farklı dolum sürelerinde mikro yapı resimleri (100X büyütme)

Şekil 35’te verilen mikro yapı resimleri incelendiğinde dolum hızının bariz bir etkisinin olmadığı düşünülmektedir. Mikro yapı üzerinde en bariz etkili parametrenin kesit kalınlığı değişimi ve metalürji faktörü olduğu anlaşılmıştır. Elde edilen sonuçlarda dolum hızı sistematik bir etki ortaya çıkarmadığı düşünülmektedir.



5. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

Modelleme çalışmaları Finite Solutions Inc. Yazılım olan SolidCast döküm katılaştırma modülüne entegre olarak çalışan Flow Cast programında gerçekleştirilmiştir. FlowCast döküm simülasyon akıcılık modelleme programıdır. Çalışmada modelleme sonuçlarının daha tutarlı sonuçlar elde edilmesi için gerçek dökümhane ortamında gerçekleştirilen döküm şartları programa sayısal veriler olarak girilmiştir. Gerçek döküm koşullarında fiziksel olarak yapılmış dökümlerin simülasyon ortamında sayısal değerler olarak bire bir modellenmesini sağlamak için simülasyonların kullanımında iyi sonuçlar elde etmek çok önemlidir. Bu nedenle, gerçek dökümde erimiş metal yürümemesi kusurlarının gözlemlenebilir. Bu amaçla simülasyon programında CLF (kritik akışkan fraksiyonu) olarak tanımlanan kritik sıvı oranı değeri farklı seviyelerde modellemeler yapılır ve dökümün şartlarına bağlı alınarak farklı CLF değerler eşleştirilmeye çalışılmıştır. Modelleme programında, alaşımı olaraktan program veri tabanından gri grafitli dökme demirin alaşımı olan CI GI 4.0 CE malzemesi seçilmiştir. Gerçek hareketli döküm koşullarına uygun olarak modelleme çalışmaları yapılmaya çalışılmıştır. Akıcılığın modellenmesinde dolum süresi parametresi 5 saniye ve 10 saniye olarak tanımlanmıştır. Döküm süresi, gerçek dökümden kalıp doldurma oranına bağlı olarak değişen döküm koşullarına göre 3 ila 4 saniye ile 6 ila 9 saniye arasında olduğu tespiti yapılmıştır.

Ayrıca değişen döküm koşullarının metalurjik kaliteye etkisini belirlemek için modelleme programında CLF (kritik sıvı fraksiyon) değerleri farklı değerlerde alınarak gerçek dökümle eşleştirme yapılması çalışılmıştır.

%20 metalurji kalitesi için %20 CLF ve %80 metalurji kalitesi için %80 CLF değeri modelleme programında kullanılmıştır. Döküm sıcaklığı olarak deney parametrelerine uygun olarak 1350 °C, 1425 °C ve 1500 °C sıcaklıkları modelleme programında ayarlanmıştır. Tablo 11’de modelleme programından değişen döküm şartlarına uygun olarak modellemeye bağlı elde edilen dolum süreleri ve dolum yüzde değerleri verilmiştir.

