



**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN
KALIPLAMA TASARIMINDA BESLEYİCİ BOĞAZ
BAĞLANTILARININ ETKİSİNİN DENEYSEL VE
MODELLEME TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ**

Mete ŞEKERDEN

**Yüksek Lisans Tezi
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK
2019**

(Her Hakkı Saklıdır)

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

**KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN KALIPLAMA TASARIMINDA
BESLEYİCİ BOĞAZ BAĞLANTILARININ ETKİSİNİN DENEYSEL VE
MODELLEME TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ**

**(Investigation of the Effect of Feeder and Feeder Connections in Molding Design of
Spheroidal Graphite Cast Iron by Experimental and Modelling Techniques)**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Mete ŞEKERDEN

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

**Bayburt
Ağustos, 2019**

KABUL VE ONAY TUTANAĐI

Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK danışmanlığında, 142001012 numaralı Mete ŞEKERDEN tarafından hazırlanan “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kalıplama Tasarımında Besleyici Boğaz Bağlantılarının Etkisinin Deneysel ve Modelleme Teknikleri ile İncelenmesi” konulu bu çalışma .../.../...tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Programında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Alperen TOZLU

İmza:

Jüri Üyesi : Dr. Öğr. Üyesi Çağlar YÜKSEL

İmza:

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

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

Doç. Dr. Fatih GÜRBÜZ

Enstitü Müdürü

ETİK VE BİLDİRİMİ SAYFASI

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Kalıplama Tasarımında Besleyici Boğaz Bağlantılarının Etkisinin Deneysel ve Modelleme Teknikleri ile İncelenmesi” başlıklı çalışmanın tarafımdan bilimsel etik ilkelere uyularak yazıldığını ve yararlandığım eserleri kaynakçada gösterdiğimi beyan ederim.

.../.../...

Mete ŞEKERDEN

TEŐEKKÖR

GerçekleŐtirmiŐ olduğum tez çalışmasında ve deneylerinde, yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren ve tez çalıŐmamın nihayete ermesi için destek olan danışmanım, Dr. Öğr. Üyesi Murat ÇOLAK'a ve manevi desteklerini hiçbir zaman eksik etmeyen aileme teşekkürü bir borç biliyor ve Őükranlarımı sunuyorum.



ÖZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLERİN KALIPLAMA TASARIMINDA
BESLEYİCİ BOĞAZ BAĞLANTILARININ ETKİSİNİN DENEYSSEL VE
MODELLEME TEKNİKLERİ İLE İNCELENMESİ

Mete ŞEKERDEN

Ağustos, 2019, 77 sayfa

Döküm yöntemi çok eski ve yaygın bir üretim yöntemi olmasına rağmen sıvı metalle çalışılmasından dolayı sağlam parça imali ve üretilen parçanın kullanım ömrü açısından kalıplama tasarımının düzgün yapılması çok önemlidir. Ayrıca dökme demirlerde kalıplama tasarımı döküm parametrelerine göre çok değişkenlik gösterebilmektedir. Aynı tasarıma sahip kalıp farklı döküm şartlarında farklı sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Çünkü küresel grafitli dökme demirlerin katılaşması sırasında oluşan hacimsel değişim çelik ve alüminyum dökümlerindekinden farklı şekilde gelişmektedir.

Bu çalışmada, deneysel olarak tasarlanan farklı kesit kalınlıkları içeren model değişen döküm parametreleri ile tek ve çift besleyicili olarak yapılan tasarımlara uygun olarak kalıplama ve dökümler yapılmıştır. Tasarım çalışmaları için, bilgisayar destekli 3B çizim programı SolidWorks, modelleme çalışmalarında SolidCast döküm simülasyon programı kullanılmıştır. Dökümlerde parametre olarak kimyasal bileşim, dökümhane şartları, kalıp rijitliği, aşılama kalitesi şartları değerlendirilmiştir. Döküm sonrası numuneler modelleme programında tespit edilen yerlerden kesilerek penetrant testleri uygulanmış ve döküm parçaların farklı kesit kalınlığına sahip yerlerinden mikro yapı numuneleri alınmış ve grafit yapıları incelenmiştir. Modelleme ile gerçek döküm sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylece çalışmada besleme boğazının döküm parçaların sağlam imalatındaki önemi deneysel ve modelleme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmada kum kalıba döküm, makro inceleme, penetrant testleri, metalografik hazırlık, mikro yapı görüntüleme, görüntü analizi ve modelleme teknikleri kullanılmıştır. Sonuçlar incelendiğinde aynı kalıplama tasarımında reçineli kalıp ile yapılan ölçümlerde yaş kalıp kumuna nazaran çekinti riskinin daha az ortaya çıktığı görülmüştür. Ayrıca besleyici boğaz ve boğaz bağlantısının ve yerinin gözenek oluşumunda önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır.

Anahtar kelimeler: Dökme demir, küresel grafitli dökme demir, döküm, döküm tasarımı, besleyici tasarımı, modelleme

ABSTRACT

MASTER THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF FEEDER AND FEEDER CONNECTIONS IN MOLDING DESIGN OF SPHEROIDAL GRAPHITE CAST IRON BY EXPERIMENTAL AND MODELING TECHNIQUES

Mete ŞEKERDEN

August, 2019, 77 pages

Although the casting method is a very old and widespread production method, it is very important to manufacture the solid part and to make the molding design properly in terms of the service life of the produced part due to the working with liquid metal. In addition, the casting design of cast irons can vary greatly according to casting parameters. The mold with the same design can produce different results under different casting conditions. Since the volumetric change during the solidification of spheroidal graphite cast irons develops differently than that of steel and aluminum castings. In this study, molds and castings were made in accordance with the experimental design of different cross section thicknesses with changing casting parameters and single and double feeder designs. For the design studies, SolidWorks computer-aided 3D drawing program and SolidCast casting simulation program were used for modeling studies. Chemical composition, foundry conditions, mold rigidity, metallurgy quality conditions were evaluated as parameters. After casting, penetrant tests were performed by cutting the specimens from the locations determined in the modeling program, and microstructure samples were taken from the parts with different cross-sectional thickness and graphite structures were examined. Modeling and physical casting results were compared.

In this study, the importance of feed connections in robust manufacturing of cast parts was evaluated with experimental and modeling techniques. Sand mold casting, macro examination, penetrant tests, metallographic preparation, microstructure imaging, image analysis and modeling techniques were used in the study. When the results were examined, it was seen that the risk of shrinkage was less than the wet mold sand in measurements made with resin mold in the same molding design. In addition, nutrient feeder connections and location was found to be an important parameter in pore formation.

Keywords: Cast iron, spherical graphite cast iron, casting, casting simulation, riser design, modelling

İÇİNDEKİLER

Etik ve Bildirimi Sayfası	i
Teşekkür	ii
Öz	iii
Abstract.....	iv
İçindekiler.....	v
Tablolar Dizini.....	viii
Şekiller Dizini.....	ix
Kısaltmalar ve Simgeler Dizini	xii
Giriş	1
KURAMSAL TEMELLER	7
Dökme Demirler	7
Dökme Demirlerin Sınıflandırılması.....	9
Dökme Demirlerde Fazlar.....	10
Grafit.....	11
Ferrit.....	11
Perlit.....	11
Sementit.....	11
Steadit.....	11
Östenit.....	11
Dökme Demir Çeşitleri.....	12
Beyaz Dökme Demir.....	12
Temper Dökme Demir.....	13
Gri Dökme Demir.....	14
Küresel Grafitli Dökme Demir.....	15
Küresel Grafitli Dökme Demir	15

Küresel Grafitli Dökme Demirin Genel Özellikleri.....	16
Aşınma Direnci.....	16
Süneklik.....	16
Darbe Direnci.....	16
Mukavemet.....	16
Basınca Dayanım.....	17
Korozyon Direnci.....	17
Besleyici Tasarımı	17
Sıcak Nokta Kriteri.....	17
Katılma Zamanı (Modül) Kriteri.....	18
Besleme Yolu Kriteri.....	19
Besleyici Hacim Gereksinimi.....	19
Döküm Simülasyonları	20
Döküm Simülasyonlarında Tanımlanan Parametreler.....	21
Döküm Simülasyonlarının Kullanım Faydaları.....	22
Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Besleyici Tasarımı	22
Dökme Demirlerde Besleyici Tasarımı	23
MATERYAL VE METOD	27
Model ve Besleyici Tasarımı	27
Model İmalatı ve Kalıpların Hazırlanması	31
Ergitme ve Döküm İşlemleri.....	34
Dökümlerin Kalıptan Çıkartılması, Yolluklarının Kesilmesi ve Taşlanması İşlemleri.....	35
Döküm Numunelerinin İncelenmesi.....	36
Penetrant Testleri.....	37
Metalografik Hazırlık İşlemleri ve Mikro yapı İnceleme.....	38
İmaj Analiz Yöntemi ile Mikro Yapı Karakterizasyonu.....	40
Küresellik Ölçümleri.....	40

Faz Analizi İncelemeleri.....	42
Modelleme Çalışmaları.....	43
Döküm-Kalıp Geometrisinin ve Malzeme Özelliklerinin Yazılımda Tanımı.....	43
Simülasyon Programında Kalıbın Doldurulması ve Dökümün Katılaşması.....	44
ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	46
Kimyasal Bileşim Analizi	46
Modelleme ve Besleyici Tasarımı Çalışmaları	47
Döküm Numunelerin İncelenmesi	49
Mikroyapı İncelemeleri.....	53
İmaj Analiz Değerlendirmeleri	59
Penetrant Test Sonuçları ve Modelleme Sonuçları ile karşılaştırılması	62
SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKÇA.....	73
ÖZGEÇMİŞ	78

TABLULAR DİZİNİ

Tablo 1. <i>Dökme demir türleri ile çelik döküm arasındaki çeşitli özelliklerin karşılaştırılması (Özel, 1994)</i>	9
Tablo 2. <i>Dökme demirlerde bulunan elementler (Erdoğan, 2000; Bilici, 2004)</i>	10
Tablo 3. <i>Ocak şarj malzemeleri</i>	34
Tablo 4. <i>Kimyasal Analiz Sonuçları(% ağırlıkça)</i>	47
Tablo 5. <i>İmaj analiz ölçüm sonuçları</i>	60
Tablo 6. <i>Faz analizi ölçüm sonuçları</i>	61



ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1. a) Düzenli hacimsel küçülme değişim gösteren bir alaşımın soğuma sırasındaki değişim eğrisi, b) Katılaşıırken karmaşık hacimsel değişim özelliği gösteren grafitli dökme demirin değişim eğrisi (Schmidt, 2007).....	8
Şekil 2. Fe-C diyagramının gösterilişi (ASM Handbook 1988).	10
Şekil 3. %4 Nital ile dağlanmış 150 x büyütmede beyaz dökme demir mikroyapısı (Cavcar, 1996).....	13
Şekil 4. 100xbüyütmede çekilen temper dökme demir mikroyapısı (Yıldız, 2014).	14
Şekil 5. Döküm parçanın modellenme aşamaları(Arda ve Kayıkçı, 2006).	17
Şekil 6. Sıcak nokta oluşan bölgenin şematik gösterimi.....	18
Şekil 7. Katılma zamanı (Modül) kriteri.....	19
Şekil 8. Katılan dökümde besleme mekanizmaları(Campbell, 1991)	19
Şekil 9. Besleyici veriminin şematik gösterimi (http://www.finitesolutions.com/ (Haziran 2009).....	20
Şekil 10. Farklı besleyici boğazı bağlantıları.....	25
Şekil 11. Gereksiz besleyicilerin çekme yapmadığına ilişkin döküm örnekleri	25
Şekil 12. Gerekli besleyici yüksekliği.....	26
Şekil 13. Dökme demir dökümleri için önerilen tipik yolluk ve meme boyutları	26
Şekil 14. Döküm modeli geometri ve ölçüleri	28
Şekil 15. SolidCast yazılımından alınan hacimsel değişim eğri hesaplaması.....	28
Şekil 16. Besleyici Tasarım Sihirbazında besleyici ebatlarının belirlenmesi	29
Şekil 17. Kalıplama tasarımı katı model görüntüleri	30
Şekil 18. Yaş kum ile kalıplama aşamalarından örnek görüntüler	32
Şekil 19. Alfaset reçineli kalıplama işlem başmakları görüntüleri	33
Şekil 20. Sıvı metal ergitme, küreleştirme, potaya alma görüntüleri.....	35
Şekil 21. Döküm sonrası kalıpların bozulması ve döküm numunelerin çıkartılması	35
Şekil 22. Kalıptan çıkan döküm numunelere ait kumlama sonrası görüntü	36
Şekil 23. Döküm numunelerin incelenmek üzere kesilmesi	36
Şekil 24. Penetrant uygulama basamakları	38
Şekil 25. Mikroskop ve Bilgisayar Görüntüsü.....	39
Şekil 26. İki faz mikro yapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntüsü	41
Şekil 27. a)Küre sayısı ve uzunlukları, b)Küreselleşme oranı, c)Faz oranı.....	42

Şekil 28. Örnek mikroyapı numunesi için yüzde faz dağılımı.....	42
Şekil 29. CU DI Ferr alaşımı için verilen değerler	43
Şekil 30. Modelin ve kalıbın meş görüntüsü	44
Şekil 31. FlowCast programında kalıbın doldurulması	45
Şekil 32. Simülasyondan alınan örnek bir katılma görüntüsü	45
Şekil 33. Döküm parçanın 1,42 cm modül değerinde sıcak noktaların görünümü	47
Şekil 34. Döküm parçanın 1,2 cm modül değerinde sıcak nokta görünümü	48
Şekil 35. Besleyici boğaz modülü ve ebatlarının belirlenmesi	48
Şekil 36. Yandan tek ve çift besleyicili kalıplanarak dökülmüş numune görüntüleri	50
Şekil 37. Yaş kalıp kumu ile dökülen besleyici boğaz bağlantı görüntüleri.....	50
Şekil 38. Reçineli kalıp kumu ile dökülen besleyici boğaz bağlantı görüntüleri.....	51
Şekil 39. Üstten tek ve çift besleyicili kalıplanarak dökülmüş numune görüntüleri	52
Şekil 40. Yaş kalıp kumu ile dökülen üst besleyicili boğaz bağlantı görüntüleri.....	52
Şekil 41. Yan tek besleyiciyle dökülen numunelerin parlatma sonu mikro yapısı	53
Şekil 42. Yan çift besleyiciyle dökülen numunelerin parlatma sonu mikro yapısı.....	54
Şekil 43. Yan tek besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı	55
Şekil 44. Yan çift besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı.....	56
Şekil 45. Üst tek besleyiciyle dökülen numunelerin parlatma sonu mikro yapısı	56
Şekil 46. Üst çift besleyiciyle dökülen numunelerin parlatma sonu mikro yapısı.....	57
Şekil 47. Üst tek besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı.....	58
Şekil 48. Üst çift besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı	58
Şekil 49. Yaş kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin penetrant testi	62
Şekil 50. Yaş kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin makroporozitesi	62
Şekil 51. Reçineli kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin penetrant testi	63
Şekil 52. Reçineli kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin makroporozitesi	63
Şekil 53. Yaş kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin penetrant testi	64
Şekil 54. Yaş kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin makroporozitesi	64
Şekil 55. Reçineli kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin penetrant testi	65
Şekil 56. Reçineli kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin makroporozitesi	65
Şekil 57. Yaş kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin penetrant testi.....	66
Şekil 58. Yaş kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin makroporozitesi	66
Şekil 59. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin penetrant testi	66

Şekil 60. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin makroporozitesi	67
Şekil 61. Yaş kalıp kumda üst çift besleyicili numunelerin penetrant testi	67
Şekil 62. Yaş kalıp kumda üst çift besleyicili numunelerin makroporozitesi.....	68
Şekil 63. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin penetrant testi	68
Şekil 64. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin makroporozitesi	69



KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

KGDD	: Küresel grafitli dökme demir
HV	: Vickers Hardness
ASTM	: American Society for testing and materials
DIN	: Deutsches Institut für Mormung
AFS	: American Foundrymen's Society
INCO	: International Organization for standardization
BCIRA	: British Cast Iron Research Association
HB	: Brinell Hardness
HRA	: Rockwell a Hardness
Fe	: Demir
C	: Karbon
Si	: Siliyum
Ca	: Kalsiyum
P	: Fosfor
Ni	: Nikel
Mg	: Magnezyum
Mn	: Manganez
Cu	: Bakır
NBRBS	: Fırında reçine yapışmamış kum
JMatPro	: Java tabanlı malzeme özellikleri
ANOVA	: Analiz varyans analiz
SEM	: Taramalı elektron mikroskobu
γ	: Östenit
Fe ₃ C	: Sementit
α	: Ferrit

BİRİNCİ BÖLÜM

Giriş

Döküm; üretilmek istenen şeklin sıvı metale doğrudan verilebilmesi sayesinde çok eskilerden beri kullanılan üretim yöntemlerinden biridir. Üretim yöntemleri arasında, esnekliği, ucuzluğu, gelişme ve yeniliklere açık olması gibi birçok özelliğinin yanı sıra, sıvı metalle istenen şeklin elde edilmesini mümkün kılmaktadır. Tek seferde basit veya karmaşık şekilli parçalar ergitilebilen herhangi bir malzemedен üretilebilir. Döküm yoluyla üretilen parçaların boyutları birkaç milimetreden birkaç metreye ve ağırlıkları da birkaç gramdan birkaç tona kadar değişebilmektedir.

Dökme demirler günümüzde halen en yaygın olarak kullanılan alaşım çeşitlerinden biridir. Dökme demirlere Magnezyum (Mg), Seryum (Ce) gibi alaşım ilaveleri ile karbonun biçimini lamel şekilden küresel hale getirilmesiyle, bu alaşım çeşidi küresel grafitli dökme demir (KGDD) ismini alır. Özellikleri çelikler ile dökme demirlerin avantajlı yönlerini bir arada bulundurduğundan endüstriyel olarak çok önemli bir döküm malzeme grubunu oluşturmaktadır.

Döküm yöntemi çok eski ve yaygın bir üretim yöntemi olmasına rağmen sıvı metalle çalışılmasından dolayı sağlam parça imali ve üretilen parçanın kullanım ömrü açısından kalıplama tasarımının düzgün yapılması çok önemlidir. Ayrıca dökme demirlerde kalıplama tasarımı döküm parametrelerine göre çok değişkenlik gösterebilmektedir. Aynı tasarıma sahip kalıp farklı döküm şartlarında farklı sonuçlar ortaya çıkarabilmektedir. Çünkü KGDD'lerin katılaşması sırasında oluşan hacimsel değişim çelik ve alüminyum dökümlerindekinden farklı şekilde gelişmektedir. Çelik ve alüminyum gibi dökümlerde soğuma ve katılaşma sürecinde yoğunluk artışına bağlı olarak belirli oranlarda hacimsel küçülme (çekinti) oluşurken dökme demir dökümlerinde birden fazla parametreye bağlı olarak çekinti ve genleşme bir arada görülebilmektedir. Bu parametrelerden en önemlileri; kalıp malzemesi, kimyasal bileşim, alaşımın aşırı ısı, aşılama kalitesi, dökümün katılaşma zamanı ve döküm hızıdır. Yüksek genleşme basıncı ve buna bağlı olarak düşük çekme ve besleme oranı elde edebilmek için yüksek karbon eşdeğeri, yüksek kalıp dayanımı, yüksek katılaşma zamanı, yüksek aşılama kalitesi (yüksel modülarite), düşük döküm sıcaklığı (düşük aşırı ısı) ve düşük döküm hızları kullanılmalıdır.

Dökme demirlerin katılaşması sırasında oluşan hacimsel değişim, soğumaya bağlı olarak tek yönlü hacimsel küçülme gösteren çelik ve alüminyum gibi dökümlerinin aksine, birçok parametreye bağlı olarak çekinti ve genleşmenin bir arada görüldüğü karmaşık formda ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden besleyici tasarımında birçok faktörün göz önüne alınması ve bunların doğru bir şekilde hesaba katılması zorunludur. Mühendislik hesaplamalarıyla çok yoğun bilgi ve tecrübe gerektiren bu iş, son yıllarda dökümhaneler arasında sıkça kullanılmaya başlanan döküm simülasyon programları ile kolayca yapılabilmektedir.

Döküm prosesi modellemesi, bilgisayarın kalıp doldurulurken ve döküm yapıldıktan sonraki kalıp içerisinde neler olduğu hakkında tahmin yapabilmesi için gerekli bir matematiksel yöntemdir. Döküm simülasyon programları; yeni bir teknoloji olarak döküm parça tasarımını; dene ve yanıldığını yüksek bir maliyetle öğren yönteminde olduğu gibi, modeller, kalıplar hazırlamaya ve boşuna hurda malzeme üretmeye gerek kalmadan bilgisayarda yapmaya olanak sağlar. Simülasyon kullanarak 3 boyutlu katı model üzerinde, kaç tane ve hangi ebatla besleyicinin gerekli olduğunu ve nereye yerleştirileceği belirlenerek, yolluk tasarımı bilgisayar üzerinde yapılabilir. Tasarımı yapılan parçanın simülasyonu yapılarak bilgisayarda döküm, katılaşma ve çekinti oluşumu gibi birçok sonuç görülebilir. Bu sonuçlardan faydalanarak gerekiyorsa tasarımda mümkün olan en iyi ve en ekonomik ürün için ince ayarlamalar yapılabilir. Ayrıca parça tasarımında optimizasyon sistem tarafından optimum kalite ve verim elde edilecek şekilde otomatik olarak yapılabilir.

Bu çalışmada, deneysel olarak tasarlanan farklı kesit kalınlıkları içeren model değişen döküm parametreleri ile tek ve çift besleyicili olarak yapılan tasarımlara uygun olarak kalıplama ve dökümler yapılmıştır. Tasarım çalışmaları için, bilgisayar destekli 3B çizim programı SolidWorks, modelleme çalışmalarında SolidCast döküm simülasyon programı kullanılmıştır. Dökümlerde parametre olarak farklı tasarım, kimyasal bileşim ve dökümhane şartları, kalıp kumuna bağlı kalıp rijitliği şartları değerlendirilmiştir. Döküm sonrası numuneler modelleme programında tespit edilen yerlerden kesilerek penetrant testleri uygulanmış ve döküm parçaların farklı kesit kalınlığına sahip yerlerinden mikro yapı numuneleri alınmış ve imaj analiz yazılımları ile küresellik durumu tespit edilmiştir. Modelleme ile gerçek döküm sonuçları karşılaştırılmıştır. Böylece çalışmada besleme boğazının döküm parçaların sağlam imalatındaki önemi deneysel ve modelleme teknikleri ile değerlendirilmiştir. Çalışmada kum kalıba döküm, makro inceleme, penetrant testleri, metalografik hazırlık, mikro yapı görüntüleme, görüntü analizi ve modelleme teknikleri kullanılmıştır. Çalışma modelleme içeren deneysel bir çalışma olup Bölüm 2’de dökme demirler, KGDD’ler, besleyici tasarımı konularını da içerecek şekilde literatür taraması verilmiştir. Bölüm 3’te bu tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar, Bölüm

4’de deney sonuçlar ve değerlendirilmesi yapılmıştır. Son olarak Bölüm 5 de tez sonucunda elde edilen genel sonuçlar derlenerek verilmiştir.

KGDD’lerin kalıplama tasarımı ve deneysel, modelleme teknikleri sürecinde yapılan işlemler ve bu işlemlerin sonuçlara olan etkileri ile ilgili birçok çalışma çeşitli araştırmacılar tarafından literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmalar aşağıda kısaca açıklanmıştır.

Vijayaram (2005), yapmış olduğu çalışmada; döküm mühendislerinin ve malzeme bilimcilerin tasarım parametrelerini optimize etmelerine, katılaştıran dökümün sıcaklık zamanını daha iyi anlamalarına ve dolayısıyla sıcak nokta bölgesini belirlemelerine yardımcı olacak bir örnek döküm katılaşmasının simülasyon sürecini ele almışlardır. Dökülme katılaşma simülasyon teknolojisinin büzülme, gözeneklilik gibi kusurların giderilmesinde ve bileşenlerin etkin bir şekilde tasarlanmasına yardımcı olan sıcak nokta bölgelerinin konumlandırılmasında kullanıldığı sonucuna varmışlardır. (Vijayaram, 2005).

Guo, Saunders, Miodownik ve Schille (2005) yapmış oldukları çalışmada katılaşma modellemesi ve Java tabanlı malzeme özellikleri yazılımı (JMatPro) kullanarak çok bileşenli alaşımlar için ilgili termo-fiziksel ve fiziksel özelliklerin bütünleştirilmesinin değerini göstermişlerdir. Kalıp ara yüzündeki ısı-transfer katsayıları gibi ölçülmesi zor olan diğer parametreleri elde etmek için ters modellemede girdi olarak kullanılabileceğini göstermişlerdir (Guo *vd.*, 2005).

Kermanpur, Mahmoudi ve Hajipour (2008) yapmış oldukları çalışmada iki otomotiv döküm parçasının çok besleyicili bir döküm kalıbındaki metal akışı ve katılaşma davranışları, üç boyutta simüle etmişlerdir. Hazırlanan simülasyon modeli, ergiyik aşırı ısınma, dökme zamanı (hız), kalıp yüzeyi pürüzlülüğü, geçit tasarımı ve kalıp konfigürasyonu dahil olmak üzere birçok döküm parametresinin otomotiv döküm parçalarının kalitesi ve sağlamlığı üzerindeki etkilerini simüle etmişlerdir (Kermanpur *vd.*, 2008).

Pathak, Kumar, Yadav ve Dutta (2009) yapmış oldukları çalışmada, iki boyutlu bir dikdörtgen boşlukta katılaşma için eşzamanlı kalıp doldurma ve faz değişiminin sayısal bir analizini sunmuşlardır. Kalıbı doldurmak için benimsenen doldurma konfigürasyonunun ayrıca katılaşma ara yüzünün gelişimini ve şeklini de etkilediğini tespit etmişlerdir (Pathak *vd.*, 2009).

Sutaria, Gada, Sharma ve Ravi (2012) yapmış oldukları çalışmada seviye set metodu ve besleme yolu modelini birleştirerek besleme yolları ve sıcak noktaları hesaplamışlardır. Yaptıkları hesaplarla, besleyici tasarımının kalite için hayati önem taşıyan ve endüstriyel dökümlerin verim optimizasyonu için besleme mekanizmasının daha iyi görüntülenmesini sağlayan sonuçlar elde etmişlerdir (Sutaria *vd.*, 2012).

Dabade ve Bhedasgaonkar (2013) yapmış oldukları çalışmada deneylerin tasarımı ve bilgisayar destekli döküm simülasyon teknikleri, yaş kum dökümünde kumla ilgili ve yöntemle ilgili kusurları analiz etmek için birleştirmişlerdir. Döküm kalitesi ve verimi, bilgisayar destekli döküm simülasyon tekniği ile mümkün olan en kısa sürede ve dökümhane atölyesinde gerçek denemeler yapılmadan verimli bir şekilde iyileştirilebilir (Dabade & Bhedasgaonkar, 2013).

Bhatt, Barot, Bhatt, Beravala ve Shah (2014) yaptıkları çalışmada ideal kalıp tasarımı elde etmek için çeşitli besleme sistemi tasarımlarını simüle etmeye çalışmışlardır. Simülasyon yazılım paketi üzerinde çok sayıda deneme hızla gerçekleştirilebilir ve bu sayede dökümhanenin kar marjını arttıran optimum sonuçlar elde etmişlerdir. Simülasyon ayrıca dökümhane mühendisine, besleyici sistemi tasarımının işlevselliği hakkında da bilgiler verdiğini göstermişlerdir (Bhatt *vd.*, 2014).

Choudhari, Narkhede ve Mahajan (2014) tarafından yapılan çalışmada metallerin katılaşması fizikçiler, metaluristler, döküm mühendisleri ve yazılım geliştiriciler için büyük önem arz ettiğini belirtmişlerdir. Simülasyon temelli yaklaşım besleyiciler ve (çekme gözenekli serbest hacim yüzdesi) döküm kalitesini verimi temsil besleyici verilerinde iyileştirme sağlamıştır. Simülasyon sonuçları, deneysel deneme ile karşılaştırılmış ve karşılaştırmanın iyi bir uyum içinde olduğu bulunmuştur. Dolayısıyla deney sonuçlarının simülasyon sonuçları ile doğrulandığı sonucuna varılmıştır (Choudhari *vd.*, 2014).

Nimbulkar ve Dalu (2016) yapmış oldukları çalışmada Auto-CAST X1 döküm kullanarak geçit ve besleme sistemini optimize etmek için mevcut geçit ve besleme sisteminin tasarımını incelemişlerdir. Döküm simülasyon metodu kullanılarak, boğaz ve besleme sistemi ile ilgili kusurlardan dolayı dökümün reddedilme yüzdesinin %30 oranında azaltıldığı gözlemlenmiştir (Nimbulkar & Dalu, 2016).

Ling, Zhou, Nan, Yin ve Shen (2017) yapmış oldukları çalışmayla, yerçekimine bağlı olarak doğal dökümde görülen çekinti boşluğunu tahmin modeli ve basınç dağılımı üzerine kurulan olan bir model düşünmüşlerdir. Önerilen modelle, katılaşma simülasyonunu ve çekinti kusurlarını tahmin etmenin dökümde son derece faydalı bir yöntem olarak göstermişlerdir (Ling *vd.*, 2017).

Liu *vd.* (2017) yapmış oldukları çalışmada kalıp kumunda reçinenin etkisini araştırmışlardır. Furan reçinesi ve kürlenme maddesi ilavesinin çekme dayanımı, tutulan dayanım ve NBRBS (fırında reçine yapışmamış kum)'nin gaz evrimi üzerindeki etkileri araştırılmış, magnezyum alaşımlı dökümlerin üretim ihtiyacını karşılayan ve katlanabilirliği optimize edilmiş formül belirlenmiştir. Optimize edilmiş formül, furan reçinesi miktarının, baz

kumun %1,6'sı ve kütleme ajanı miktarının, ağırlıkça %50 furan reçinesi içeriğinin olmasıdır (Liu *vd.*, 2017).

Mozammil, Karloopia ve Jhaa (2017) gözeneklilik üzerine çalışma yapmışlardır. Çalışmalarında saf alüminyum (%99,85) döküm malzemesi olarak kullanılmıştır. Hem simülasyon hem de deneysel çalışmalar için, dökme sıcaklığı, dökme zamanı ve farklı tip geçit sistemi tasarımı nedeniyle, dökümdeki gözenekliliğin büyük oranda etkilendiği görülmüştür. Dökme sıcaklığının artmasıyla, gözenekliliğin arttığı da tespit edilmiştir (Mozammil *vd.*, 2017).

Freitag, Schafföner, Faßauer ve Aneziris (2018) yapmış oldukları çalışmada titanyum döküm parçaların kalitesi ile ilgilenmişlerdir. Titanyum döküm parçaların kalitesi sadece kalıbın titanyum alaşımlı eriyik ile temasta korozyon reaksiyonuna değil, aynı zamanda yatırım döküm kalıbının boyutsal doğruluğuna ve yüzey kalitesine bağlı olduğunu belirtmişlerdir. Replikasyon tekniği ile üretilen yaş kalsiyum zirkonat (CaZrO₃) kaplamaların kaplama özelliklerini araştırmışlardır. İstenilen kayma inceltici kaplama davranışı, daha yüksek bir ksantan zankı içeriğine ve bir üretaneakrilat bağlayıcıya sahip bir kaplama kayma kullanılarak elde etmişlerdir (Freitag *vd.*, 2018).

Hodbe ve Shinde (2018) yapmış oldukları çalışmalarında döküm işleminde en kritik adımın, ergimiş metalin hazırlanmış kalıp boşluğunda katılaşması olduğunu, çünkü bunun, hacimsel çekilme, gözeneklilik, üfleme delikleri gibi kusurların meydana geldiği ve dökümün kalitesini etkilediği zaman olduğunu belirtmişlerdir. AutoCAST programıyla döküm simülasyonu yapılarak enerji, işçilik ve hurda malzemenin önüne geçilmektedir. Simülasyon denemelerinden sonra yapılan dökümlerin reddedilme yüzdeleri düşmektedir (Hodbe & Shinde, 2018).

Martineza, Torrea, Lacazeb ve Sertuchaa (2018) yapmış oldukları çalışmada ağırlıkça %9,12'ye kadar çeşitli miktarlarda silisyum içeren bir dizi ötektik küresel grafitli dökme demiri inlememişlerdir. En yüksek silisyum muhtevasına sahip alaşımda (ağırlıkça %9,12) sıvının ferrit-grafit katılaşmasına teşvik etmek için silisyum muhtevası arttırıldığı için kademeli bir ferrit stabilizasyonu elde etmişlerdir (Martínez *vd.*, 2018).

Seo, Seo ve Kang (2019) besleyicinin yerinin ve hacminin, soğutucunun uygulanması, soğutucunun hacminin ve besleyicinin kalıplama teknolojilerinin kusur durumlarına etkisine göre ısınma yönteminin etkileri üzerine çalışmışlardır. Sıcak noktaların dağılımının ve ortaya çıkan zamanın, daralan gözenekliliklerin dağılımının ve katılaşma zaman oranının kapsamlı analizlerini yapmışlardır. Isıtıcı bir besleyici ile en uzun katılaşma süresi yaklaşık 6390-6400 s dir, bu süre kısa ya da alt L tipi bağlantı noktalarına kıyasla yaklaşık 3,3 katıdır. Bu da

verimliliği artırabilir. Son olarak, 600 °C'lik kritik bir ısıtıcı sıcaklığının aşılmaması için 1.04 katılama süresi oranının üzerinde tasarlanması gerektiği sonucuna ulaşımlardır (Seo *vd.*, 2019).



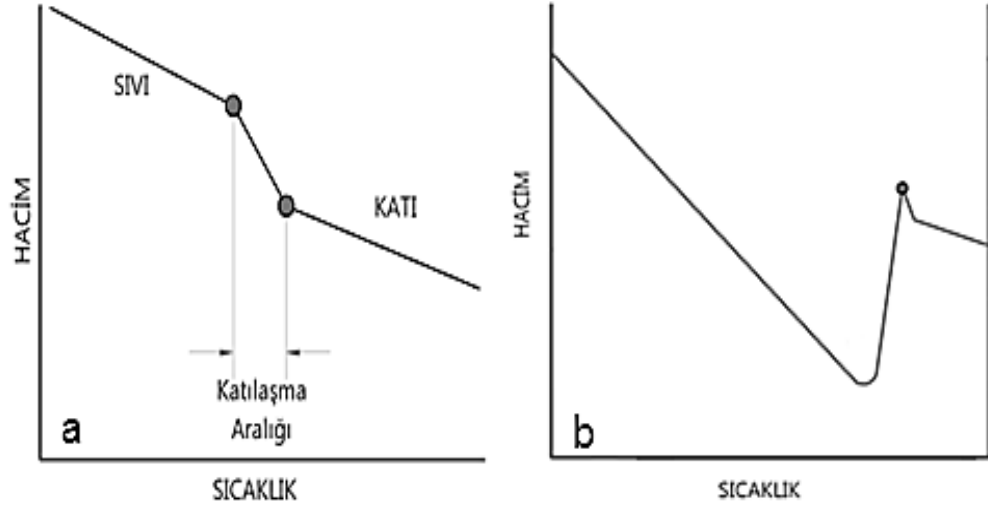
Kuramsal Temeller

Dökme Demirler

Döküm endüstrisinde en yüksek tonaja sahip ürün dökme demirlerdir. Tıpkı çelik ifadesi gibi, dökme demir ifadesi de demir içerikli alaşımların büyük bir çoğunluğunu tanımlamaktadır. Karbon içerikleri %2 ile %6,67 aralığında değişme gösteren demir karbon alaşımları olmalarına rağmen, yüksek karbon içeriğinin dökme demirleri kırılgan forma sokması sebebi ile, ticari olarak üretilen dökme demirlerde karbon içeriği %2-4 aralığındadır. Dökme demirler, bir ötektik tepkime ile katılan çok bileşenli demir alaşımlarıdır (Fe-C-Si alaşımlarıdır). Bünyelerinde, %2-4 C, %0,4-3,5 Si, %0,4-0,8 Mg, %0,1-0,8 P ve %0,05-0,10 oranlarında S bulunur. Ayrıca, titanyum (Ti), antimon (Sb), kalay (Sn) gibi elementlerden de çeşitli oranlarda bulundurulur. Silisyum (Si) ve diğer alaşım elementleri, östenit (γ) içerisindeki karbon çözünürlüğünü önemli ölçüde değiştirebileceği için, bazı özel durumlarda bir ötektik tepkime ile katılaşabilen %2'den daha az karbon içeren alaşımlar da dökme demir ailesine dahildir. Bütün yukarıda belirtilen elementlere ilaveten, Nikel(Ni), Krom(Cr), Bakır(Cu), Molibden(Mo), Magnezyum(Mg) ve Alüminyum(Al) gibi alaşım elementlerini de belli oranlarda içerebilirler (Metals Handbook, 1990, Campbell, 199, Şahin, 1992).

Dökme demirlere duyulan ihtiyacın başlıca nedenleri iyi bir mühendislik malzemesi olması ayrıca ucuz bir şekilde imal edilmeleridir. Dökme demirlerin süneklik özellikleri çok kısıtlı derecede olduğundan dolayı herhangi mekanik işlemle şekillendirilmeleri mümkün değildir ama kolay bir şekilde ergitilirler ve ürünün son halini alacak şekilde dökülebilirler. Dökme demire adını veren kısım aslında döküme en uygun ve en çok kullanılan malzeme olmasından kaynaklanmaktadır. (Campbell, 1991, Baydoğan, 1996).

Dökme demirler, ötektik katılma özelliği gösteren alaşım çeşitlerindedir. KGDD'ler ve lamel grafitli dökme demirler gösterdikleri bileşim özellikleriyle ötektik bileşime daha yakındır. Dökme demirlerin diğer alaşımlardan grafit çökmesi yönünden farklılık gösterirler. Çelik ve alüminyum dökümlerinin aksine grafit dökme demirlerin hacimsel değişimi bir çok parametreye bağlıdır (Kayıkçı, 2008, ASM, 1988). Şekil 1'de dökme demirler ile düzenli olarak hacimsel açıdan küçülme karakteri gösteren bir alaşımın değişim eğrilerinin karşılaştırılması gösterilmiştir (Stefanescu, 2005, Lacaze, 1999).



Şekil 1. a) Düzenli hacimsel küçülme değişim gösteren bir alaşımın soğuma sırasındaki değişim eğrisi, b) Katılırken karmaşık hacimsel değişim özelliği gösteren grafitli dökme demirin değişim eğrisi (Schmidt, 2007).

Genellikle dökme demirlerin katılması grafit parçacıklarının sıvı içerisinde çekirdeklenmesiyle başlar. Çevresinin östenit kabuk tarafından sarılmasıyla devam eder. Bu kabuklaşma iç tarafa doğru devam eder. Kabuğun iç tarafına doğru olan büyüme ve kenardan kenara doğru olan büyüme mekanizmaları dökme demir türlerinde farklılık göstermektedir. (Schmidt, 2007, Pedersen, Haddel & Tiedje 2006).

Dökme demirlerin katılma mekanizmalarının iyi bilinmesi besleme tasarımı yapılmadan önce dikkat edilmesi gerek en önemli hususların başında gelmektedir. Küresel veya lamel şeklinde grafit oluşturup katılma özelliği gösteren dökme demirlerin hacimsel değişimlerini karmaşık bir şekilde göstermelerinin başlıca sebebi katılma esnasındaki demirin karbon fazına göre daha yüksek bir yoğunluğa sahip olmasıdır. Bu yoğunluk farkı grafit fazının oluşumunda belli bir oranda genişlemeye yol açmaktadır. Bu genişleme oranı bazı durumlarda çekintiyi tolere edebilmektedir yani iyi bir yolluk tasarımıyla ek besleyiciye gerek duymaksızın bu genişleme oranıyla istenilen ürünün ek proseslere ihtiyaç olmadan elde edilmesi mümkündür. Genişleme; kalıp malzemesi, soğuma hızı, dökümün geometrik şekli, aşılama kriterleri ve bunun gibi birçok etken ile ilişkilidir (ASM 1988, Fredriksson, Stjern Dahl & Tinoco 2005).