Tablo 11. Değişen modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçlar

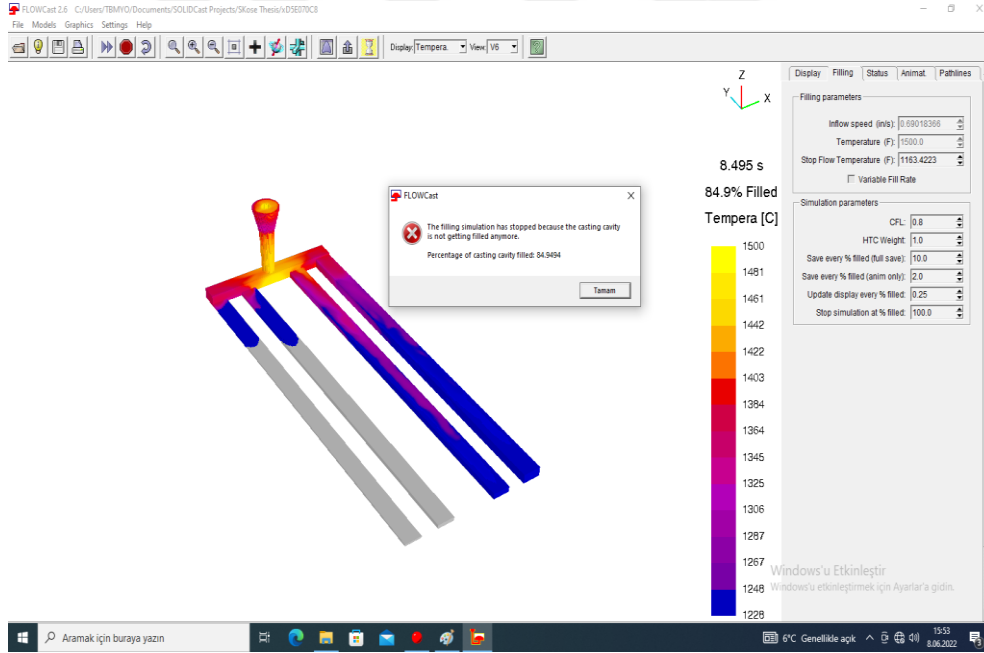
D.No	Deney Şartları	Döküm Sıcaklığı (°C)	CLF değeri %	Gerçek Dolum Süresi (s)	Modellemeden alınan Dolum Süresi (s)	Dolum Yüzdesi %
1	1350 – 20 – 5	1350	20	5	3.405	69.0
2	1350 – 20 – 10	1350	20	10	6.423	64.2
3	1350 – 80 – 5	1350	80	5	3.601	72.0
4	1350 – 80 – 10	1350	80	10	7.040	70.4
5	1425 – 20 – 5	1425	20	5	4.403	88.0
6	1425 – 20 – 10	1425	20	10	7.375	73.7
7	1425 – 80 – 5	1425	80	5	4.395	87.9
8	1425 – 80 – 10	1425	80	10	7.199	72.0
9	1500 – 20 – 5	1500	20	5	4.614	92.2
10	1500 – 20 – 10	1500	20	10	8.484	84.8
11	1500 – 80 – 5	1500	80	5	4.618	92.3
12	1500 – 80 – 10	1500	80	10	8.662	86.6

Tablo 11’de değişen döküm şartlarına göre sıvı metalin akıcılığını yitirerek katılaştığı değerler mevcuttur. Tabloda kalıp dolum için hedeflenen süreye bağlı hızda dolum için hangi süre ve hangi % dolum miktarında sıvı metalin sonlandığı verilmiştir. Değerler bağlı sıvı metal ilerleme mesafeleri incelendiğinde tüm parametrelerin akıcılık özellikleri üzerinde etkisi olduğu anlaşılmaktadır. Dolum hızı sıvı metalin kalıpta katılaşmaya bağlı durma öncesi sıvının kalıbı daha fazla doldurmasını sağladığı, böylece sıvı metalin katılaşmadan kalıp içerisinde daha ileri mesafelere kadar ulaşabildiği gözlenmiştir. Diğer parametrelerin sabit tutularak sadece dolum hızı parametre değişkenine bağlı olarak yapılan modellemelerde dolum hızının akıcılıkta etkili olduğu daha hızlı dolumlarda sıvı metalin daha fazla ilerleyebildiği anlaşılmaktadır.

Diğer bir parametre ve en etkili parametre olarak döküm sıcaklığının artmasıyla birlikte akıcılık özelliklerinin olumlu yönde geliştiği ve kalıp dolum yüzdesinde tüm dökümlerde bariz bir şekilde artış olduğu tespit edilmiştir. En fazla akıcılık ve sıvı metal ilerlemesi 1500 °C sıcaklık şartlarında deneylerde elde edilmiştir.