Tablo 1. Dökme demir türleri ile çelik döküm arasındaki çeşitli özelliklerin karşılaştırılması (Özel, 1994)

Özellik	KGDD	Çelik D	GDD	BDD	TDD
Mukavemet/Ağırlık Oranı	1	3	5	-	4
İşlenebilirlik	2	3	1	-	2
Titreşim Sönümlenebilirliği	2	4	1	4	2
Elastisite Modülü	1	1	3	-	2
Dökülebilirlik	1	4	1	3	2
Güvenilirlik	1	2	5	4	3
Darbe Direnci	2	1	5	-	3
Korozyon Direnci	1	4	1	2	2
Üretim Maliyeti	2	4	1	1	3
Yüzey Sertleşebilirliği	1	3	1	-	1
Aşınma Direnci	2	5	3	1	4

1: En İyi 5: En Kötü

Dökme demirlerin sınıflandırılması.

Döküm halindeyken dökme demirlerin süneklik özellikleri düşük olduğundan dolayı sıcak ve soğuk işleme şekillendirilemezler. Ancak kolayca ergitilebilirler ve karmaşık şekillerdeki son boyutlarda rahatlıkla dökülebilirler. Dayanıklılık, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direncinin geniş bir yelpazede değişmesi, dökme demirlerin kullanım alanının genişliğine ve sürekli kullanılma durumunu ortaya koymaktadır. Dökme demirlerde karbon ve silisyum yüzdeleri arasındaki oran değiştirilirse, çeşitli metalik ve ametalik elementler ile alaşımlandırma yapılması ergitme, döküm ve ısıl işlem uygulamalarının değiştirilmesi ile; mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direnci değişik değerlere ulaşır. Üretim esnasındaki soğuma hızı, kimyasal bileşimin çeşitliliği, uygulanan ısıl ve sıvı işlemlerinin farklılık göstermesi gibi başlıca etkenlerden kaynaklı olarak dökme demirler çeşitli sınıflara ayrılmıştır. Muhtevasında bulunan demir esaslı döküm malzemelerinin dökme demirlerdeki oranları aşağıda bulunan tabloda gösterilmektedir. Dökme demirlerin içinde bulunduğu demir esaslı döküm malzemelerin oranları Tablo 2'de gösterilmiştir.

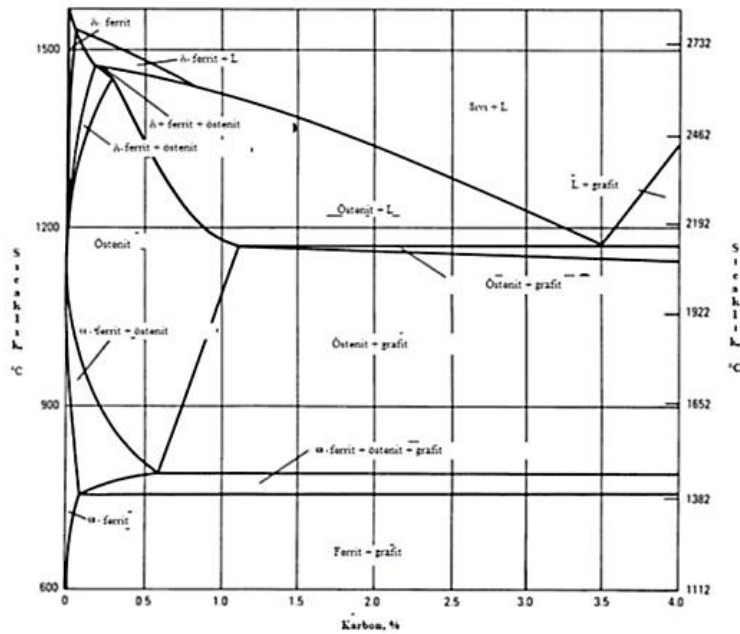
Tablo 2. Dökme demirlerde bulunan elementler (Erdoğan, 2000, Bilici, 2004)

Element	Küresel Grafitli Dökme Demir	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	Temper Dökme Demir
Karbon	3,0-4,0	2,5-4,0	1,3-3,6	2,0-2,6
Silisyum	0,8-2,8	1,0-3,0	0,5-1,9	1,1-1,6
Mangan	0,1-1,0	0,25-1,0	0,25-80	0,2-1,0
Kükürt	0,03-maksimum	0,02-0,25	0,06-0,2	0,04-0,18
Fosfor	0,10-maksimum	0,05-1,0	0,06-0,18	0,18-maksimum

Fe-C denge diyagramında dökme demirler %2'den %6,67'ye kadar gösterilir. Fe-C denge diyagramı Şekil 2'de gösterilmiştir. Lakin uygulamada karbon oranı arttıkça malzeme gevrekleşeceğinden dolayı, %4,4'e kadar karbon ve %3,5'a kadar silisyum (Fe-C-Si) içeren bir alaşımı olarak bilinir (ASM, 2004). Katılaşıma sırasında karbonlar ayrışır, bu ayrışma farklı şekil, boyut ve dağılıma olup demirin yapısında grafit olarak gözlemlenir. İşte bu farklılıklar da dökme demirin özelliklerini ve tipini belirler (Türen, 1998, Albayrak, 2001).

Dökme demirlerde fazlar.

Mikroyapıya duyarlı örnekleme, ayrı tip yapısal bileşiklere sahip farklı tipte dökme demir oluşumuna neden olur. Dökme demirin yapı bileşenleri ve türleri maddelere göre sıralanmıştır. (ASM Handbook, 1988).



Şekil 2. Fe-C diyagramının gösterilişi (ASM Handbook 1988).

Grafit.

Karbon, dökme demirlerde bileşik veya serbest biçimde bulunabilir. Katılaşması ile birlikte; beyaz dökme demire ısıtılarak rozet biçiminde, gri dökme demirde lamel formunda ayrıca dökme demirde düşük oranda Seryum (Ce) ve Magnezyum (Mg) eklenmesiyle küresel şekilde grafitler elde edilir. Gri dökme demirin sünek olmasının sebebi bu grafitli yapısıdır. Temper dökme demirlerin rozet yapısından ve KGDDlerin küresel yapısından dolayı grafitlerin lameller kadar sünekliğe etki ettiği söylenemez (ASM, 1988).

Ferrit.

Ferrit, sertleşmeyi içeren silisyumun fazı ve dökme demirin kendisinin mukavemeti olarak tanımlanabilir. Ferrit, dökme demirlerde tek başına mevcut yapısında ya da perlit içerisinde oluşur. Soğuma hızının yavaş olduğu, dökme demirde bulunan karbonun serbest biçimde oluşabileceği ve bileşiminde grafitleştiricilerin bulunduğu bir yapıda ferritin serbest bir biçimde ortaya çıkma durumu yüksektir (ASM, 1988).

Perlit.

Perlit, bir arada bulunan sementit ve ferrit tabakalarından meydana gelen iki fazın karışımıdır. Oluşan perlitin miktarı grafitleşme derecesiyle ilgilidir. Perlitik gri dökme demirde yaklaşık olarak %0,5 – 0,9 birleşik karbon bulunur. Birleşik karbonun daha düşük oranda olması halinde ise serbest ferritin yüksek miktarda bulunduğu anlamına gelir (ASM, 1988).

Sementit.

Dökme demirlerde demir tamamen ya da kısmen sementit halde bulunabilir. Sementit miktarı arttıkça malzeme çok sert ve gevrek özellikte olur. Dökme demir bileşiminde bulunan karbon miktarınının 15 katı kadar sementit bulunabilir. Fakat böyle bir durum malzemenin hem kırılabilir hem de çok sert bir özellik göstermesine neden olur (ASM, 1988).

Steadit.

Gri dökme demirde bulunan fosfor düşük ergime sıcaklığında (953-982 °C) bir demir (Fe) - demir fosfür (FePO₄) ötektiği olan “Steadit” şeklinde oluşmaktadır ve steadit yaklaşık olarak %10,2- %10,3 aralığında değişen oranlarda fosfor içerebilmektedir. Mevcut yapısı kırılabilir ve çok olması açısından sementit ile benzerlik göstermektedir (Odabaşı, 2004).

Östenit.

Östenit, yüzey merkezi kübik şeklinde olan demir ile karbonun oluşturduğu katılaşma sırasında ortaya çıkan ve yavaş bir şekilde soğuma ile ferrit, perlit ya da her ikisinin oluşturduğu karışıma dönüşen katı bir ergiyik olarak açıklanabilir. Dökme demirlerde kükürten kaynaklı

silikatlar, demir sülfürler (FeS) ve manganez (Mn) gibi ametalik formlar da bulunabilir. Demir sülfür (FeS), gevreklik meydana getiren zararlı bir bileşimdir (Odabaşı, 2004).

Kısaca dökme demirlerde bulunan birçok farklı kimyasal bileşim olduğu anlaşılmaktadır. Fakat bu kimyasal bileşimlerin farklılığı dökme demirlerin yapısını ve özelliklerini etkilemede hiçbir zaman tek başına yeterli değildir. Katılaşma mekanizması, soğuma hızları ve uygulamada değişiklik gösteren dökümhane prosesleri başlıca önemli etkenlerdir (ASM, 1988).

Dökme demir çeşitleri.

Döküm halindeyken dökme demirlerin süneklik özellikleri düşük olduğundan dolayı sıcak ve soğuk işleme şekillendirilemezler. Ancak kolayca ergitilebilirler ve karmaşık şekillerdeki son boyutlarda rahatlıkla dökülebilirler. Dayanıklılık, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direncinin geniş bir yelpazede değişmesi, dökme demirlerin kullanım alanının genişliğine ve sürekli kullanılma durumunu ortaya koymaktadır. Dökme demirlerde karbon (C) ve silisyum (Si) yüzdeleri arasındaki oran değiştirilirse, çeşitli metalik ve ametalik elementler ile alaşımlandırma yapılması ergitme, döküm ve ısı işlem uygulamalarının değiştirilmesi ile; mukavemet, sertlik, işlenebilirlik, aşınma ve korozyon direnci değişik değerlere ulaşır. Üretim esnasındaki soğuma hızı, kimyasal bileşimin çeşitliliği, uygulanan ısı ve sıvı işlemlerinin farklılık göstermesi gibi başlıca etkenlerden kaynaklı olarak dökme demirler çeşitli sınıflara ayrılmıştır.

Dökme demirleri günümüzde endüstride en çok ve yaygın kullanma durumuna göre; gri dökme demir, küresel grafitli dökme demir, beyaz dökme demir ve temper dökme demir olmak üzere dört ana grup şeklinde sınıflandırılır.

Beyaz dökme demir.

Beyaz dökme demirler adından da anlaşılacağı gibi kırıldığında beyaz kristalin bir yüzey gösteren bir dökme demir grubudur. Beyaz dökme demirler, katılaşma sıcaklığından hızlı soğuma ile elde edilen ötektik altı alaşımlardır. Karbonun tümü bileşik sementit (Fe_3C) formundadır. Mikro yapılar sementit ve perlitten meydana gelir. Yapısı içerisinde bulunan sementitten dolayı sert ve aşınmaya karşı mukavemettir. Aşınma mukavemetinin önemli olduğu ve sünekliğin istenmediği durumlarda kullanılır. Alaşımsız beyaz dökme demirler ise genellikle ince perlitik matris sahiptir. Nikel (Ni), Krom (Cr) veya Molibden (Mo) gibi alaşım elementleri ilave edilerek matris martensit (veya beynit) veya östenite dönüştürülür. Beyaz dökme demirde ergiyik haldeki karbon demirle birleşerek sert, gevrek bileşik olan demir karbür veya sementit olarak kalır. Beyaz dökme demir bu nedenle sert ve kırılıgandır ve beyaz kristal

kopma yüzeyi sergiler. Beyaz dökme demir yüksek basma ve mükemmel aşınma özelliğine sahiptir. Krom (Cr) içeriği yüksek beyaz dökme demirler genelde iyi aşınma direnci ve tokluk özelliklerine sahiptir. Bu tip dökme demirler genellikle kaya işleme ekipmanlarında, salyangoz tip pompalarda, çeşitli maden delme ekipmanlarında, tuğla kalıplarında ve benzer alanlarda kullanılır. (Metals handbook, 9th ed. 15 Casting 1988)

Dökme demir malzemelerde Krom (Cr) miktarı arttıkça tokluk oranı da yükselir. Tokluk, öğütme ve kırılma işlemlerinde kazaları önlediği için yüksek öneme sahiptir. Kromu yüksek beyaz dökme demirler yüksek aşınma direncinden dolayı yaygın olarak kullanılırlar. Aşınmaya dayanıklı ticari bir malzeme olan beyaz dökme demir, sanayide 100 yılı aşkın üredir kullanılmaktadır. Bu malzemenin yaygın olarak kullanılması, üretim ve alarım değerlerinin iyileştirilmesiyle artmıştır. Krom karbür (Cr_3C_2) oranı arttıkça beyaz dökme demirin mekanik dayanımının ve aşınma direncinin arttığı gözlemlenmiştir. (ASM Specialty Handbook 1996, Bilici, 2004).



%4 Nital

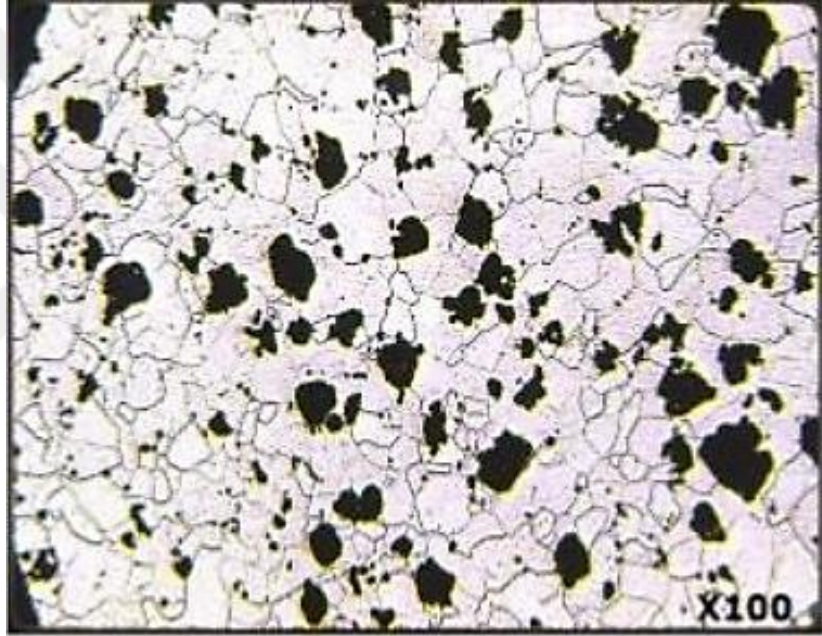
150X

Şekil 3. %4 Nital ile dağlanmış 150 x büyütmede beyaz dökme demir mikroyapısı (Cavcar, 1996).

Temper dökme demir.

Az karbonlu çeliklerin özelliklerini gösteren ve beyaz dökme demirin ısıl bazı işlemlerden geçirilmesi sonucunda üretilen dökme demir türüdür. Beyaz dökme demirlerin, dökümden sonra özel yumuşatma tavlamaşı yapılmasıyla elde edilen yeni özellikleri, temper

dökme demir olarak ayrı bir grup içerisinde ele alınmalarına, olanak tanımıştır. Temper dökme demirin, beyaz dökme demirden üretildiğini, yukarıda belirtilmiştir. Eğer, iç yapısında yüksek oranda karbon (yaklaşık %3-3,5) bulunan beyaz dökme demir, uzun süre yüksek sıcaklık ve oksitleyici ortamda tavlınırsa, temper döküm hâlini alır. Özellikle yüzeye yakın yerlerde (4 mm) bu durum, daha bariz olarak ortaya çıkar. Çünkü yüzeye yakın yerlerdeki karbon miktarı, oksitleyici ortam ve sıcaklığın etkisiyle yanarak azalır ve homojen olmayan bir yapıya sahip olur. Yüzeye yakın yerlerdeki karbonun az olması, iç kısımlarda ise fazla olması, dökme demirin homojen bir yapıda olmasını engeller. Daha düşük oranlarda karbona sahip olan (%2,5-3) beyaz dökme demirde ise, yüksek sıcaklıkta ve nötr ortamda bekletilmesiyle netice alınır. İç yapı olarak homojenlik söz konusudur. (Erdoğan, 2000; Ersümer & Uzunona, 1971, Bilici, 2004)



Şekil 4. 100 x büyütmede çekilen temper dökme demir mikroyapısı (Yıldız, 2014).

Gri dökme demir.

Ucuz ve kullanıma hazır olduğundan dolayı dökme demirler içerisinde en yaygın kullanımda yer alan dökme demir türüdür. Genellikle otomotiv endüstrisindeki motor bloğu içerisinde yer alan piston, segman ve gömlek yapında kullanılırlar. Yapısındaki karbonun çoğu serbest grafit lamelleri şeklinde yer alır. Ötektik üstü demirlerdir. Karbon oranı %2,5-4 arasındadır. Grafit şekline ve döküm yapısına bağlı olarak gri dökme demirlerin özellikleri değişmektedir. Grafit-ferrit karışımı bir mikro yapı en yumuşak ve en düşük mukavemetli gri dökme demiri verir. Karbon miktarının artmasıyla birlikte malzemenin mukavemet ve sertliğinde artma görülür. Gri dökme demirler çok değişik özellikler göstermelerinden dolayı mühendislik alanında birçok uygulama sahası bulmuştur. En önemli özelliklerinden birkaçı,

yüksek mukavemet göstermesi, titreşim sönümlenme özelliğinin yüksek olması ve ucuz olmasıdır (Riahi & Alpas 2003).

Küresel grafitli dökme demir.

Dökme demirler içerisinde en çok tercih edilen dökme demir türüdür. Kolay işlenebilen bir malzeme olması, süneklik yönünden ve akma dayanımı yönünden çelik gibi yüksek mukavemetli olması sebebiyle yoğunlukla kullanılan malzeme türüdür. Karbonun grafit küreler halinde bulunduğu dökme demir grubudur. Aynı zamanda nodüler dökme demir ve sfero dökme demir olarak da adlandırılır. Karbonun lamel yerine küre şeklinde oluşumunu sağlamak için dökme demir, dökümden önce aşılama işlemine tabi tutulur. Bu aşılama işlemi için ergimiş dökme demire az miktarda Magnezyum (Mg) veya Seryum (Ce) katılır. Grafit şeklinin yaprak yerine küre şeklinde olması dökme demire mukavemet ve süneklik kazandırır. Genel olarak lamel grafitli dökme demir ile KGDD arasında bileşimleri açısından önemli bir fark yoktur. Fakat özellikleri, kullanım alanları ve amaçları bakımından büyük farklılıklar içerir. KGDD'ler, lamel grafitli dökme demirlerin başlıca avantajları olan düşük ergime derecesi, iyi akışkanlık ve iyi işlenebilirlik özelliklerine sahip olmasının yanı sıra çeliğin mühendislik açısından avantajı olan yüksek mukavemet, süneklik ve tokluk gibi özelliklere de sahip olmaları dökme demirler grubu içerisinde en çok tercih edilmelerine neden olmaktadır. KGDD çok yerde gri dökme demir, dökme çelik ve demir olmayan metal alaşımlarının yerine kullanılmaktadır. KGDDler Türk standartlarında Küresel grafitli dökme demir ve rumuz olarak GGG adıyla kullanılır. (Toptaş, 2009). Birçok ülkede nodular cast iron, ductile iron, kufelgraphit gusseisen, spherogus, fonte spheroide graphit adlarıyla bilinmektedir (Erdoğan, 2000, Ersümer & Uzunova 1971, ASM Specialty Handbook, 1996, Bilici, 2004).

Küresel Grafitli Dökme Demir

20. Yüzyılın ilk yarısı, dünya savaşlarının yaşanması sebebiyle, lamel grafitli olarak anılan gri dökme demir ve temper dökme demir üretiminde önemli gelişmelerin yaşandığı yıllar olarak görülmektedir. Bu savaş yıllarında ülkelerin silahlanma çabaları neticesinde demir-çelik endüstrisinde ilerlemeler yaşanmıştır. Bu dönemde yaşanan ilerlemeler özellikle dökme demir alanında değil malzeme özelliklerinin belirlenmesi alanlarında da önemli gelişmeler sağlanmıştır. 1. Dünya Savaşı esnasında İngiltere'nin hava kuvvetleri biriminde mühendis olarak çalışan A.A. Griffith, malzeme içerisinde bulunan çatlakların malzemeleri nasıl gevrek hale getirdiği üzerine bir teorem geliştirmiştir (Griffith, 1921). Bu teorem ile KGDD'nin keşfinin ilişkili olduğu düşünülmektedir. Bilindiği üzere gri dökme demir lahana yaprağı şeklinde lamel yapıdadır. Gri dökme demirlerin mikroskop altında incelendiği zaman bu yaprakların uçlarının sivri olduğu görülmektedir. İşte o dönemde yaşayan mühendisler

yaprakların sivri uçlarının kırılmalığa sebep verip vermediğı hakkında tartışmışlardır. Hal böyleyken daha sünek, daha mukavemetli bir malzemenin keşfi için neler yapılması gerektiğı çalışmaları kendiliğinden başlamıştır (Çetin, 2016).

İngiliz Henton Morrogh, AFS kongresinde 1948 yılındaki Cast Iron Association kongresine katılmış ve yaptığı sunumda dökme demir içerisine bir miktar Seryum (Ce) eklenerek grafit yapraklarını küreselleştirmeyi başardığını belirtmiştir. Böylelikle resmi olarak KGDD'nin üretilebildiğinin ilk belgesidir. (Çetin, 2016).

İngilizler bu duyuruyu yaptıklarında Amerikalılar KGDD'nin icadını kendilerinin yaptığını dünyaya duyurmak adına patentini almışlardır. Bu patent başvurusu 25 Ekim 1949 tarihinde kabul edilmiş ve KGDD'nin patentini alan bilim insanları olarak Keith D. Millis, Albert P. Gegnebin ve Norman B. Pilling'in isimleri tarihe geçmiştir (Çetin, 2016).

Küresel grafitli dökme demirin genel özellikleri.

Aşınma direnci.

KGDD'lerin en karakteristik özelliklerinden aşınma dirençlerinin çok iyi olmasıdır. Aşınma dirençleri gri dökme demire eşittir. Bu özelliğinden sebep birçok endüstriyel uygulamada kullanılmaktadır. Çelikle kıyas yapıldığında aynı sertlik değeri göz önüne alındığında KGDD'nin aşınma direncinin çok daha üstün olduğu görülmektedir. (Ekinci, 2009).

Süneklik.

Gerilim altındaki test malzemelerinin uzama ve kopmasını tarif eden süneklik kısmen çelikten daha düşük ölçülmektedir. Gri dökme demirlerde lamel şeklindeki grafit yapısı süneklığe olumsuz etki etmektedir. Temper dökme demirler %18'e varan uzama sergileyebilirler. Bu yönüyle sünek malzemeler sınıfındadırlar. KGDD'ler ise tok malzeme olduklarından dolayı diğer demir türlerine göre daha iyi sünek ve dayanım oranına sahiptirler (ASM, 1990).

Darbe direnci.

KGDD'lerin ferritik cins olanlarında maksimum darbe dayanımı elde edilmektedir. Çentik darbe deneyinde bu dayanım 20 joule olarak ölçülmüştür. Titreşim sönümlenme ve düşük sıcaklıkların istendiğı sektörlerde darbe direnci yeteneğinden dolayı KGDD'ler önemli yer edinirler (ASM, 1988).

Mukavemet.

KGDD'nin mukavemeti grafit matris yapısına bağlıdır. Gri dökme demire göre KGDD'ler beş kat kadar daha dayanıklıdır. Aynı ferrit yapısına sahip KGDD ile temper dökme

demirin mukavemeti kıyaslandığında KGDD'nin 1,5 kat daha mukavemetli olduğu görülmüştür (Gül, 1989).

Basınca dayanım.

Basınca dayanım konusunda yüksek özellik gösterdiklerinden dolayı KGDD'ler birçok alanda kullanılmaktadırlar. Ayrıca çeliğe göre daha kolay işlenebilmesi ve daha yüksek ısı dayanımını yönünden KGDD'ler daha üstündür. (Ekinci, 2009).

Korozyon direnci.

%2,14'ten fazla C içeren demir alaşımları dökme demir olarak tanımlansa da, ticari olarak dökme demirler bazı alaşım ilavelerinin yanı sıra yaklaşık %3,0-4,5 C içerir. Bu C muhtevasına sahip alaşımlar çeliklerden daha düşük sıcaklıklarda erimektedir, yani döküm işlemine cevap vermektedirler. Dolayısıyla döküm, bu alaşımlar için en çok kullanılan imalat tekniğidir. Dökme demirler, yapılarına bağlı olarak beş gruba ayrılabilir. Bunlar; beyaz dökme demir, temper dökme demir, gri dökme demir, KGDD ve kompakt grafitli dökme demirdir (ASM, 1988).

Besleyici Tasarımı

Parça üretimi döküm yöntemiyle birçok aşamalı süreçten oluşmaktadır. Bu sürecin ilki kalıbı ve gerekli özellikleri sağlayan alaşımın tasarlanmasıdır. İkinci aşama ise ergiyik döküm alaşımın kalıp boşluğunun tamamını dolduracak şekilde ilerlemesini sağlayacak yolluk ve besleyici tasarımının yapılmasıdır. Kalıplama tasarımı parça, yolluk ve besleyicinin tamamını ifade etmektedir. Kalıplama tasarımında önem arz eden dört önemli kriter bulunmaktadır. Bir parçanın kalıplama tasarımı aşamasında dikkat edilmesi gereken 4 önemli kriter vardır (Kayıkçı & Akar 2007, Kayıkçı 2008).

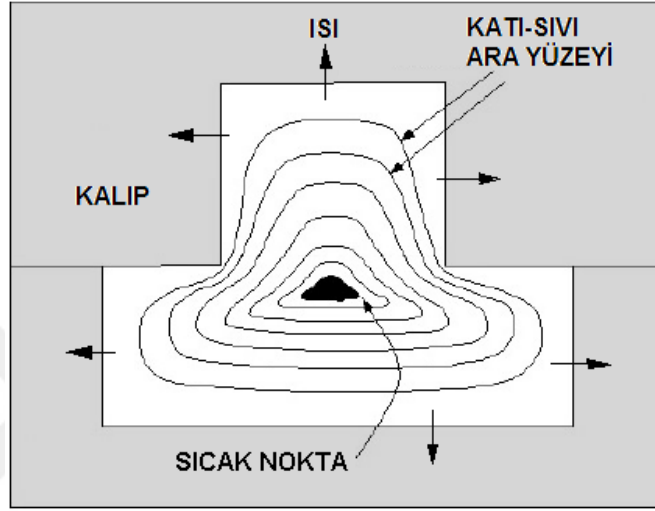


Şekil 5. Döküm parçanın modellenme aşamaları (Arda & Kayıkçı, 2006).

Sıcak nokta kriteri.

Sıcak nokta; diğer bir deyimle yalıtılmış bölge, katılaşma esnasında çevresi katı metal ile çevrelenmiş bir sıvı bölgesi olarak tanımlanabilir. Besleyici tasarımına başlarken kaç tane

izole olan sıcak nokta olduğunun belirlenmesi gerekmektedir. Sıcak nokta kriteri hem besleyici sayısının tespiti hem de besleyici yerlerinin tespitinde en çok dikkat edilmesi gereken husustur. Farklı kesit kalınlıkları içeren döküm içerisinde birden fazla izole sıcak nokta oluşabilir. Sıcak noktalar mümkünse soğutucu kullanılarak mümkün değilse besleyiciyle takviye edilmesi gerekmektedir. Bu kriterin uygulanmasıyla döküm parçada sıcak nokta oluşmaması, sıcak noktaların yalnızca besleyici üzerinde kalması mümkün kılınabilir (Kayıkçı & Akar 2007, Kayıkçı, 2008, Arda ve Kayıkçı, 2006, Franssman, 2007).



Şekil 6. Sıcak nokta oluşan bölgenin şematik gösterimi.

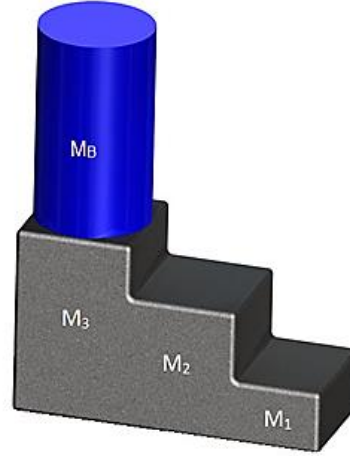
Katılma zamanı (modül) kriteri.

Katılmanın besleyicilere doğru ilerlemesi ve besleyicilerde sonlanmasına yönlendirilmiş katılma adı verilmektedir. Kum kalıba dökümlerde, hesaplanması istenilen bir kesitin katılma süresi o kesitin hacmini yüzey alanına oranlayarak hesaplayan Chvorinov yaklaşımı (eşitlik 2.1) ile hesaplanmaktadır. Buna göre;

$$t = k(V/A)^2 \quad (2.1)$$

Burada t, süre (dakika): V, hacim (döküm parçasının): A, yüzey alanı (döküm parçasının kalıpla temas ettiği alanı) k, değişkenlik sabiti (kalıp malzemesi ve döküm alaşımına göre değişen sabitlik sayısı)ni ifade etmektedir. Tasarımda besleyici modül, döküm modelinden daha büyük olmalıdır. (V/A) faktörü, "modül" (M) olarak adlandırılmaktadır. Uygun bir tasarımda besleyici modülünün döküm modülünden büyük olması gerekmektedir. Böylece besleyicinin kendisine en yakın sıcak noktadan daha geç katılması sağlanmaktadır. Bu kriter genellikle eşitlik 2.2 ile ifade edilmektedir. (Kayıkçı & Akar 2007, Kayıkçı, 2008, Arda & Kayıkçı 2006, Franssman, 2007, Chvorinov, 1940).

$$(V/A)_{\text{besleyici}} > (V/A)_{\text{döküm}} \quad (2.2)$$

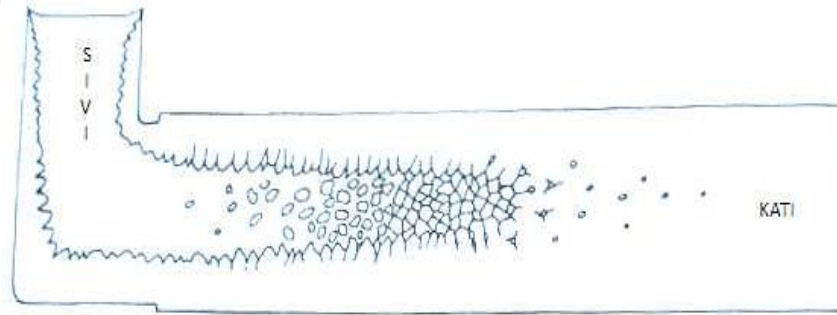


$$M_B > M_3 > M_2 > M_1$$

Şekil 7. Katılma zamanı (Modül) kriteri.

Besleme yolu kriteri.

Besleyiciden sıcak noktaya sürekli akış sağlayacak bir besleme yolu bulunması gerekmektedir. Bu yol kapandığı takdirde sıcak noktanın beslenmesi engellenir (Kayıkçı & Akar 2007, Kayıkçı, 2008, Arda & Kayıkçı, 2006, Franssman, 2007).



Şekil 8. Katılma dökümde besleme mekanizmaları (Campbell, 1991).

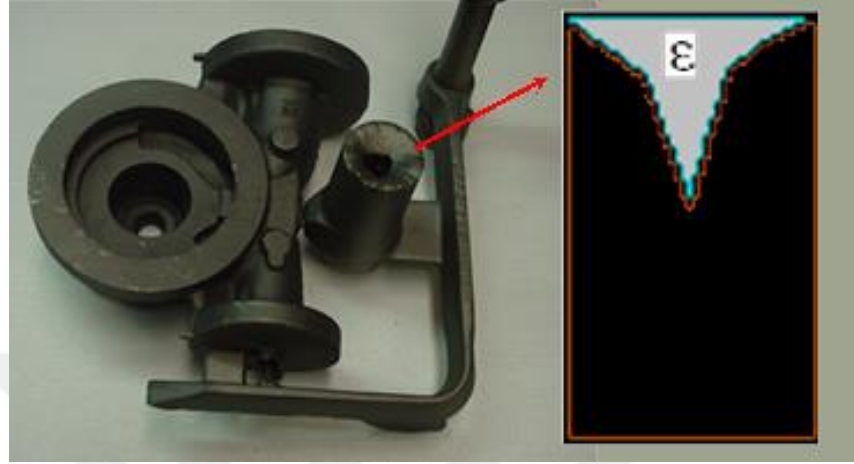
Besleyici hacim gereksinimi.

Genel olarak büyük döküm alaşımları katılma ve soğuma sırasında küçülmektedirler. Bu hacimsel çekme olayı neticesinde en son katılma döküm parça bölgelerinde bir miktar boşluk kalmaktadır. Boşluksuz bir döküm için besleyicinin asgari metal miktarını belirleyen bağıntı Eşitlik 2.3'te verilmektedir.

$$V_b = \alpha V_d / \epsilon - \alpha \quad (2.3)$$

Tek besleyici kullanıldığında V_b , gereken besleyici hacmini, V_d , döküm parçanın hacmini, α , döküm alaşımın yüzdesel olarak hacimsel çekme oranını ifade eder. Birden fazla

besleyici kullanıldığında ise V_b , belirli bir besleme alanı için gereken besleyici hacmini, V_d besleyici bağlanacak alanın hacmini ifade eder. ε ise besleyici verimi olarak tanımlanabilir ve besleyici hacminin yüzdesel olarak harcadığı besleme alaşımıdır. Besleyicinin toplam hacminin % olarak harcayabildiği besleme metalidir ve “besleyici verimi” olarak tanımlanabilir (Kayıkçı & Akar 2007, Kayıkçı, 2008, Arda & Kayıkçı, 2006, Franssman, 2007).



Şekil 9. Besleyici veriminin şematik gösterimi (<http://www.finitesolutions.com/> Mayıs 2019).

Döküm Simülasyonları

İdeal bir döküm elde etmek için kalıplama tasarımının yukarıda açıklanan kriterlerinin tamamının sağlanması gerekmektedir. Yolluk besleyici tasarımı farklı kesit alanlarına sahip ve karmaşık geometrik yapıda olan döküm parçaları için oldukça zordur ve bunu tasarlamak yüksek mühendislik bilgisi gerektirmektedir. Bilgisayar teknolojisindeki gelişmelerle döküm imalatlarının simülasyon programlarıyla modellenmesi ve üretime geçmeden önce ilerde yaşanabilecek sorunların önemli ölçüde tahmin edilmesi sağlanmaktadır (Kayıkçı, 2008).

Döküm simülasyon programları sayesinde deneme yanılma kaybı ortadan kalkmaktadır. Döküm kalıplama tasarımını optimum şekilde yapılmasına olanak sağladığından dolayı hızla yaygınlaşan bir teknoloji olmuştur. Döküm simülasyonları kalıp doldurulurken ve dolduktan sonra kalıp içerisinde neler yaşandığı hakkında doğru ve hızlı tahminler yapılmasını sağlayan matematiksel bir yöntemdir. Döküm simülasyon programlarından bazılarında yaygın olanları: MagmaSoft, SolidCast, ProCast, Pam-Quick Cast, Nova Flow&Solid ve Vulcan (Arda ve Kayıkçı,2006). Döküm simülasyonları deneme yanılma yöntemini ortadan kaldırarak zaman, maliyet, hurda ve boşuna kalıp hazırlama durumlarını ortadan kaldırmaktadır. Simülasyon kullanarak üç boyutlu katı model üzerinde, hangi ebatta kaç adet besleyicinin gerekli olduğu belirlenir ve yolluk, besleyici tasarımı yapılabilmektedir. İstenen parçanın simülasyonu yapılarak çekinti oluşumu ve katılma gibi değerler gözlemlenebilir. Tüm bu sonuçların

gözlemlenmesiyle şayet gerekiyorsa olası en iyi ve ekonomik döküm için revizyon yapılarak tekrar simülasyon demesi yapılabilir. Ayrıca revize simülasyon optimum kalitede olacak şekilde bilgisayar tarafından otomatik olarak yaptırılabilir. Özetle tüm bunların hepsi kısa sürede yapılabilir bu sayede yüksek verim, tek seferde üretim, yüksek kalite, zaman tasarrufu ve düşük maliyet sağlanır (Arda & Kayıkçı, 2006).

Döküm simülasyonlarında tanımlanan parametreler.

Tüm alaşımların dökümü döküm simülasyon programlarıyla tasarlanabilir. Dökümhane ortamındaki tüm parametreler programa tanımlanabilir. Dikkat edilmesi gereken husus gerçek dökümhane ortamının tüm verilerin programa girilmesidir. Çünkü döküm ve katılaşma işlemi bu verilerden etkilenmektedir ve bu parametrelerin eksik ya da yanlış girilmesi sonuçların yanlış çıkmasına sebep vermektedir.

Simülasyon programlarındaki parametreler maddeler halinde incelenecek olursa (Kayıkçı & Akar, 2010).

1. Döküm sıcaklığı,
2. Yolluk ve meme bağlantılarının yerleri,
3. Isı transfer katsayıları,
4. Kalıp malzemesi seçimi, kokil, kum vb.,
5. Kokil kalıplardaki ön ısıtma ve çevrim sayısı değerleri,
6. Kullanılacak döküm boşluğunun koordinatları ve derece boyutları,
7. Yolluk sistemi kesiti ve akış parametreleri,
8. Filtreler ve akış ölçerler,
9. Termokopullar ve bağlandıkları yerler,
10. Döküm yöntemi seçimi, alçak basınç, hassas döküm, yüksek basınç, gravite v.b.,
11. Kalıplamada kullanılan soğutucular, yalıtım ve ekzotermik gömlekleri,
12. Cüruf Partikülleri,
13. Dökülecek alaşım malzemesi ve özelliklerinin seçimi,
14. Kaplamalar; ısı iletim katsayıları ve kalınlıklarıyla birlikte,
15. Kokil kalıplarda soğutma ve ısıtma kanalları,
16. Kalıp Malzemesi içinde ısı akışını kontrol eden özellikler,
17. Yolluk sistemi kesiti ve akış parametreleri,
18. Termokopullar ve bağlandıkları yerler,

Şeklinde görülmektedir. Bunların içinde malzeme ve malzemenin özellikleri seçimi oldukça detaylıdır ve genellikle aşağıdaki maddeleri kapsar. Bunlar; (Kayıkçı & Akar, 2010).

- Kalıp Malzemesi içerisinde ısı haritasını kontrol eden değerler
 - Yoğunluk değerleri
 - Özgül ısı değerleri
 - Isı iletkenlik katsayıları değerleri
 - Başlangıç sıcaklığı
- Döküm Alaşımaları;
 - Katılaşma eğrisi
 - Ergime gizli ısısı
 - Katılaşma aralığı
 - Çekinti eğrisi değerleri.
- Isı Transfer Katsayıları Malzemeler Arası Isı Akışını Kontrol Eder
 - Soğuma kanalları
 - Hava boşlukları (air-gap)
 - Kalıp kaplamaları
 - Yayınım, ışınım değerleri (Kayıkçı & Akar, 2010)

Döküm simülasyonlarının kullanım faydaları.

Yüksek kaliteli ve maliyeti düşük parçalar üretilir. Tek seferde başarılı üretim yapılır. Gereksiz hurda oluşumunun önüne geçer. Döküm parça tasarım süresi kısa sürer. Simülasyon sonuçlarına dayanarak mümkün olan en iyi ve ucuz döküm için revizyon yapılabilir. Optimum yolluk sisteminin tasarlanması sağlanır. Tasarlanan parçanın simülasyonu ile çekinti oluşumu, katılaşma, döküm gibi birçok sonucun görüntülenebilmesi gerçekleşir. Muhtemel simülasyonlar oluşturularak malzeme ve modellerin ne tepkiler verdiği görüntülenir böylelikle hangi durumda ne sonuçlar çıkarıldığı gözlemlenerek personelin eğitimi de sağlanmış olur. Döküm aşamaları tasarım aşamasında fark edilir. Teslimat gecikmeleri önlenir böylelikle müşteri ilişkileri olumlu etkilenir ve pazar payı geliştirilir. Tasarım aşamasına kaç adet ve hangi ebatta besleyicinin gerektiği belirlenebilir (<http://www.finitesolutions.com/> Mayıs 2019).

Küresel Gرافitli Dökme Demirlerde Besleyici Tasarımı

Yolluk besleyici tasarımı özellikle karmaşık şekil ve farklı kesit kalınlıklarına sahip döküm parçaları için oldukça zordur. Mühendislik bilgi ve becerisi gerektirmektedir. Döküm simülasyon programları sayesinde bilgisayar teknolojilerindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak döküm proseslerinin modellenmesi, üretilmek istenen parçaya ait optimum besleyici tasarımı oluşturulabilmektedir (Kayıkçı, 2008). Döküm simülasyon programları; dökümhanelerde kullanımı hızla yaygınlaşan bir teknoloji olarak döküm kalıplama tasarımını

kolay, ekonomik ve doğru yapabilmeye olanak sağlayarak deneme ve yanılma maliyetini ortadan kaldırmaktadır.