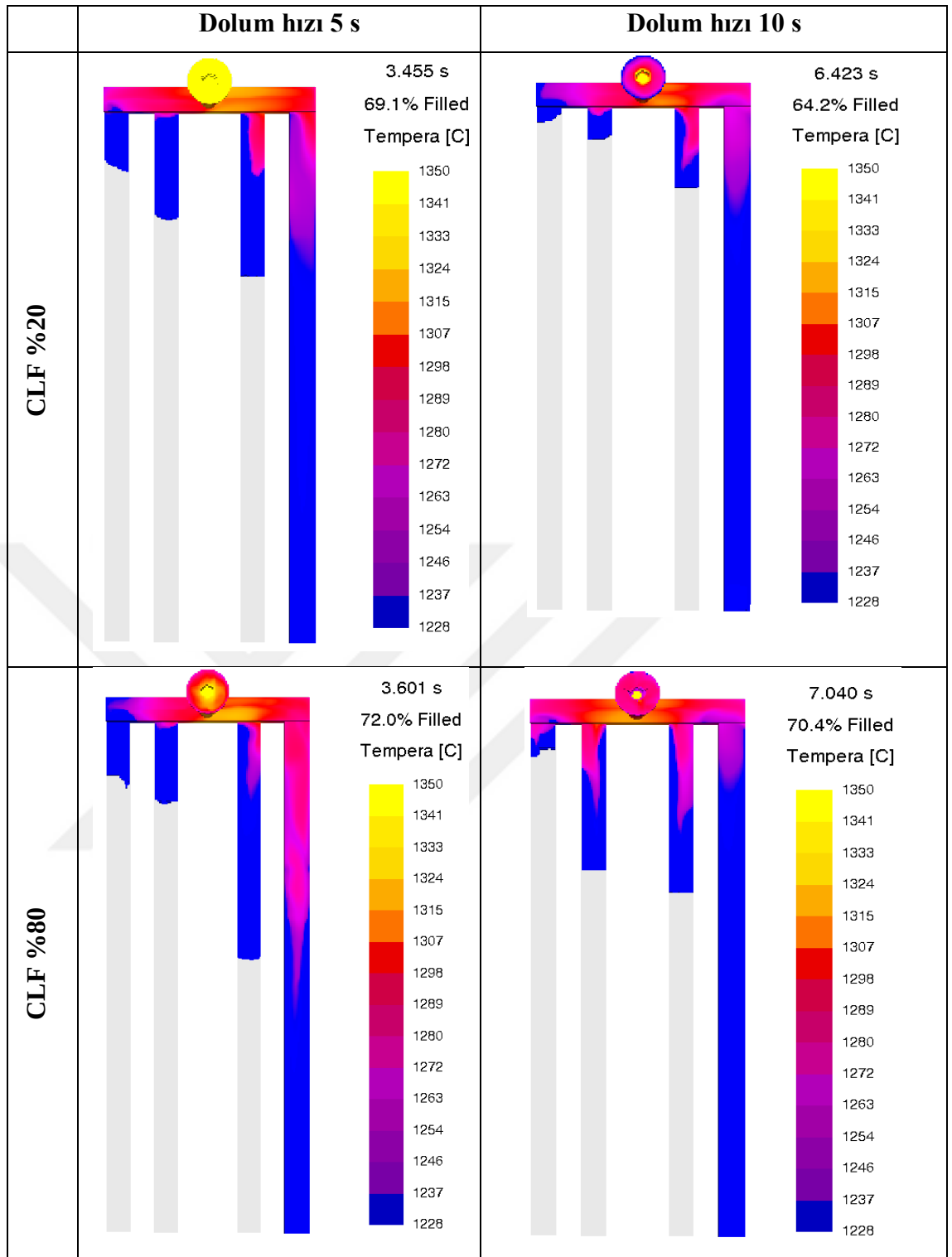
Metalürji kalitesinin artışının modelleme çalışmalarında CLF değerini değiştirerek çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Buna bağlı değişen CLF oranlarında sıvı metal ilerleme mesafesi de artarak aynı deney şartlarında metalürji kalitesi artışı ile akıcılık olumlu yönde etkilenmiştir. Ancak etkisi diğer parametreler kadar etkin değildir. Tüm parametreler değerlendirildiğinde akıcılık üzerinde en etkili faktörün döküm sıcaklığı olduğu, akabinde sıvı metal kalıba dolum hızı ve metalürji kalitesinin de etkili olduğu tespit edilmiştir.

İlgili deney modellemelerinde verilen parametrelere göre FlowCat döküm simülasyon yazılımı her bir tanede ilgili sıcaklık ve akıcılık değerinin sınır değerine ulaşması ile sonlanarak uyarı vermektedir. Şekil 36’da dolumun sonlandığı esnada FlowCast programından alınan örnek bir ekran görüntüsü verilmiştir. 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.