Dökme Demirlerde Besleyici Tasarımı

Farklı kesit kalınlıkları ve karmaşık geometri yapısına sahip döküm parçalarının yolluk besleyici tasarımı oldukça zordur. Yoğun mühendislik bilgi ve becerisi gerektirir. Bilgisayar teknolojisindeki hızlı gelişmelere bağlı olarak dökümün modellenmesi, döküm makro ve mikro yapılarının önemli ölçüde ön görülebilmesi döküm simülasyon programlarıyla sağlanabilmektedir (Kayıkçı, 2008).

Döküm simülasyonları 1990'ların başından beri kullanılmaya başlanılmış olan bir teknolojidir. Ülkemizde simülasyon teknolojisi kullanan dökümhane sayısı son yıllarda hızla artmıştır. Döküm simülasyonları 3 boyutlu döküm geometrisi üzerinde gerekli ısı ve kütle transferi denklemlerini sonlu fark veya sonlu elemanlar yöntemi ile çözerek dökümhane ortamında gerçekleşen termo-fiziksel olayları sayısal ortamda çözümleyen modelleme araçlarıdır. Döküm modellemelerinde esas hedefler şunlardır:

- a. İlk dökümden itibaren seri üretim süresince döküm parçasının kalitesini yüksek tutmak.
- b. Yeni bir döküm parçanın üretime giriş süresini en aza indirmek.
- c. Metal ergitme, temizleme ve dökme maliyetlerini düşürmek.
- d. Sorunları deneme yanılma yöntemine başvurmadan hızlı bir şekilde gidermek (Kayıkçı, 2010).

Dökme demirlerin besleyici tasarımı döküm simülasyon programlarında genel hatlarıyla;

- 1- Döküm parçasının sıcak noktaları ve bu bölgelerin modüllerinin tespiti.
- 2- Dökülecek alaşımın kalıp rijitliği, kimyasal bileşimi, döküm parça modülü ve döküm sıcaklığı gibi faktörlere bağlı olarak çekme zamanı, net genişleme veya çekme oranlarının hesaplanması.
- 3- Eğer gerekiyorsa hesaplanan değerlere göre gereken besleyicinin yerinin, hacminin ve sayısının belirlenmesi.
- 4- Tasarımın tamamlanarak sonuçların değerlendirilmesi aşamalarından oluşmaktadır (Schmith, 2007; Meredith, 2008).

Parça üretmek için besleyici tasarımının uygun olması hangi dökme demirin kullanılacağından daha önemlidir. Sağlam döküm elde etmek için temel tasarım kriterleri

sağlanmalıdır. SolidCAST döküm simülasyonu için besleyici tasarım adımları aşağıda sıralanmaktadır.

1.Adım: Döküm modeli CAD programında katı model haline getirilerek henüz besleyici ve yolluk olmaksızın kalıp içinde doğal katılma yönlenmesini belirlenmesi için simülasyon yapılır.

2.Adım: İlk simülasyondan elde edilen veriler sonucunda döküm kesitlerinde görülen sıcak noktalar ve bu sıcak noktaların modül değerleri tespit edilir.

3.Adım: Dökme demirlerin özellikleri, parça modülü, kimyasal bileşim, kalıp içindeki sıcaklık, kalıp malzemesi sağlamlığı gibi faktörlere bağlı olarak çekme yüzdesi, net genleşme veya çekme zamanı değerleri hesaplanır. Bu hesaplamalar için program veri tabanında bulunan VDG ve nomogramlarından faydalanılır.

4.Adım: Besleyicilerin sayıları ve yerleri en verimli çalışacakları şekilde belirlenir. Bunun için, yollukları besleyicilerin kenarından bağlamaktır. Eğer besleyiciler üstten bağlanacaksa yalıtıcı ya da ekzotermik kılıflar kullanılarak ya da yollukları besleyiciye mümkün olan en yakın yerlerden bağlayarak besleyici verimi artırılır.

5.Adım: Koşullara göre besleyicilerin verimi değişkenlik göstermektedir. Sıcak bölgedeki besleyicilerin verimi %20 iken, soğuk besleyicilerin verimi %14'lere kadar çıkabilmektedir. Yalıtıcı kılıf kullanarak bu verim koşullara da bağlı olarak %35 seviyelerine çıkabilmektedir. En fazla mini ekzotermik besleyicilerde bu oran %70 seviyelerindedir.

6.Adım: Gerekli besleyicinin hacmi besleyici verimine bağlı olarak, Eşitlik 2.4 ile şu şekilde bulunabilir:

$$V_f = (V_c \times S) / X \quad (2.4)$$

(Schmith, 2007; Meredith, 2008).

Bu formülde V_f gerekli besleyici hacmi, S besleme ihtiyacı, V_c döküm hacmi ve X besleyicinin verimidir.

7.Adım: Sıvı çekmenin tamamlandığı noktada besleyici boğazı katılma garantisi edecek ve genleşmeyi kontrol altında tutarak çekme oluşumunu önleyecek şekilde boyutlandırılmalıdır. Bu Eşitlik 2.5 ile ifade edilmiştir:

$$M_n = / 100 \times M_c \quad (2.5)$$

(Schmith, 2007; Meredith, 2008).

Burada M_n besleyici boğaz modülü, ST çekme zamanı, M_c döküm modülüdür.

8.Adım: Besleyici modülü çekme periyodu süresince yeterli sıvı metal ihtiyacını karşılamalı ve boğaz modülünden %20 daha büyük olmalıdır.

$$M_r = 1,2 M_n \quad (2.6)$$

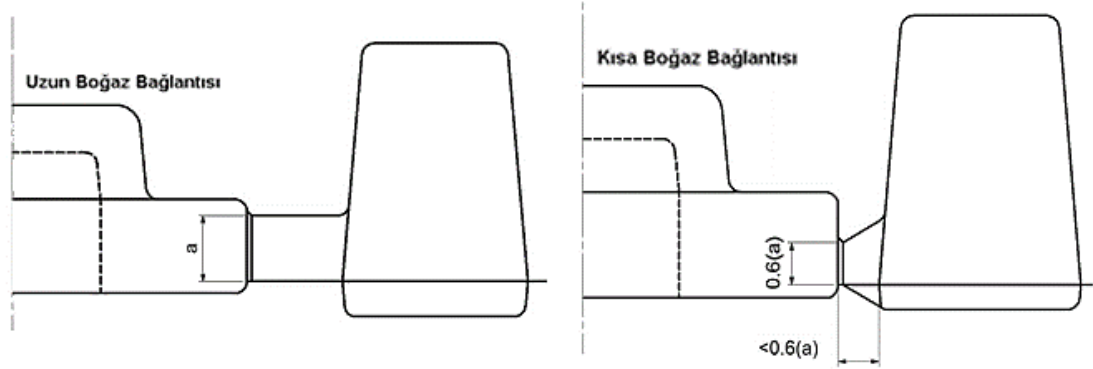
(Schmith, 2007; Meredith, 2008).

$$M_r = 1,2 x / 100 x M_c \quad (2.7)$$

(Schmith, 2007; Meredith, 2008).

Eğer besleyici, modül ihtiyacını karşılamayıp, sıvı metal ihtiyacını karşılıyorsa, modül ihtiyacını karşılayacak kadar artırılmalıdır.

9.Adım: Besleyicinin döküme çok yakın olduğu durumlarda kalıpla döküm arasındaki aşırı ısınma boğaz modülünün 0,6 katsayısıyla çarpılarak azaltılır. Kısa boğazlarda besleyici ve döküm arasındaki mesafe en az besleyici boğazının minimum ölçüsü kadar olmalıdır.



Şekil 10. Farklı besleyici boğazı bağlantıları.

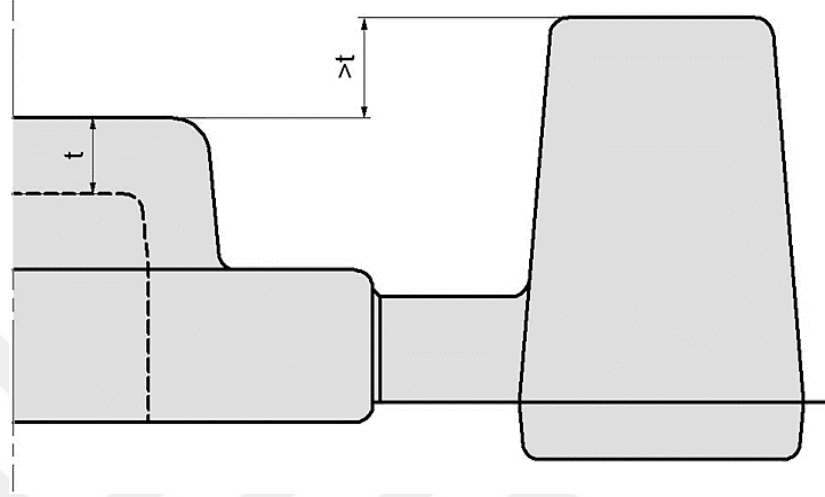
10.Adım: Kaç adet besleyicinin gerektiği tespit edilmelidir. Bunun için kural; döküm içerisindeki her bir besleme bölgesi için birer adet besleyici kullanılmalıdır. Eğer bir sıcak nokta için birden fazla besleyici kullanılırsa bir besleyicide çekinti olur diğerlerinde olmaz.



Şekil 11. Gereksiz besleyicilerin çekme yapmadığına ilişkin döküm örnekleri.

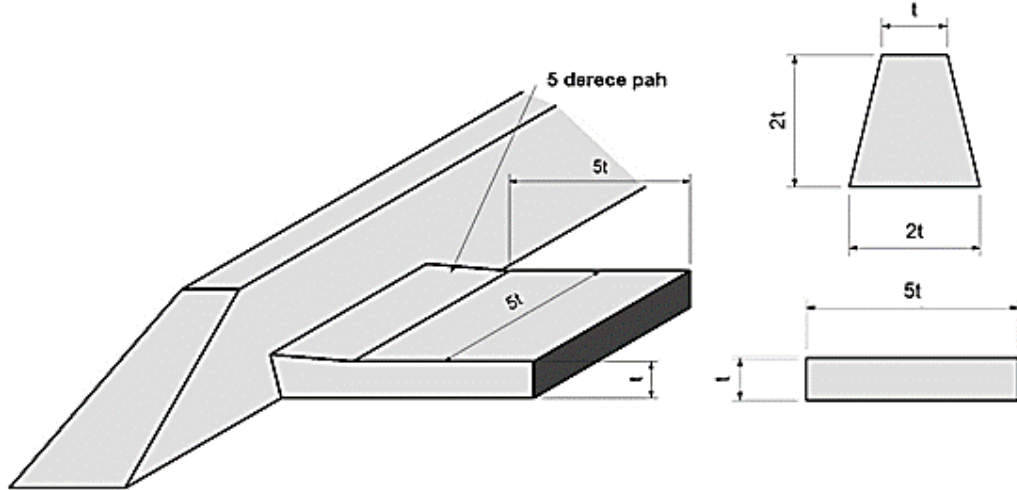
11.Adım: Döküm içerisindeki sıcak noktaların yeri ve büyüklüğü hesaplanırken kalıbın, ısı dağılımı, dolun esnasındaki sıcaklık dağılımı, soğutucular yoluyla ısının atılması, gibi durumları da hesaba katılmalıdır.

12.Adım: Besleyicilerin en üst noktası döküm parçanın en üst noktasından en az döküm parçanın en ince kesitli yerin kalınlığı kadar yukarıda olmalıdır.



Şekil 12. Gerekli besleyici yüksekliği.

13.Adım: Yolluklar sıvı metalin kalıbı doldurmasını tamamladıktan sonra hemen katılaşacak şekilde tasarlanmalıdır. Genelde bunu sağlamak için 5:1 oranı kullanılır. Burada asıl amacımızın genişleme basıncının kontrolü olduğu unutulmamalıdır.



Şekil 13. Dökme demir dökümleri için önerilen tipik yolluk ve meme boyutları.

İKİNCİ BÖLÜM

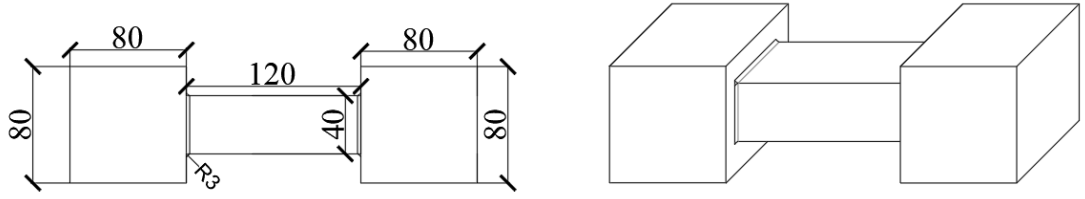
Materyal ve Metod

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalar detaylı bir şekilde açıklanacaktır. Deneysel çalışmalar genel olarak model tasarım ve model imalatı, kalıplama ve döküm deneyleri, metalografik hazırlık ve mikro yapı imaj analiz incelemeleri, modelleme çalışmaları olarak dört ana başlık altında toplanmıştır.

Tasarım çalışmaları kapsamında döküm deneylerinde kullanılacak model geometrisi, kalıplama tasarımı açıklanmıştır. Farklı kesit kalınlıkları içeren model tasarlanmış ve değişen dökümhane şartlarına bağlı olarak yandan ve üstten olmak üzere tek ve çift besleyicili şekilde farklı kalıplama tasarımları hazırlanmıştır. Tasarlanan döküm geometrilerinin modelleme çalışmaları yapılmıştır. Kalıplama ve döküm deneyleri ticari olarak faaliyet gösteren 2 farklı firmada yaş kalıp ve reçineli kalıp olarak hazırlanmış ve GGG60 alaşımı ile dökümleri gerçekleştirilmiştir. Döküm sonrası numuneler mikro yapı incelemeleri için kesme, metalografik olarak hazırlama süreçlerinden geçirilmiş ve imaj analiz sistemi ile değerlendirmeleri yapılmıştır. Ayrıca döküm numuneler makro inceleme, penetrant testleri ve modelleme sonuçlarının değerlendirilmesiyle karşılaştırılmıştır.

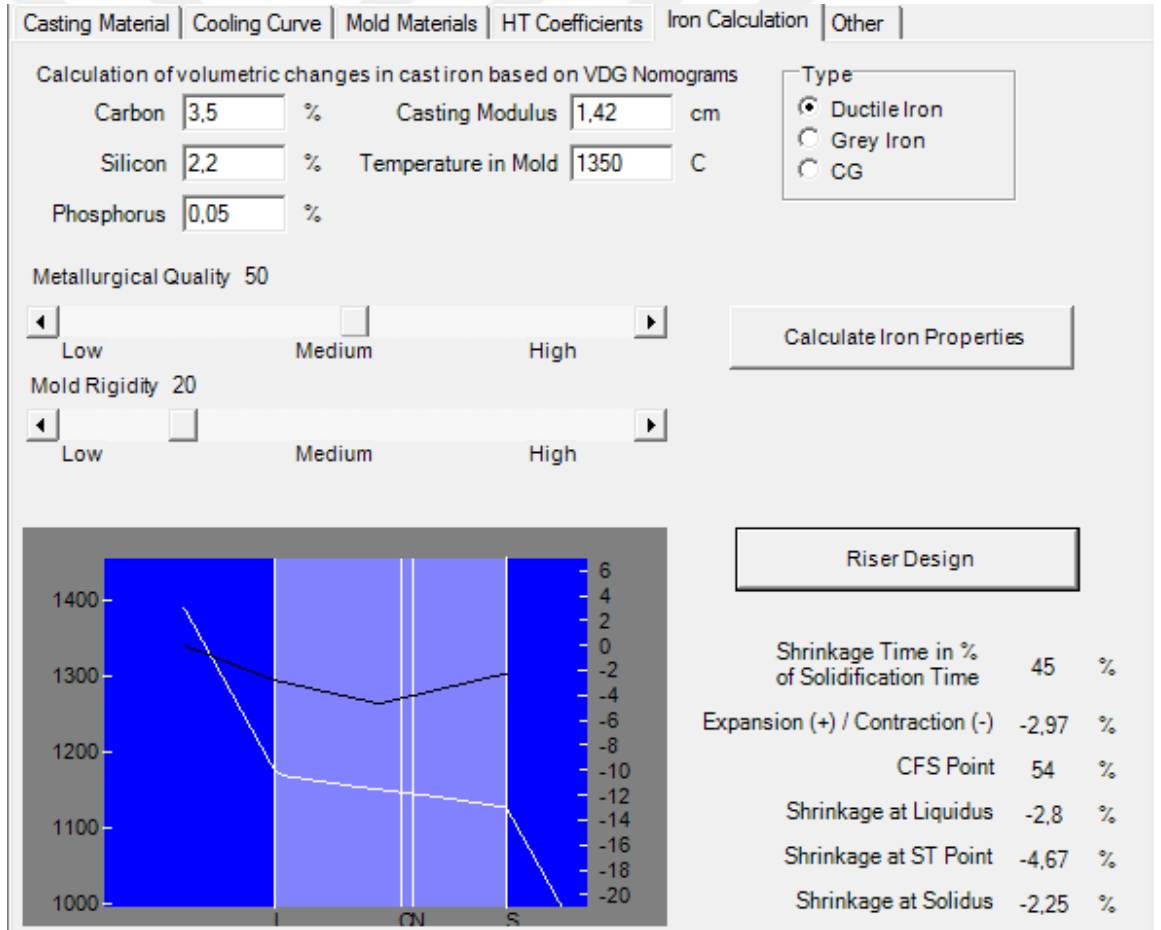
Model ve Besleyici Tasarımı

Dökme demirlerin katılaşmasında hacimsel olarak çekinti ve genişleme bir arada görüldüğünden besleyici tasarımı oldukça zordur. Ayrıca hacimsel değişim model geometrisi ve katılaşma zamanına (modül) ve dökümhane şartlarına göre değişkenlik göstermektedir. Bu sebeple döküm deneylerinde kullanılacak model geometrisinin tasarımı yapılırken farklı kesit kalınlıkları içeren ve kesit kalınlıklarına bağlı olarak değişen döküm şartlarında besleyici gereksinimi değişen bir model geometrisi tercih edilmiştir. Model farklı döküm şartlarında bazen tek sıcak nokta ortaya çıkararak tek besleyici ile döküme uygun olurken, değişen döküm şartlarında iki sıcak nokta sonucu iki besleyici gereksinimi ortaya çıkarmaktadır. Bu amaçla tasarlanan modellerin ölçüleri Şekil 14'te verilmiştir.



Şekil 14. Döküm modeli geometri ve ölçüleri.

Model ilk olarak SolidCast döküm simülasyon yazılımında besleyici ve yolluksuz olarak modellenmiştir. Modelleme programında değişen döküm şartlarına göre metalürji kalitesi, kalıp rijitliği ve kimyasal bileşimine bağlı olarak Hacimsel değişim eğrisi değerlerinin belirlenmesi çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 15'te SolidCast döküm simülasyon yazılımından alınan dökme demir özelliklerinin belirlenmesine yönelik ilgili ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 15. SolidCast yazılımından alınan hacimsel değişim eğri hesaplaması.

Şekil 15'te verilen pencereden elde edilen hacimsel değişim eğrisine bağlı olarak gerekli besleyici sayı ve ebatlarının belirlenmesi için yazılımda bulunan Besleyici Tasarım Sihirbazı modülüne geçilmiştir. Besleyici Tasarım Sihirbazında ilgili modele ait değerler girildikten

sonra besleyici bağlantı noktası üst ve yan olacak şekilde veriler girilmiş ve buna bağlı olarak gerekli besleyici ve besleyici boğaz bağlantısı ebatları belirlenmiştir. Şekil 16'da Besleyici Tasarım Sihirbazı modülünden alınan örnek bir ekran görüntüleri verilmiştir.

The image displays two screenshots of the 'Iron Casting: Riser Design' software interface. The top screenshot shows the 'Side Riser' option selected in the 'Riser Type' section. The bottom screenshot shows the 'Top Riser' option selected. Both screenshots show input fields for casting weight, modulus, and riser height, and output fields for riser diameter, height, and neck dimensions.