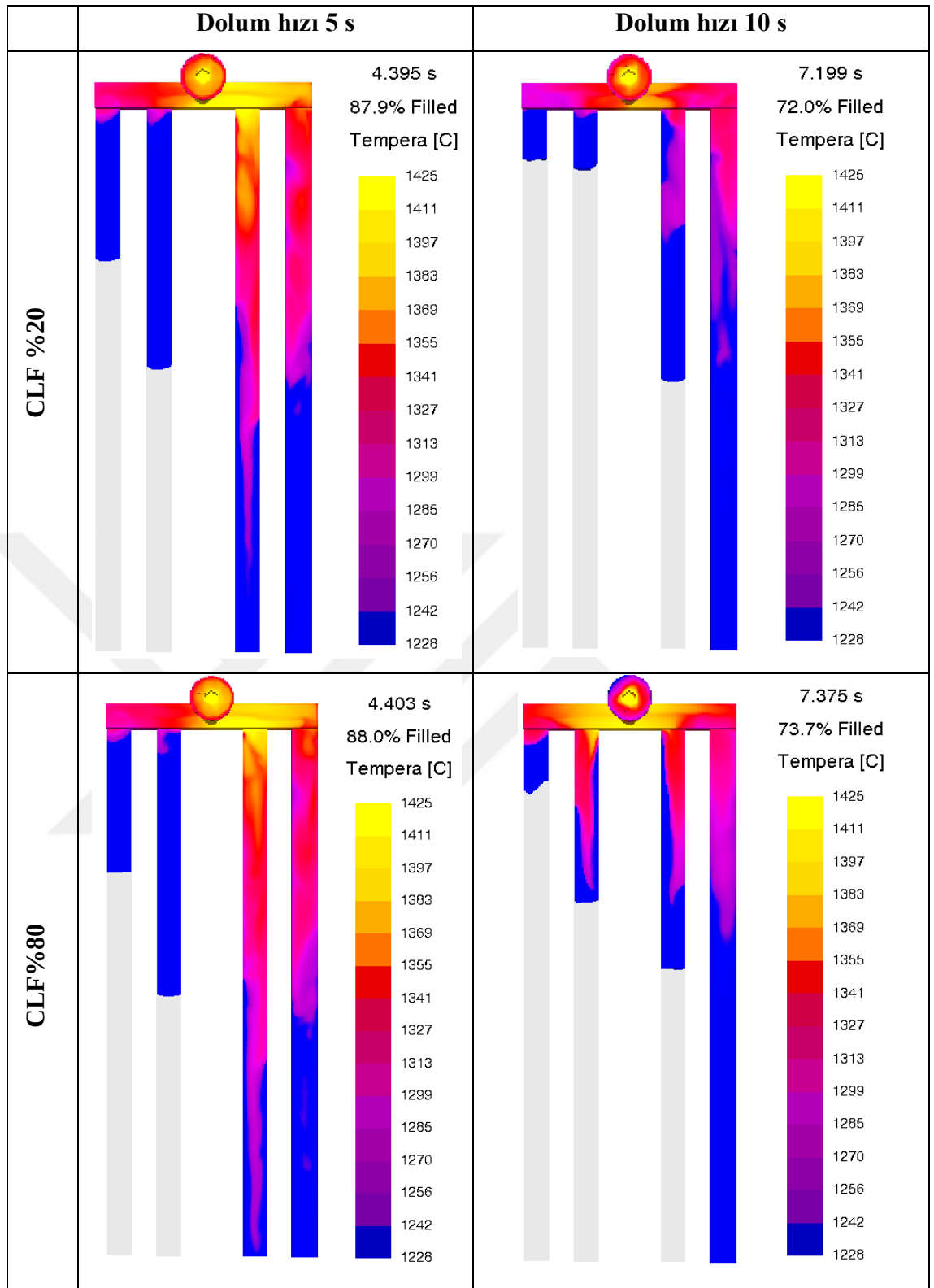


Şekil 36. FlowCast akıcılık modelleme yazılımından örnek bir ekran görüntüsü

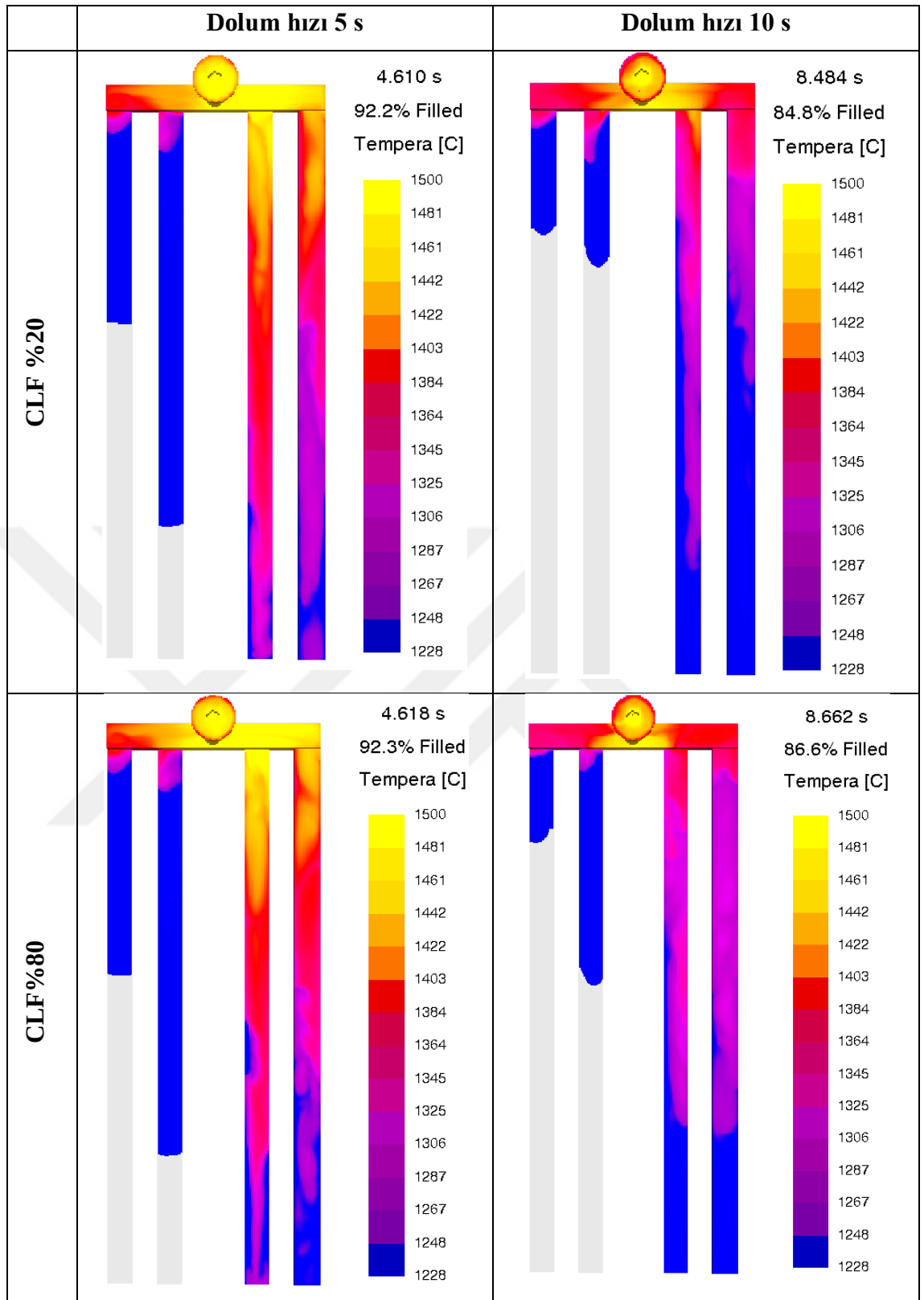
Şekil 37’de 1350 °C de, Şekil 38’de 1425 °C ve Şekil 39’da 1500 °C’de yapılan dökümlere ait CLF 20 ve CLF 80 değerlerinde 5 s ve 10 s kalıp dolum hızlarındaki modelleme sonuçları mevcuttur.



Şekil 37. 1350 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları



Şekil 38. 1425 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları



Şekil 39. 1500 °C sıcaklıkta değişen şartlarda yapılan modelleme çalışmaları sonuçları

Şekillerde verilen modelleme sonuçlarından belirlenen parametrelerde sıvı metal ilerleme mesafeleri tespit edilmiştir. Değişen kesit kalınlık ve döküm sıcaklıklarında sıvı metal ilerleme mesafelerinin değişimi modelleme sonuçlarından tespit edilmiştir. Elde edilen modelleme sonuçları incelendiğinde ilk olarak değişen şartlarda farklı değerlerde

sıvı metal ilerlemesi ve dolum % değerleri elde edildiği anlaşılmaktadır. Deney parametrelerinin etkisini ayrı ayrı ele alacak olursak; aynı alaşım için döküm sıcaklık değişimi, dolum hızına bağlı döküm süresi değişimi ve metalürji kalitesi çalışma kapsamında parametreler olarak değerlendirilecektir. İlgili parametrelerden her birinin değişen oranlarda akıcılık üzerinde etkili olduğu görülmektedir.

Döküm sıcaklığının akıcılığa etkisini değerlendirmek istersek Şekil 37, 38 ve 39 da aynı parametrelerdeki modelleme şartlarında döküm sıcaklık değişkenini ele alırsak sıcaklığın artışı ile birlikte bariz bir şekilde sıvı metal ilerleme miktarında artış tespit edilmiştir. Döküm sıcaklığının artışı ile en ince kesitli kısımda bile sıvı metal ilerlemesi artış göstermiştir.

Dolum hızı parametresi değerlendirildiğinde yine şekillerin her birinde 5 s de doluma yönelik hızda dökülen kalıpların 10 s dolum hızındaki kalıplara göre daha fazla doluluk yüzdesine sahip olduğu anlaşılmaktadır. Dolumun daha hızlı olması ile sıvı metalin ısı transferi için daha kısa süre bulmasına bağlı olarak dolum hızı sıvı metalin ilerleme mesafesine olumlu etkisi olmuştur. Ancak burada sıvı metalin kalıbı dolumu esnasında türbülans, bifilm oluşumunu etkilemeyecek şekilde yapılması da farklı hataların önüne geçilmesi adına önemlidir.

Metalürji kalitesi programda CLF olarak tanımlanan değer değiştirilmesi ile modellenmiştir. Bu kapsamda CLF değeri daha yüksek ayarlandığında sıvı metalin akıcılığın arttığı ve kalıpta daha fazla sıvı metalin ilerleme kat ettiği gözlenmiştir. 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 artları ile uyumlu olması açısından önem arz etmektedir. Modelleme çalışmalarında aşılacağı ve küreselleştirici ilavesinin CLF değerinin değiştirilerek modellenmesi ve deneme çalışmaları ile firma için ilgili değerlerin optimize edilmesi sonuçların daha doğru yorumlanması açısından gerekli olduğu düşünülmektedir.

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 birisi akıcılığa birden fazla parametrenin etki etmekte ve bu değerlerin modelleme programına rakamsal değerler olarak girilmesidir. Bu nedenle değerlerdeki gerçek döküm şartlarına

göre değerlerdeki değişimler sonuçlarda değişkenliğe neden olabilir. Ayrıca, doldurma sırasında modelleme programında tanımlanan konumla gerçek döküm sırasında yapılacak değişiklikler sıvı yönü ile kalıbın içerisinde ısının dağılmasını etki edeceğinden sonuçlar daha farklı olacağı düşünülür.

Grafit (gri) dökme demirlerin farklı kesitlerde akış özelliklerine, dolum oranı, döküm sıcaklığı ve metalurjik kalitenin etkisinin araştırıldığı yapılan çalışmada, araştırma, deneysel araştırma ve modellemeden çıkan sonuçlar;

1. Döküm sıcaklığındaki artış nedeniyle, sıvı metal malzemenin boşluğu kalıp boşluğundaki tüm boyutlarda artar. 10 mm kesit kalınlığına sahip kanallarda tamamen ilerlediği ancak 2 ve 6 mm kanallarda tam olarak ilerleyemediği görülmektedir. Doldurma hızının sıvı metal üzerindeki etkisi karşılaştırıldığında, 10 s dolum hızı ile yapılan döküm testinde ve 6 mm'lik oluklardaki besleme mesafesinin 5 s'lik kalıp doldurma aralığından daha az olduğu tespit edilmiştir.

2. Döküm işleminin tüm koşulları altında, döküm kesitinin kalınlığı arttıkça sıvı metal malzemenin ilerlemesinin arttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca mikro yapının incelenmesi sırasında döküm kalınlığı arttıkça grafit boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir.

3. Döküm işleminde, artan sıcaklıkla ergimiş metal malzemenin besleme mesafesinin arttığı ve benzer koşullarda üretilen dökümlerde, artan döküm sıcaklığı ile akışkanlığın arttığı görülmüştür.

4. Aynı döküm koşulları altında farklı sıcaklıklarda dökülen numunelerin mikro yapısı ile aynı boyutun kullanımını araştırdığımızda, yüksek sıcaklıkta dökülen parçaların mikro yapı ve kristal tane boyutunun daha yüksek gözeneklilik (boşluk) oranına sahip olduğu ortaya çıkmıştır.

5. 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.

6. Yavaş dolum şartlarında sıvı metalin kalıp ile teması esnasında sıcaklığını yitirmesi ve sıvının akıcılığını daha kısa mesafelerde kaybetmesi ilerleme mesafesini düşürmüştür.