Top Screenshot (Side Riser):

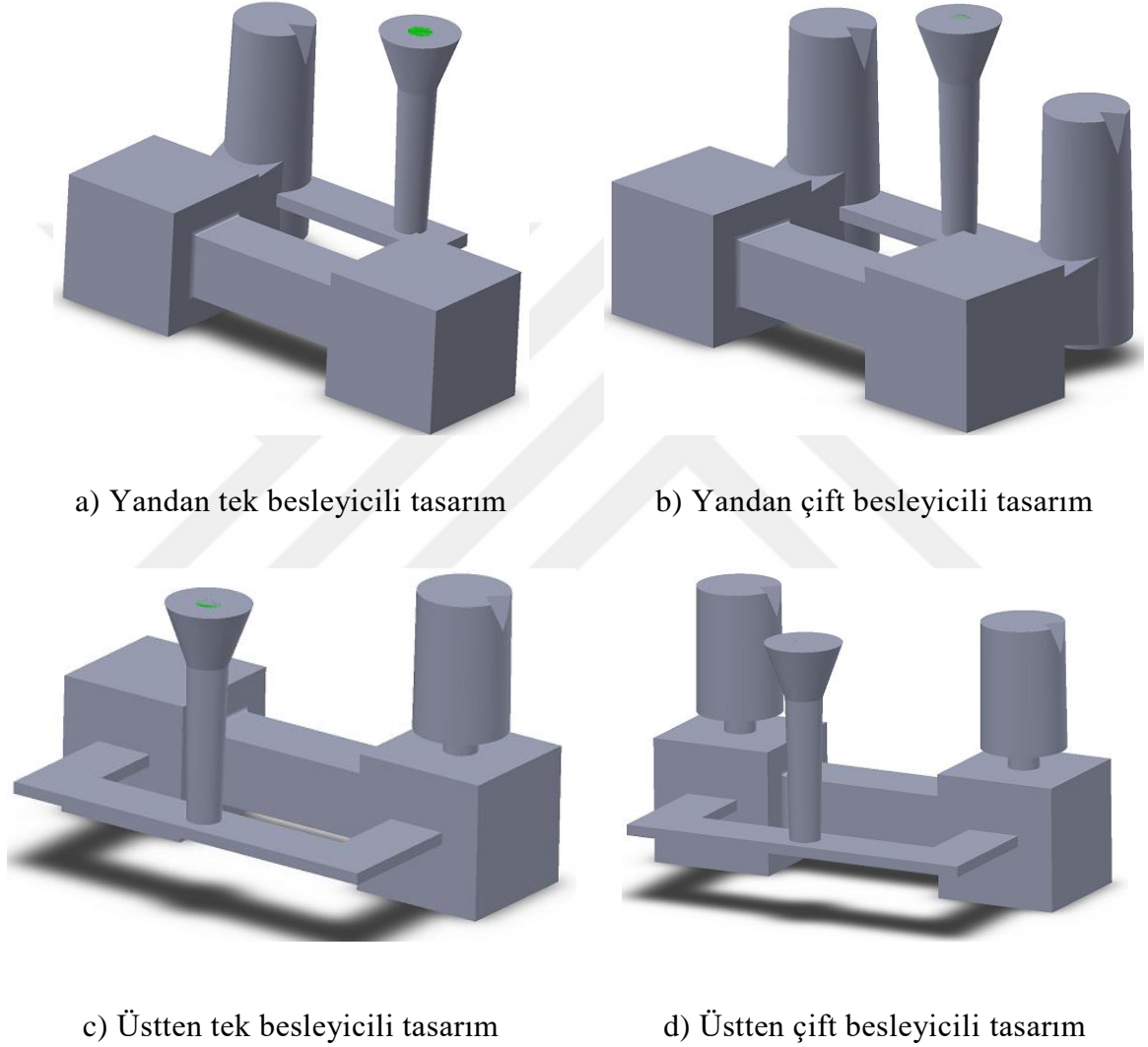
- Enter Casting Weight or Volume: Weight: 9,2 kg; Volume: [] kg
- Casting Modulus: 1,42 cm
- Sleeve Type: None, Gated Through Riser, Insulating, Exothermic, Exothermic Mini-Riser
- Proportion of Liquid Metal Removed (%): 25
- Modulus Increase Factor: 1
- Riser Height:Diameter Ratio: 2
- Riser Type: Side Riser, Top Riser
- Short Neck:
- Percent Solid for Riser Design: 54,23
- Calculate button
- Riser Design Based on Volume Requirement:
 - Riser Diameter: 51,816 mm
 - Riser Height: 103,607 mm
- Neck Dimensions:
 - Round Neck: Diameter = 38,1 mm
 - Square Neck: Size = 38,1 mm
 - Rect. Neck (A x B): Enter Dim: 0 mm X, Calc Dim B: 0 mm
- Riser Modulus: 1,173 cm
- Neck Modulus: 0,953 cm
- Ratio of Riser Modulus : Casting Modulus: 0,826
- Ratio of Neck Modulus : Casting Modulus: 0,671

Bottom Screenshot (Top Riser):

- Enter Casting Weight or Volume: Weight: 9 kg; Volume: [] kg
- Casting Modulus: 0,9 cm
- Sleeve Type: None, Gated Through Riser, Insulating, Exothermic, Exothermic Mini-Riser
- Proportion of Liquid Metal Removed (%): 25
- Modulus Increase Factor: 1
- Riser Height:Diameter Ratio: 2
- Riser Type: Side Riser, Top Riser
- Short Neck:
- Percent Solid for Riser Design: 68,25
- Calculate button
- Riser Design Based on Volume Requirement:
 - Riser Diameter: 55,677 mm
 - Riser Height: 111,379 mm
- Neck Dimensions:
 - Round Neck: Diameter = 17,374 mm
 - Square Neck: Size = 17,374 mm
 - Rect. Neck (A x B): Enter Dim: 0 mm X, Calc Dim B: 0 mm
- Riser Modulus: 1,128 cm
- Neck Modulus: 0,434 cm
- Ratio of Riser Modulus : Casting Modulus: 1,253
- Ratio of Neck Modulus : Casting Modulus: 0,482

Şekil 16. Besleyici Tasarım Sihirbazında besleyici ebatlarının belirlenmesi.

Besleyici hesapları yapılırken dökümhane şartlarının farklılaşmasından dolayı tek ya da çift besleyici gereksinimlerine göre tasarım yapılmıştır. Besleyici hesaplamalarında besleyici döküm parçaya üstten ya da yandan bağlanacak şekilde seçim yapılmış ve besleyici çap ve boğaz bağlantı ölçüleri buna göre belirlenmiştir. SolidCast döküm simülasyon programı Besleyici Tasarım Sihirbazı modülünden alınan değerlere uygun olarak yapılan tek ve çift besleyicili tasarımlara ait katı model görüntüleri Şekil 17’de verilmiştir.



Şekil 17. Kalıplama tasarımı katı model görüntüleri.

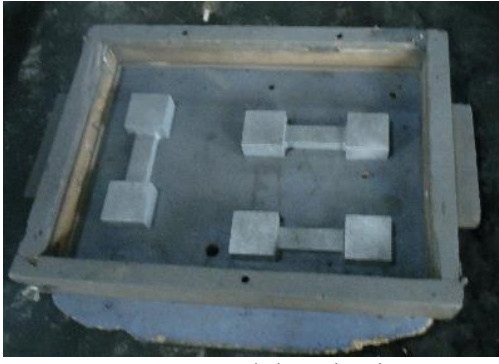
Şekil 17’de verilen kalıplama tasarımlarında düşey ve yatay yolluk ebatları da SolidCast Döküm Simülasyon programından belirlenmiş ve her bir dökümde ilgili değerler sabit tutulmuştur.

Model İmalatı ve Kalıpların Hazırlanması

Modelleme çalışmaları sonucu belirlenen ebatlarda tasarım için model imalatına geçilmiştir. Model imalatı yapılırken deneylerden elde edilen tüm sonuçların birbiriyle karşılaştırılabilmesi açısından model geometrisi sabit tutulmuştur. Döküm numune modeli, besleyiciler ve yolluklar belirlenen geometride uygun ebatlarda serbest model olarak imal edilmiştir. Çalışma kapsamında farklı döküm şartlarında döküm sonuçlarının ve kalıplama tasarımlarının değerlendirilmesi amacıyla üstten ve yandan tek ve çift besleyicili kalıplamalar yapılmıştır.

Kalıplama ve döküm işlemleri ticari olarak faaliyet gösteren 2 farklı dökümhane de gerçekleştirilmiştir. Kalıplama işlemi yapılırken öncelik ile modeller alt derecenin merkezine gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Daha sonra kalıpların modelden rahat çıkabilmesi için grafit tozu serpilmiştir. Model yüzeyi ilk olarak elenmiş ince kum atılarak ve sonrasında kalıp kumu ile dereceler doldurularak sıkıştırılmıştır. Üst derece hazırlanması için derece ters çevrilip modellerin diğer kısmı, yolluk ve besleyiciler yerleştirilmiştir. Elenmiş ince kum tekrardan model yüzeyine atılıp ve sonrasında kalıp kumu ile derece doldurulmuştur. Kalıp hazırlanmasında tüm ayrıntı ve kriterler dikkate alınarak döküme hazır hale getirilmiştir. Şekil 18’de yaş kalıp kumu ile kalıp hazırlanması aşamasından örnek görüntüler mevcuttur.

Tez çalışması kapsamında ayrıca alfa set reçineli kum ile kalıplama yapılmıştır. Alfa set reçineli kum hazırlanırken 100 kg kum için 1,5 kg reçine, 1kg sertel ilavesi yapılmıştır. Alfa set reçineli kum gerekli ilaveler yapıp kum mikserinde karıştırılarak elde edilmiştir. Hazırlanan kum kalıp içerisine doldurulduktan sonra içerisindeki sertel durumuna göre havada sertleştirilerek kalıplar hazırlanmıştır. Şekil 3.19’da alfaset reçineli kum ile kalıplama işleminden görüntüler verilmiştir.



Dereceye model yerleştirme



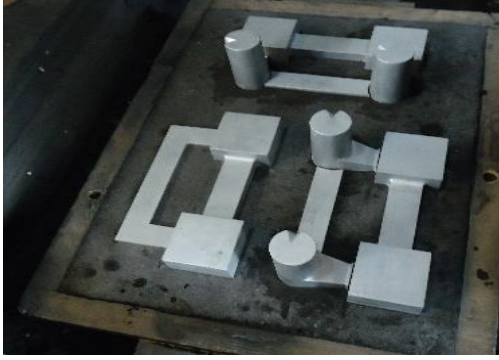
Elenmiş kum doldurulması



Havalı tokmak ile kumun sıkıştırılması



Alt derecenin çevrilmesi



Besleyici ve yollukların yerleştirilmesi



Üst derece kalıp kumu ile doldurulması



Üst derecenin sıkıştırılması



Kalıptan derecenin çıkarılması

Şekil 18. Yaş kum ile kalıplama aşamalarından örnek görüntüler.



Modelin alt dereceye yerleştirilmesi



Reçineli kumun kalıba doldurulması



Dereceye kumun doldurulması



Kumun sıkıştırılması



Modellerin yerleştirilmesi



Reçineli kumun sertleştirilmesi



Döküme hazır hale gelmiş derece



Döküme hazır kalıbın gösterimi

Şekil 19. Alfaset reçineli kalıplama işlem başmakları görüntüleri.

Ergitme ve Döküm İşlemleri

Ergitme işlemleri firmalarda bulunan indüksiyon ocaklarında gerçekleştirilmiştir. İndüksiyon ocaklarına uygun bileşimin hazırlanması için katılan şarj malzemeleri Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. *Ocak şarj malzemeleri*

Firma	Ocak İçerisine Katılan Elementler					Pota İçerisine Katılanlar			
	Sfero piki	DKP	FeSi	FeMn	C	Döngü	FeSiMg	FeSi	Cu
A	154 kg	25 kg	1,9 kg	0,45 kg	-	18,65 kg	3,8 kg	1,3 kg	0,6 kg
B	150 kg	150 kg	-	-	7 kg	200 kg	12 kg	1,4 kg	-

Ocaktan alınan sıvı metal cepli tip potada küreleştirme ve aşılama işlemleri uygulanmıştır. Ocakta hazırlanan sıvı metal küreselleştirme için işlem potasına alınmıştır. Potanın içerisine tabloda gösterilen miktarlara göre FeSiMg küreselleştirici ve aşılama olarak FeSi ilave edilmiştir. Ayrıca bir firmada ilgili alaşım standart mekanik değerleri sağlamak amacıyla bakır ilavesi gerçekleştirilmiştir. Döküme hazır hale gelen sıvı metal hazırlanmış kum kalıp içerisine dökülmüştür. Şekil 20'de sıvı metalin ergitmesi ve küreleştirme işlemleri için potaya alınması esnasında görüntüler mevcuttur.



Ocaktaki sıvı metal görüntüsü



Sıvı metalin büyük potaya alınması



Sıvı metalin küçük potalara alınması



Sıvı metalin kalıplara dökülmesi

Şekil 20. Sıvı metal ergitme, küreleştirme, potaya alma görüntüleri.

Dökümlerin Kalıptan Çıkartılması, Yolluklarının Kesilmesi ve Taşlanması İşlemleri

Döküm işleminden sonra kalıp içerisinde katılaşma tamamlandıktan sonra, kalıpların bozulması ile döküm parçaları kalıptan çıkartılmıştır. Şekil 21.de dökümlerin kalıptan çıkartılması esnasında örnek görüntüler verilmiştir.



Şekil 21. Döküm sonrası kalıpların bozulması ve döküm numunelerinin çıkartılması.

Dökülen numuneler kalıptan çıkarıldıktan sonra firmalarda bulunan kumlama makinalarında temizlenmiştir. Şekil 22’de kumlama sonrası döküm numunelere ait örnek resimler mevcuttur.

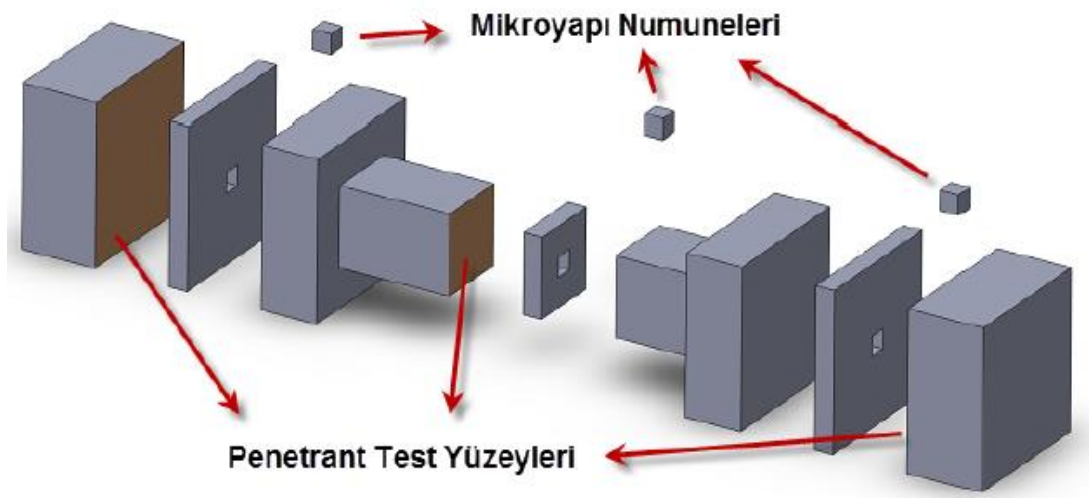


Şekil 22. Kalıptan çıkan döküm numunelere ait kumlama sonrası görüntü.

Dökümlerin çapakları taşlanıp, yolluk ve besleyicileri kesildikten sonra incelemelere geçilmiştir.

Döküm Numunelerinin İncelenmesi

Değişen döküm şartları ve kalıplama tasarımlarında döküm numune üzerindeki değişimin belirlenebilmesi açısından incelemeler yapılmıştır. Test kapsamında döküm numuneler Şekil 23’de verildiği gibi incelenmek üzere belirtilen yerlerinden kesilmiştir.

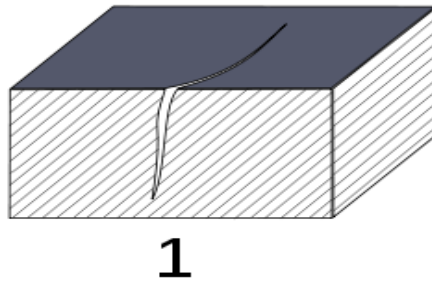


Şekil 23. Döküm numunelerin incelenmek üzere kesilmesi.

Döküm numuneler makro olarak porozite incelemeleri, penetrant testleri, mikro yapı incelemelerine tabi tutulmuştur. İncelemelerde model üzerinde farklı kesit kalınlıklarından dolayı model üzerinde orta kısım ve kenar kısımlardan ayrı numuneler alınmış ve değerlendirmeler bu şekilde yapılmıştır. Penetrant testleri öncesinde kesilen numuneler dikey freze tezgahında yüzeyleri işlenmiştir. Frezeleme işlenimindeki amaç penetrant testi için pürüzsüz bir yüzey edebilmek ve hata oranını minimize etmek ve sonuçların doğruluğunu artırmaktır.

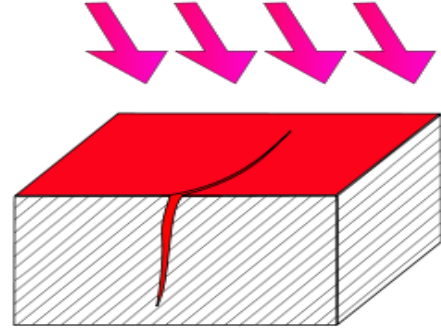
Penetrant testleri.

Şekil 23'de belirtilen döküm parça tam ortasından kesilmiş yüzeylerden penetrant testleri ile döküm kesit yüzeyinde yetersiz beslemeye bağlı oluşan porozitenin kontrol edilmesidir. Sıvı penetrant testi tahribatsız bir muayene yöntemi olup, çatlaklar gibi gözle görülemeyen yüzeysel kusurları belirlemek için kullanılır. İnceleme yapılacak kesit yüzeyler frezeleme sonrası temizleme sıvısı ile temizlenen yüzeylere ticari olarak kullanılan BETA BT68 penetrant boyası tatbik edilmiştir. Burada yüzeyde oluşan makro olarak gözle tespit edilemeyen gözeneklerin görülmesi amaçlanmıştır. Boya tatbik edildiği yüzeyde belli bir süre sonunda gözeneklere dolmaktadır. Yeteri kadar beklendikten sonra boya özel spreyi yüzeyi uygulanır ve bez ile yüzey temizlenir. Penetrant boyanın yüzeyden kaldırılması ile kesit yüzeyine sprey ile sıkma suretiyle BETA BT70 geliştirici uygulanır. Böylece gözeneklere dolan penetrant boya makro olarak gözle görülebilir hale gelmekte ve ilgili yüzeyin gözenek durumu tespit edilebilmektedir. Penetrant testi uygulama işlem basamakları Şekil 24'te verilmiştir.



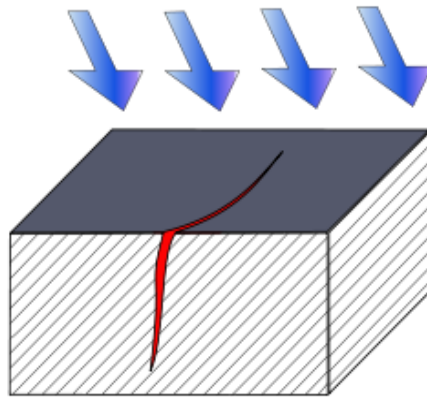
1

a-Yüzeyin temizlenmesi



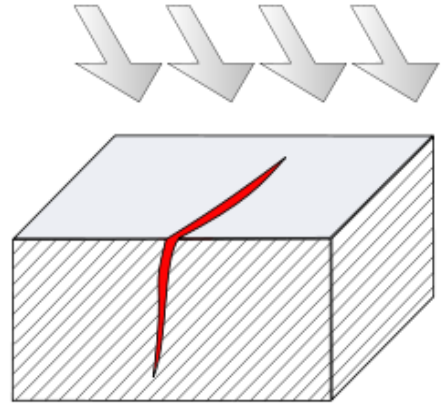
2

b-Penetrant uygulanması



3

c-Yüzeyin penetranttardan temizlenmesi



4

d-Geliştirici uygulanması

Şekil 24. Penetrant uygulama basamakları.

Metalografik hazırlık işlemleri ve mikro yapı inceleme.

Döküm numunelerden mikro yapı incelemeleri için Şekil 10.da verildiği gibi kesilerek orta ve kenar kısımlardan 3 farklı numune elde edilmiştir. Kesilen numuneler zımparalama ve parlatma sürecinde daha rahat hazırlanması için aynı anda birden fazla numunenin hazırlanmasına fırsat vermesi açısından bakalite alınmıştır. Daha sonra zımparalama makinesinde numuneler sırasıyla 120, 360, 600, 800 1000 ve 1200 gritlik zımparalarla zımparalanmış akabinde 6 ve 3µm luk elmas pasta süspansiyonu ile keçe üzerinde parlatılmıştır.

Zımparalama ve parlatma işlemi yaparken aşağıdaki esaslara dikkat edilmiştir;

- Zımparalama esnasında kopan tozların parçaya zarar vermemesi yüzeyde çizikler oluşturmaması için su ile temizlenmesi,

- Zımparalanan malzeme çizikler sadece tek yönde olana kadar ince zımpara kâğıdına geçilmemesi,
- Bir sonra ki zımpara kâğıdına geçildiğinde parça yüzeyine bulunan çizikler 90° gelecek şekilde zımparalamaya devam edilmesi,
- Zımparalama işlemlerinden sonra parlatma işlemine geçilmesi,
- Parlatma işlemi süresince sürekli parça kontrol edilmesi,
- Zımparalama ve parlatma işlemleri sonrası numune yüzeyinde oksitlenme meydana getirmeyecek şekilde hızlıca kurutulması,
- Parlatılan malzemeler dağlama işlemine tabii tutulması.

Metalografik hazırlık süreçlerinden geçirilen numuneler parlatma sonrası %2'lik Nital ile (%2 Nitrik asit + %98 saf alkol) 8-15 sn süre ile dağlanmıştır. Numunelerin mikroyapı incelemeleri, 1000 kez büyütme yeteneğine sahip, 22 mm geniş görüş alanı, ince odaklamada, 0,1 mm ile 1 µm hassasiyet özelliklerine sahip Nikon Eclipse L150-A tip mikroskopta yapılmıştır. Fotoğraf çekimleri bu mikroskoba bağlı çalışan bir Clemex dijital kamera ile alınan görüntüler üzerinden Clemex Vision Lite görüntü analiz yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Şekil 25'te numunelerin mikroskopta incelenmesi aşamasından bir görüntü verilmiştir.



Şekil 25. Mikroskop ve bilgisayar görüntüsü.

İmaj analiz yöntemi ile mikro yapı karakterizasyonu.

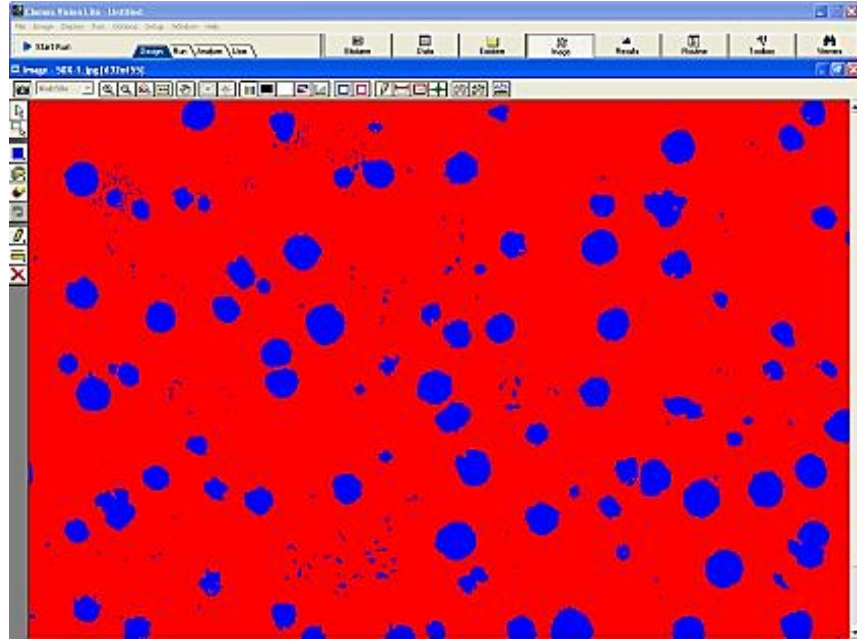
İmaj analiz olarak adlandırılan sistemlerin temel prensibi bir mikroskop, mikroskoba bağlı bir kamera ve bu kamera aracılığı ile hazırlanan numunelerden alınan görüntünün bilgisayara aktarılması ve bilgisayarda bir program ile kullanıcı tanımlı, yarı otomatik ya da otomatik olarak analizlerin yapılması esasına dayanmaktadır. Yazılımın analiz yapma esası; mevcut resimdeki renk farklılıklarına göre her bir kontrasttaki rengi farklı birer faz ya da bölge olarak algılayıp bize bu farklara göre sonuçlar verir.

Bu çalışmada kapsamında döküm numunelere ait mikro yapı incelemeleri ve imaj analiz çalışmaları yapılmıştır. Numunelerin mikro yapısı üzerinden ilk olarak parlatılmış numuneler dağlama öncesi küreselleşme, ortalama küre çapı ve kürelerin yüzde dağılımı incelenmiştir. Sonrasında numune dağlanarak dağlama sonrası mikro yapı incelemesi ve yüzde faz dağılımı belirlenmiştir.

Küresellik ölçümleri.

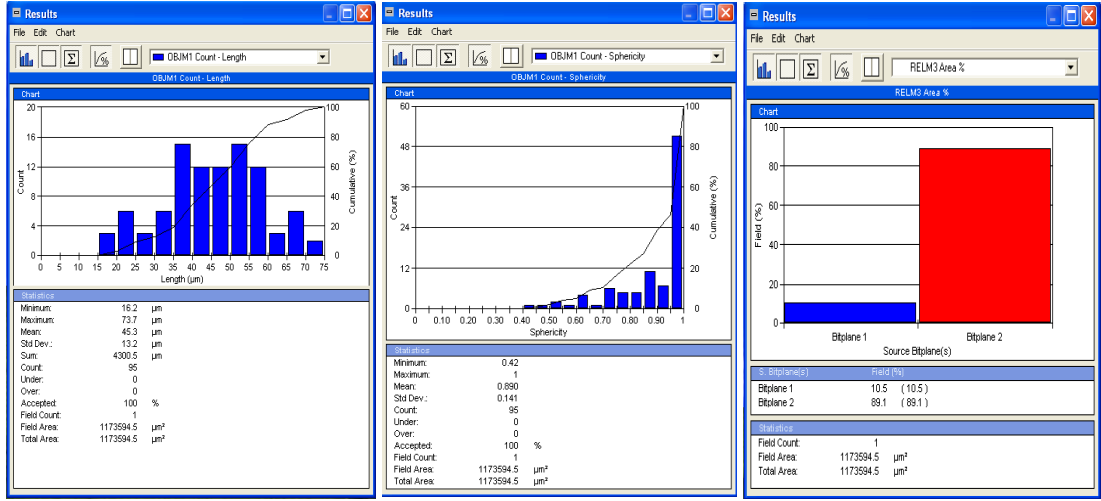
KGDD malzemenin mikro yapısında oluşan kürelerin ölçümü için metalografik hazırlık süreçlerinden sonra numune dağlama öncesi mikroskopta incelenmiştir. Numune mikro yapı görüntüleri Nikon marka Eclipse L150 A model düz tip optik mikroskoba bağlı çalışan Clemex imaj analiz yazılımı yardımıyla alınmıştır. Resim üzerinde ölçüm ve yapının analiz işlemleri için temel fark gözlemlenen renk farklılıklarıdır. İnceleme yapılacak görüntünün kalitesi ve netliği sonuçları doğrudan etkilemektedir. Bu sebeple resim üzerinde yükleme işlemi sonrası resim özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Temel mantık renklerin istenen analize uygun olarak görüntülenmiş olmasıdır.

Mikro yapının daha net bir şekilde görülmesi işlemi tamamlandıktan sonra analiz yapmak için ton dönüştürme ayarlaması yapılması gerekmektedir. Bu bölümden yapıda incelemek istediğimiz nesne seçimi sağlanır. Bu seçim sonrası yapı da kaç farklı faz varsa o kadar ton dönüştürme seçimi yapılır. Dönüştürme işlemi seçilen sayıda faz kadar farklı renkte otomatik olarak belirlenmektedir. Bu seçim istenirse renk eşiklerinin manuel olarak belirtilmesiyle de yapılabilir. Şekil 26'da renk eşleştirmesi yapılan resim görülmektedir.



Şekil 26. İki faz mikro yapı resminde renk eşleştirme sonrası görüntüsü.

Resimdeki ton dönüştürme işlemi tamamlandıktan sonra istenirse sonuçlara geçilebilir. Ancak sonuçların daha doğru olabilmesi için resim üzerinde bazı revizyonlar yapılması gerekmektedir. Örneğin bazı grafit kürelerinin içlerinde optik mikroskopta farklı bölgeler çıkmıştır. Bu resim sonuçları incelendiğinde sanki küre grafit içinde farklı bir faz varmış gibi değerlendirilmektedir. Numunelerin mikro yapısı analizinde revize edilecek bir diğer işlem de istenen boyutun altındaki kürelerin hesap dışı bırakılmasıdır. Bunun sebebi mikro yapıda çok küçük boyutta görülen ve grafit olmayan gözenek ve diğer kalıntı şeklinde yapıların renklerinin siyah olarak görülmesinden dolayı yazılım tarafından grafit olarak tanımlanabilmektedir. İncelenecek olan resim üzerinde gerekli işlemler yapılacak analiz ve resim özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Örnek olarak ele alınan KGDD numune mikro yapısında küresellik ölçümü için bu işlemler yeterli görülmektedir. Bundan sonra sonuçların incelenmesi ile analiz tamamlanacaktır. Elde edilen sayısal verilere ait sonuçlar Şekil 27'de görülmektedir. Şekil 27.a'da inceleme yaptığımız resimdeki numunenin küre sayısı ve uzunlukları, Şekil 27.b'de küreselleşme oranı ve son olarak Şekil 28.c'de resimdeki fazların oranları tespit edilmiştir.



a)

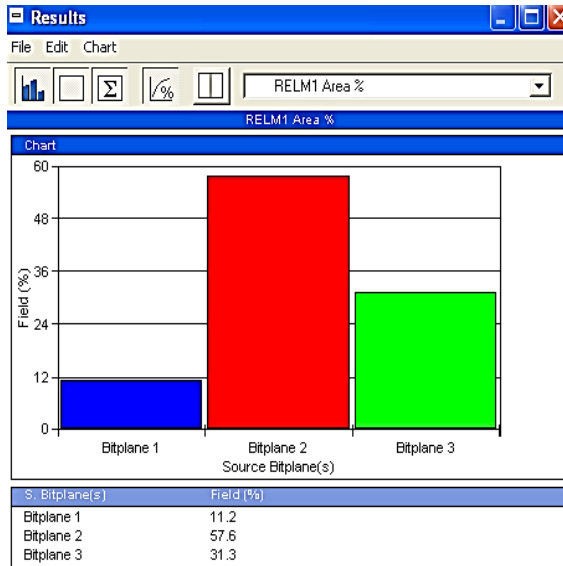
b)

c)

Şekil 27. a) Küre sayısı ve uzunlukları, b) Küreselleşme oranı, c) Faz oranı.

Faz analizi incelemeleri.

KGDD malzemeye dağılmış numunenin mikro yapı fotoğraf görüntüsü üzerinde yapılacaktır. Numunemizin içyapısında oluşan farklı fazlar resimde farklı renklerde görülmektedir. Bu sebeple faz ayırımı program tarafından renk değişimine göre yapılmaktadır. Resimde görülen yapının görüntü netliğine bağlı olarak analiz yapmak için renk eşleştirmeleri yapılmıştır. Renk eşleştirme sonrası yapı da kaç farklı faz varsa ya da o kadar renk eşleştirmesi seçimi yapılır. Numune mikro yapı resmi incelendiğinde malzemenin kimyasal bileşim ve üretim şartlarına bağlı olarak yapıda farklı renklerde küresel grafitler, ferrit ve perlit gözlenmiştir. Eşleştirme işlemi seçilen sayıda faz kadar farklı renkte bölge otomatik olarak belirlenerek sonuçlara geçilebilir. Şekil 28'de yazılımdan alınan bir sonuç görüntüsü verilmiştir.



Şekil 28. Örnek mikro yapı numunesi için yüzde faz dağılımı.

Modelleme Çalışmaları

Bu tez çalışması kapsamında döküm modellemesi için SolidCast döküm simülasyon programı kullanılmıştır. Program sonlu farklar (Finite Difference) metodu ile ısı transfer ve faz dönüşüm hesaplamalarını üç boyutlu döküm ve kalıp kesitlerinde yaparak bir döküm parçanın katılaşmasını modelleyebilmektedir. Çalışmada fiziksel olarak gerçek döküm şartlarında yapılan dökümlerin bilgisayar ortamında sayısal olarak birebir modellenebilmesini sağlamak simülasyon kullanımının en temel amacıdır. Böylece gerçek dökümlerde ortaya çıkan yetersiz beslemeye bağlı porozite kusurlarının simülasyon programında döküm şartları değiştirilerek tespit edilebilecektir.

Döküm-kalıp geometrisinin ve malzeme özelliklerinin yazılımda tanımı.

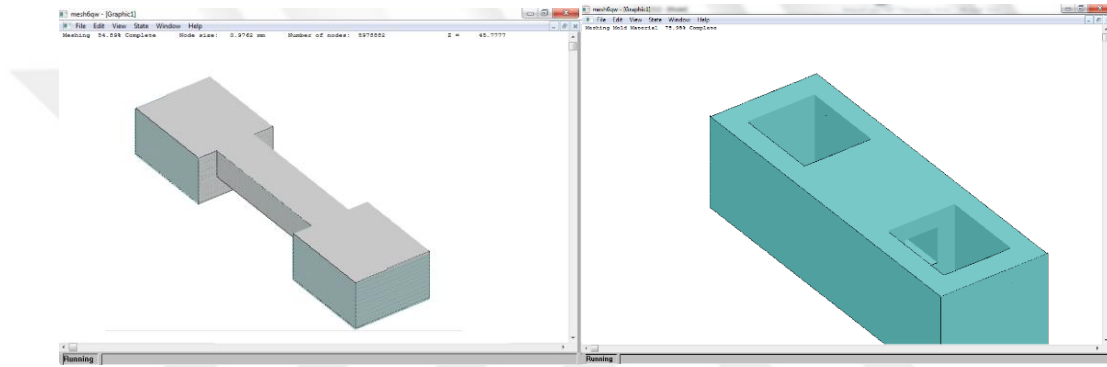
Modelin döküm geometrisi SolidWorks programında katı model olarak oluşturulduktan sonra STL formatına çevrilerek döküm simülasyon programına aktarılmıştır. Bu aşamadan sonra döküm alaşımı ve kalıp malzemesinin türü ve termo fiziksel özelliklerinin tanımlanması yapılmıştır. Döküm alaşımının termo fiziksel değerleri simülasyon programının veri tabanında ferritik KGDD'ye alaşımına karşılık gelen CU DI Ferr alaşımı için verilen değerler Şekil 29' da gösterilmiştir.

Property	Value	Unit
Thermal Conductivity	41.51	W/m-K
Specific Heat	460.24	J/kg-k
Density	7176.064	kg/m ³
Initial Temperature	1380	C
Solidification Temperature	1128.378	C
Freezing Range	41.667	C
Latent Heat of Fusion	230115.6	J/kg

Şekil 29. CU DI Ferr alaşımı için verilen değerler.

Simülasyon programının veri tabanında birçok alaşımın termofiziksel özellikleri standart olarak yüklü olduğu gibi bizde istediğimiz özelliği manuel olarak değiştirebiliriz. Ayrıca döküm alaşımının soğuma eğrisi, yüzde hacimsel çekinti genleşme değerleri dökümhane şartlarına göre değişkenlik gösterebilmektedir. Alaşımın soğuma eğrisi deneyler kapsamında yapılan dökümlere yerleştirilen termokopullar yardımıyla ölçülen zaman-sıcaklık verilerinden yararlanılarak çizilmiş ve programa girilmiştir.

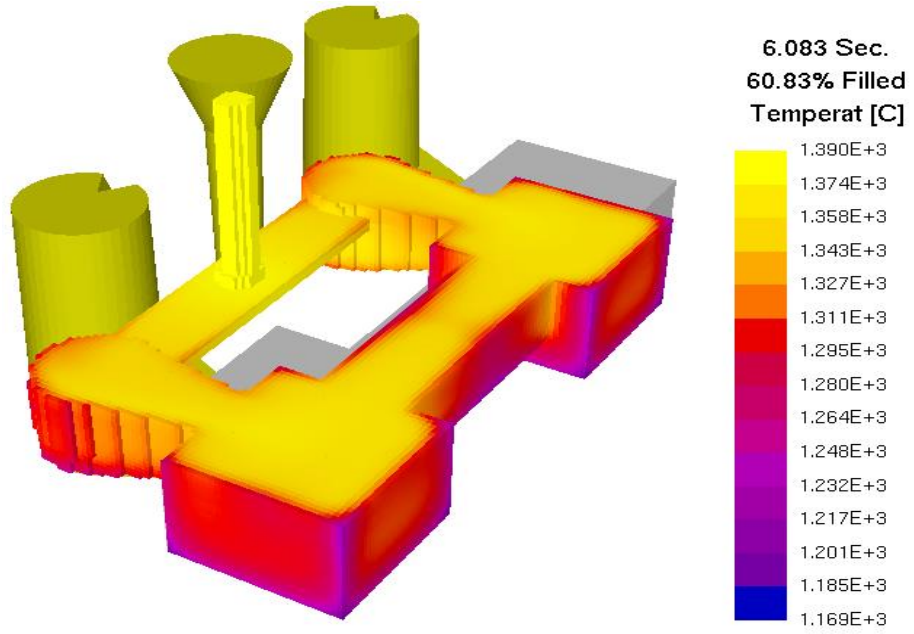
Malzeme özellikleri tanımlanarak programa aktarılan katı model geometrisinin tanelere ayırma (mesh edilerek) ile girilen sınır şartlarının her bir meş elemanı için simülasyon programında çözülmesi sağlanmıştır. Şekil 30'da döküm katı modelinin meş edilmiş hali gösterilmiştir.



Şekil 30. Modelin ve kalıbın meş görüntüsü

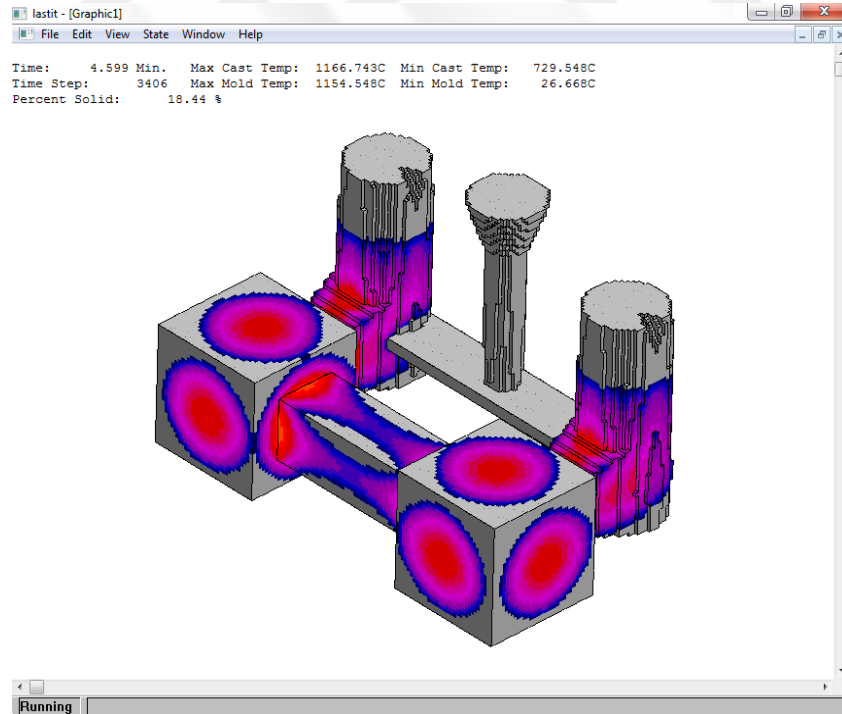
Simülasyon programında kalıbın doldurulması ve dökümün katılaşması.