7. Katılaşma esnasında karbür oluşumunu engellemek ve grafit yapısını güçlendirmek için aşılama miktarının artırılması ile birlikte döküm işlemi sonucunda malzemede oluşan grafit yapının istenilen seviyede olduğu gözlemlenmiş ve aşılama miktarının artmasının döküm malzemenin akıcılık özelliğini artırdığı tespit edilmiştir.

8. Yapılan incelemelerde metalürji kalitesinin artmasının sıvı metal ilerleme mesafesine olumlu etki ettiği ve kalıpta tam olarak dolmayan kanallarda çok fazla ilerleme izlenmiştir.



KAYNAKÇA

- Akça, C. (2005). *Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirde Alaşım Elementlerinin Östenit-Martenzit Dönüşümüne Etkisi. Doktora Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (180474).*
- Akkurt, M. (1985). *Takım Tezgâhları Talaş Kaldırma Yöntemleri ve Teknolojisi*, Birsen Yayınevi, 122-126, İstanbul.
- Aslandoğan, R. (2009). *Dökümde Akıcılık ve Akıcılığı Etkileyen Faktörlerin Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (244055).*
- ASM International Handbook Committee, ASM Volume 15 Casting. Ohio: ASM International., 1988.
- Choudhari, C. M., Narkhede, B. E. ve Mahajan, S. K. (2014). Casting design and simulation of cover plate using AutoCAST-X software for defect minimization with experimental validation. *Procedia Materials Science*, 6, 786-797.
- Çavuşoğlu, N. (1981). *Döküm Teknolojisi 1, İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu.*
- Çekici, M. (2022). *GGG-60 küresel grafitli dökme demirde kullanılan baryum ve lantanlı aşuların mekanik özelliklere etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (721548).*
- Çolak, M. ve Kaya, S. (2021). Investigation of the effect of inoculant and casting temperature on fluidity properties in the production of spheroidal graphite cast iron. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 74(2), 205-214.
- 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., Kayıkcı, R. ve Dispınar, D. (2015). Influence of different cross sections on fluidity characteristics of A356. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 68(2), 275-281.
- Dabade, U. A. ve Bhedasgaonkar, R. C. (2013). Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique. *Procedia Cirp*, 7, 616-621.

- Davis, J. R. (Ed.). (1996). *ASM specialty handbook: cast irons*. ASM international.
- Demir, D. (2021). *Östemper Isıl İşleminin En Gjs650 Ferritik Sfero Dökme Demirin Mekanik Özelliklerine Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (688328)*.
- 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>
- Erdoğan, M. (2000). Mühendislik alaşımlarının yapı ve özelliği, Nobel Yayın Dağıtım, Cilt 1, Ankara.
- Gouveia, R. M., Silva, F. J., Paiva, O. C., Andrade, M. F., Silva, L., Moselli, P. C. ve Papis, K. J. (2017). Study of the heat-treatments effect on high strength ductile cast iron welded joints. *Metals*, 7(9), 382.
- Han, Q. ve Xu, H. (2005). Fluidity of alloys under high pressure die casting conditions. *Scripta Materialia*, 53(1), 7-10.
- Haque, M. M. (2007). Investigation on properties and microstructures of spheroidal graphite Fe-C-2Si and Fe-C-2Al cast irons. *Journal of materials processing technology*, 191(1-3), 360-363.
- Hiratsuka, S., Hareyama, T. ve Horie, H. (2006). Numerical simulation of suction fluidity test of flake graphite cast iron. *Journal of Japan Foundry Engineering Society*, 78(12), 675-683.
- Hodbe, G. A. ve Shinde, B. R. (2018). Design and Simulation of Lm 25 sand casting for defect minimization. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4489-4497.
- Hoper, D.A. (1977). Cutting Fluids – Peton Pest, *Tribology International*, 23-27.
- Kaya, S. (2019). *Küresel grafitli dökme demir dökümünde aşıl原因 ve döküm sıcaklığının akıcılık özelliklerine etkisinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (567308)*.
- Kayıkçı, R. ve Nergiz, M. (2010). *Besleyicisiz Döküm Yöntemi ile Dökülen Bir Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümünün İncelenmesi*. 3.Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES2009), İstanbul.
- Kermanpur, A., Mahmoudi, S. ve Hajipour, A. (2008). Numerical simulation of metal flow and solidification in the multi-cavity casting moulds of automotive components. *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1-3), 62-68.

- 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>.
- Koch, M. ve Soulas, K. (2014). *Inoculation of Grey and Ductile Iron*, 7th International Ankiros Casting Congress, September 12-13, Istanbul, Turkey.
- Kumruoğlu, L. C. (2003). *Lamel grafitli ve küresel grafitli dökme demirlerde karbon eşdeğerinin mekanik özellikler ve mikroyapıya etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (136364).
- Kurt, B. (2019). *Lamel grafitli dökme demirlerde termal analiz yöntemi ile karbon eşdeğerliğinin tayini, mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (582469).
- 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>.
- 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/>.
- MEB, (2011, 27 Temmuz). *Küresel Grafitli Dökme Demir*, Metalurji Alanı. http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf.
- Mozumder, Y. H. (2015). *Influence of Intercritical Austenitizing Temperature, Quenching Media and Tempering Temperature on Mechanical Properties and Wear Behavior of Ductile Iron with Dual Matrix Structure*. (MSc Thesis), Retrieved from [http://ethesis.nitrkl.ac.in/6908/1/Yahya_Mtech\(r\)_612MM3010.pdf](http://ethesis.nitrkl.ac.in/6908/1/Yahya_Mtech(r)_612MM3010.pdf).
- 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>.
- Nimbulkar, S. L. ve Dalu, R. S. (2016). Design optimization of gating and feeding system through simulation technique for sand casting of wear plate. *Perspectives in Science*, 8, 39-42.
- Pollack, H. W. (1988). *Materials Science and Metallurgy*. 4 th ed. Prentice-Hall.
- Ramadan, M. ve Nomura, H. (2005). Flow analysis of semi solid processing for grey cast iron. *International Journal of Cast Metals Research*, 18(5), 266-272.
- Sabatino, M. D. ve Arnberg, L. (2013). A Review on The Fluidity of Al Based Alloys, *Metallurgical Science and Technology*, 22(1).

- 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.
- şen, N. B. (2018). *Lamel Grafitli Dökme Demirlerin Üretiminde Metalurjik Silisyum Karbür ve Ferro Silisyum Katkılarının Malzeme Üzerindeki Mekanik, Metalurjik ve Ekonomik Etkisinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (520352).*
- şirin, S. ve Çolak, M. (2009). Döküm Parça Tasarımında Besleme Kriterleri. Dökümlife.
- Uçal, O. (2019). *Lamel Grafitli Dökme Demirin Talaşlı İşlenmesinde Takım Performanslarının Karşılaştırılmalı Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (560905).*
- URL-1, <https://dokumhane.net/kutuphane/vermikuler-grafitli-dokme-demir-nedir/>. 14 Ağustos 2022.
- URL-2, <https://www.makinaegitimi.com/temper-dokme-demirler/>. 14 Ağustos 2022.
- URL-3, <https://www.dokumtek.com/lamel-vermikuler-kuresel-demirin-ozellikleri-nelerdir/>. 17 Ağustos 2022.
- 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.
- Vijayaram, T. R. (2005). MechanicalPropertyInvestigation of LM 6 Alloy Castings Manufactured with the Aid of Casting Solidification Simulation Technology. *Indian Foundry Journal*, 51(11), 30-34.
- 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. *Thermochimica Acta*, 645(7), 7-15.
- Yıldız, M. (2014). *Dökme demirlerde nicel faz analiz tekniklerinin incelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi, (354308).*
- Yılmaz, F. (2003). *İçme-Atık su ve gaz dağıtım şebekelerinde dökme demirler ve düktil demir uygulamaları, İski Yayını, İstanbul.*

ÖZGEÇMİŞ

Sami KÖSE, 1991 yılında Gümüşhane Teknik Lisesi'nden mezun olmuştur. 1991-1993 yılları arasında ön lisans eğitimini KTÜ Rize Meslek Yüksek Okulunda Makine Resim ve Konstrüksiyon bölümünü tamamlamış, 1995-1998 yılları arasında Marmara Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Makine Öğretmenliği Bölümünü tamamlamış ve 2014-2017 yılları arasında Gümüşhane Üniversitesi Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü tamamlamıştır. 2019 yılında Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nde Yüksek Lisans eğitimine başlayan Sami KÖSE Fransızca bilmektedir ve Gümüşhane Mesleki Eğitim Merkezi'nde öğretmen olarak görev yapmaktadır.

Milli Eğitim Bakanlığından 2020-2021 ve 2021-2022 yılları arasında başarı belgesi almıştır.