SolidCast simülasyon programında kalıp doldurma işlemi için ayrı bir yazılım olan FlowCast modülü kullanılmaktadır. FlowCast akışkanlar dinamiği kıstaslarına göre sıvı metali kalıp boşluğuna doldururken türbülans, eksik doldurma, soğuk birleşme ve basınç vb. gibi faktörleri de hesaplamaktadır. Şekil 31'de simülasyon programında kalıbın doldurulmasını gösteren bir görüntü verilmiştir.



Şekil 31. FlowCast programında kalıbın doldurulması.

SolidCast programı dökümü soğutmaya kalıp doldurulduktan sonra geçer ve tüm döküm kesitleri katılaşmaya kadar soğutma işlemine devam eder. Program katılaşma tamamlandığı anda otomatik olarak sonlanır ve döküm parça üzerinde simülasyon sonrası analizlere geçilir. Dökümün katılaşma esnasından bir görüntü Şekil 32’de verilmiştir.



Şekil 32. Simülasyondan alınan örnek bir katılaşma görüntüsü.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

Araştırma Bulguları ve Tartışma

Bu bölümde tez kapsamında yapılan deneysel çalışmalarından elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi verilecektir. Deneysel sonuç olarak dökümlerin kimyasal bileşimleri, dökümlerin makro olarak incelenmesi, mikro yapı incelemeleri, modelleme çalışması sonuçları ve penetrant testi sonuçları verilecektir.

Mikro yapı incelemelerinde değişen şartlar altında farklı kalıplama tasarımlarında yapılan dökümlerin ve modül değişiminin yapıda grafit oluşumuna etkisi değerlendirilmiştir. Numuneler parlatma sonrası ve dağlama sonrası ayrı ayrı mikro yapı incelemeleri bilgisayar destekli imaj analiz yazılımlarıyla gerçekleştirilmiştir. Değişen şartlar altında modelleme sonuçları ile fiziksel olarak yapılan dökümlerin karşılaştırmaları değerlendirilecektir. Tez çalışmaları kapsamında farklı dökümhanelerde dökümler yapıldığından yaş kalıba döküm ve alfa set reçineli kalıba dökümler arasındaki döküm şartları değerlendirilecektir. Ayrıca dökümhaneler arasında metalürjik kalite etkisine bağlı olarak aynı tasarımlarda elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak değerlendirilecektir.

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

Kimyasal Bileşim Analizi

Döküm deneylerinde kullanılan alaşımlar ve katılan ilave alaşım elementlerinin ve ilgili alaşımın standartlara uygunluğunun kontrolü için dökümlerden alınan numunelere ait kimyasal bileşim analiz sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Sıvı metalin kimyasal bileşiminin uygunluğunun tespit edilmesi için spektral analiz numunesi alınmıştır. Bu numuneler dökümhanelerde ticari üretimlerde de kullanılan WAS (Foundry-Master) marka spektrometre cihazında kimyasal bileşimleri tespit edilmiştir.

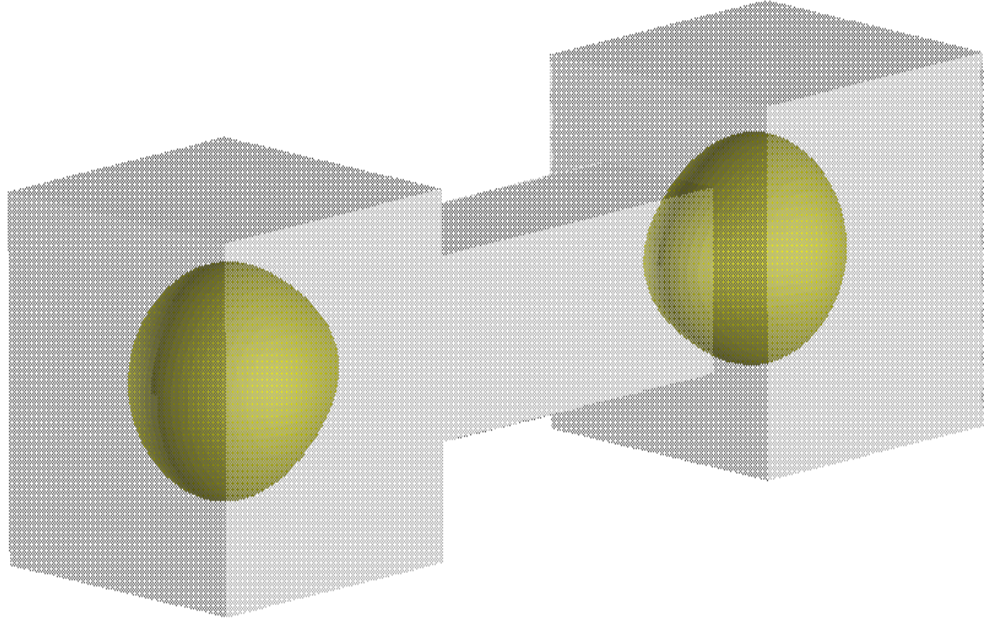
Tablo 4. Kimyasal Analiz Sonuçları(% ağırlıkça)

Numune	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Mg	P	S	Fe
A	3.4	2.1	0.2	0.03	0.04	0.4	0.019	0.08	0.04	Kalan
B	3.1	2,8	0.4	0.05	0.05	-	0.023	0.04	0.02	Kalan

A ve B olarak kodlanan numuneler farklı dökümhanelerden alınan numunelere aittir. Sonuçlar incelendiğinde ocak içerisine katılan alaşım ilavelerine bağlı olarak kimyasal analizlerin beklendiği gibi tespit edilmiş ve ilgili alaşım standardına uygun olduğu anlaşılmaktadır.

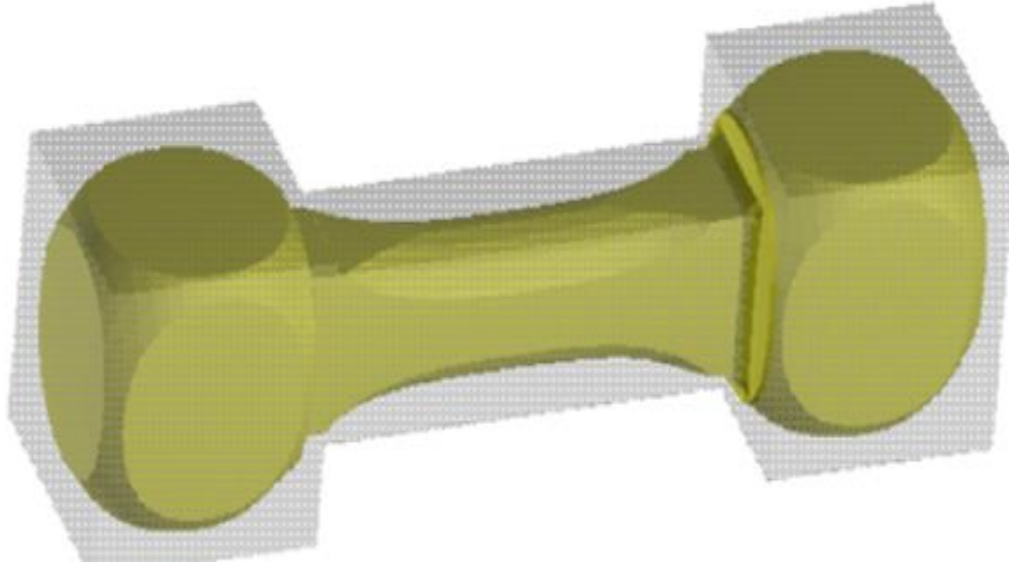
Modelleme ve Besleyici Tasarımı Çalışmaları

Döküm deney modelimizin besleyici tasarımı yapılabilmesi için modelleme çalışmaları yapılmıştır. Modellemeler dökme demirlerde döküm şartlarının değişimine göre demir özelliklerini hesaplayabilen modüle sahip olan SolidCast döküm simülasyon programında yapılmıştır. Döküm parça bu amaçla öncelikle döküm modülünün belirlenmesi için programda besleyici ve yolluk olmaksızın boşta dökümü yapılmıştır. Boşta döküm sonrası döküm parça modül 1,42 cm olarak Şekil 33’de görüldüğü şekilde tespit edilmiştir.



Şekil 33. Döküm parçanın 1,42 cm modül değerinde sıcak noktaların görünümü.

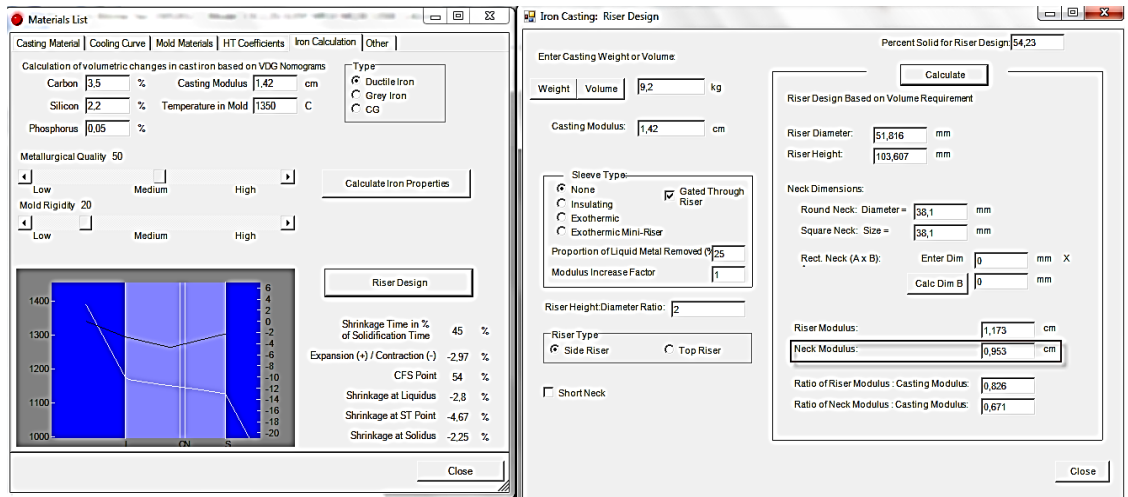
Şekil 33’te verilen simülasyon analizi görüntüsünde görüldüğü gibi 1,42 cm modül değerinde parça üzerinde 2 adet sıcak nokta ortaya çıkmaktadır. Bu durumda parça için 2 adet besleyici kullanımı söz konusu olmaktadır. Ancak parçanın değişen şartlarda modül değerlerinde ortaya çıkması muhtemel değişiklik durumunda örneğin 1,2 cm modül değerinde sıcak nokta sayısı 1’e düşmektedir. Şekil 34’te 1,2 cm modülde alınan simülasyon sonucu verilmiştir.



Şekil 34. Döküm parçanın 1,2 cm modül değerinde sıcak nokta görünümü.

Şekil 34'te verilen simülasyon sonuç görüntüsünden anlaşıldığı gibi 1,2 cm modül durumunda parça kalın kesitli kenarlar arasında kalan bağlantı kısmının besleme yolunun açık olacağı ve tek besleyicinin yeterli olacağı görülmektedir.

Ayrıca döküm parçanın modülünü tespit ettikten sonra dökümhane şartlarına bağlı olarak hacimsel değişim değerleri, eğriler ve besleyici boğaz modülü belirlenmesi gerekmektedir. Bu kapsamda SolidCast döküm simülasyon yazılımı Besleyici Tasarım Sihirbazı modülünden alınan değişen döküm şartlarına göre örnek bir hesaplama görüntüsü Şekil 35'te verilmiştir.



Şekil 35. Besleyici boğaz modülü ve ebatlarının belirlenmesi.

Şekil 35'te görüldüğü gibi boğaz modülü bulunur ve boğaz modülü değeri besleyici ebatlarının tespit edilmesinde kullanılır. Bu şekilde değişen döküm şartları düşünülerek tez çalışmasında tek ve çift besleyicili tasarımlar ve buna bağlı dökümler yapılmıştır.

Ravi ve Joshi (2007), Auto-CAST yazılımını kullanarak bilgisayar destekli döküm tasarımı ve besleyici simülasyonu ve döküm geçiş tasarımı konusunda çalışmış ve döküm ürünlerin tasarımında, modellemesinde, simüle edilmesinde, analiz edilmesinde ve geliştirilmesinde nasıl yardımcı olduğunu açıklamışlardır (Ravi & Joshi 2014).

Bhatt ve Barot (2014), besleme sistemi ve simülasyonun tasarım optimizasyonunun, katılaşma ve kalıp doldurma sırasında artan dökme demir döküm hatalarını azalttığını tespit etmişlerdir. Simülasyon çekinti noktalarını ve çatlakları azaltmıştır. (Bhatt & Barot 2014).

Masoumi, Hu, Hedjazi ve Boutorabi (2005), besleyici tasarımının hafif metal döküm işlemleri için kalıp doldurma üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Sonuçlara göre besleyicinin tasarımının ve şeklinin ve besleyici sisteminin oranının, kalıp doldurma modeli üzerinde büyük bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir (Masoumi *vd.*, 2005).

Döküm Numunelerin İncelenmesi

Sıvı metalin kalıba dökülmesini takiben katılaşma ve soğuma işlemleri sonrasında döküm numuneler kalıptan çıkartılmıştır. Dökümler kumlama makinesinde kumları temizlendikten sonra makro olarak incelemelere tabi tutulmuştur. Şekil 36'da yandan besleyici ile kullanarak yaş ve reçineli kum kalıplarda kalıplanmış tek ve çift besleyicili döküm görüntüleri verilmiştir.

Yaş kalıp kumu ile kalıplanmış



Reçineli kum ile kalıplanmış



Şekil 36. Yandan tek ve çift besleyicili kalıplanarak dökülmüş numune görüntüleri.

Dökümlerin yolluk ve besleyicilerinin kesilmesi sonucu besleyici ile döküm parça bağlantı kısımları taşlanmış ve bağlantı kısımları makro olarak incelenmiştir. Şekil 37’de yaş kalıp kumu ile hazırlanan kalıba yapılan döküm besleyici döküm bağlantı kısmının görüntüleri verilmiştir.



Şekil 37. Yaş kalıp kumu ile dökülmüş besleyici boğaz bağlantı görüntüleri.

Şekil 37’de görüldüğü gibi tek besleyici kullanılarak yapılan dökümlerde çekinti riski görülürken çift besleyici kullanılarak yapılan dökümlerin besleyici boğaz bağlantılarında makro gözenek ortaya çıkmamıştır. Bu durum yapılan modelleme sonuçlarında da görüldüğü gibi

döküm parça üzerinde 2 farklı sıcak nokta olması ve 2 besleyici kullanılması gerektiği tespitini doğrular niteliktedir. İlgili parça katılma esnasında model ince kesitli kısımda besleme yolu kapanmış ve tek besleyici parçanın tamamını beslemek için yeterli olamamıştır. Şekil 38’de reçineli kalıp içerisinde aynı tasarıma sahip parçaların dökümüne ait besleyici boğaz görüntüleri verilmiştir.



Şekil 38. Reçineli kalıp kumu ile dökülmüş besleyici boğaz bağlantı görüntüleri.

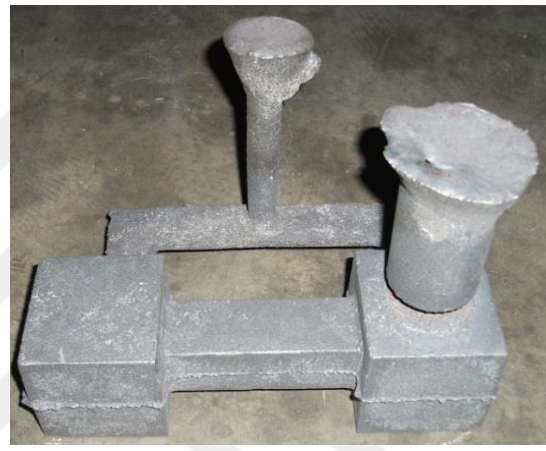
Şekil 38’de reçineli kalıp kumu ile hazırlanmış kalıplara yapılan dökümlerin besleyici boğaz bağlantıları incelendiğinde makro olarak gözenek ortaya çıkmadığı görülmektedir. Şekil 37’de ve Şekil 38’te verilen resimlerden de anlaşıldığı gibi aynı kalıplama tasarımına sahip dökümlerden kalıp kumu farkına bağlı olarak farklı sonuçlar ortaya çıkmaktadır. Yaş kalıp kumunun etkisi bariz bir şekilde gözle görülür hatalar oluşmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 39’da üstten besleyici kullanarak yaş ve reçineli kum kalıplarda kalıplanmış tek ve çift besleyicili döküm görüntüleri verilmiştir.

Yaş kalıp kumu ile kalıplanmış



Reçineli kum ile kalıplanmış



Şekil 39. Üstten tek ve çift besleyicili kalıplanarak dökülmüş numune görüntüleri.

Dökümlerin yolluk ve besleyicilerinin kesilmesi sonucu besleyici ile döküm parça bağlantı kısımları makro olarak incelenmiştir. Şekil 40'ta örnek görüntüler verilmiştir.

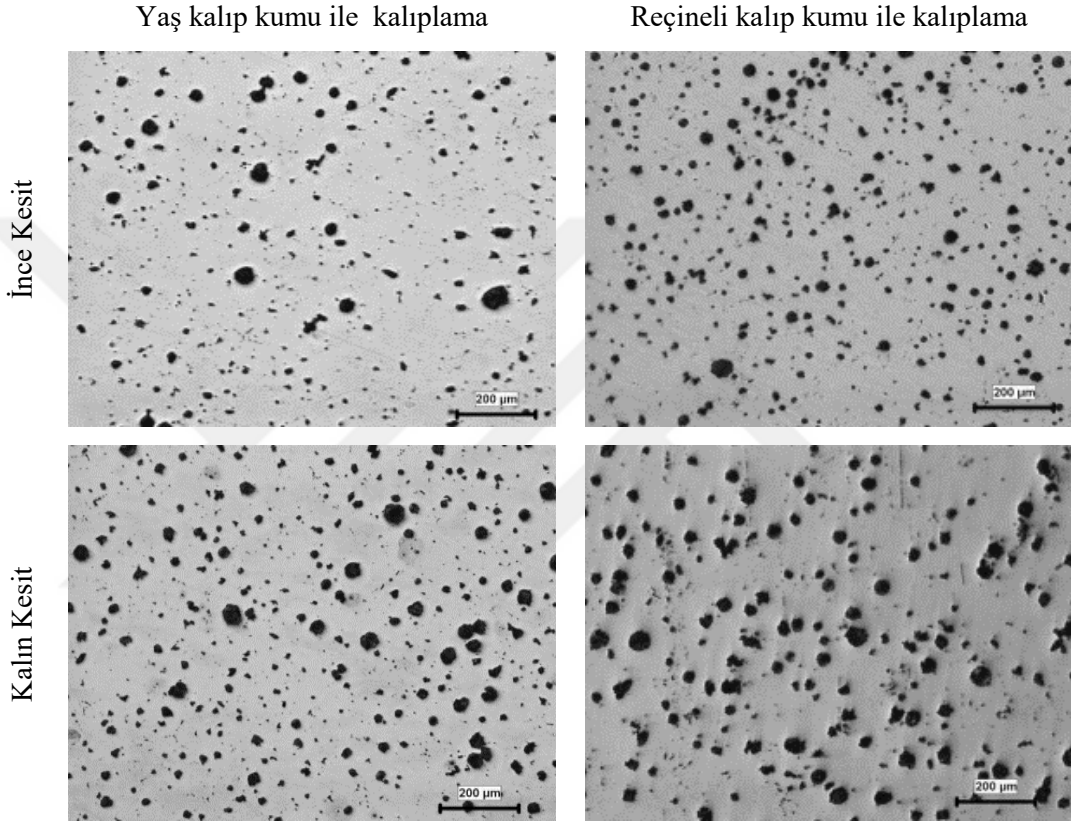


Şekil 40. Yaş kalıp kumu ile dökülmüş üst besleyicili boğaz bağlantı görüntüleri.

İncelemeler sonucunda yaş kalıp kumu ile yapılan dökümlerde besleyici altlarında Şekil 40'ta da verildiği gibi bariz bir şekilde çekinti gözenekleri ortaya çıkmaktadır. Ancak aynı durum reçineli kalıp kumu ile yapılan dökümlerde ortaya çıkmamıştır. Bu durum yaş kalıp kumunun dökme demirin katılaşması sırasında ortaya çıkan genişlemesine kalıp rijitliğinin yeterince karşı koyamadığı dolayısıyla model ebatlarının büyümesine bağlı olarak artan besleyici gereksiniminden kaynaklandığı düşünülmektedir.

Mikroyapı İncelemeleri

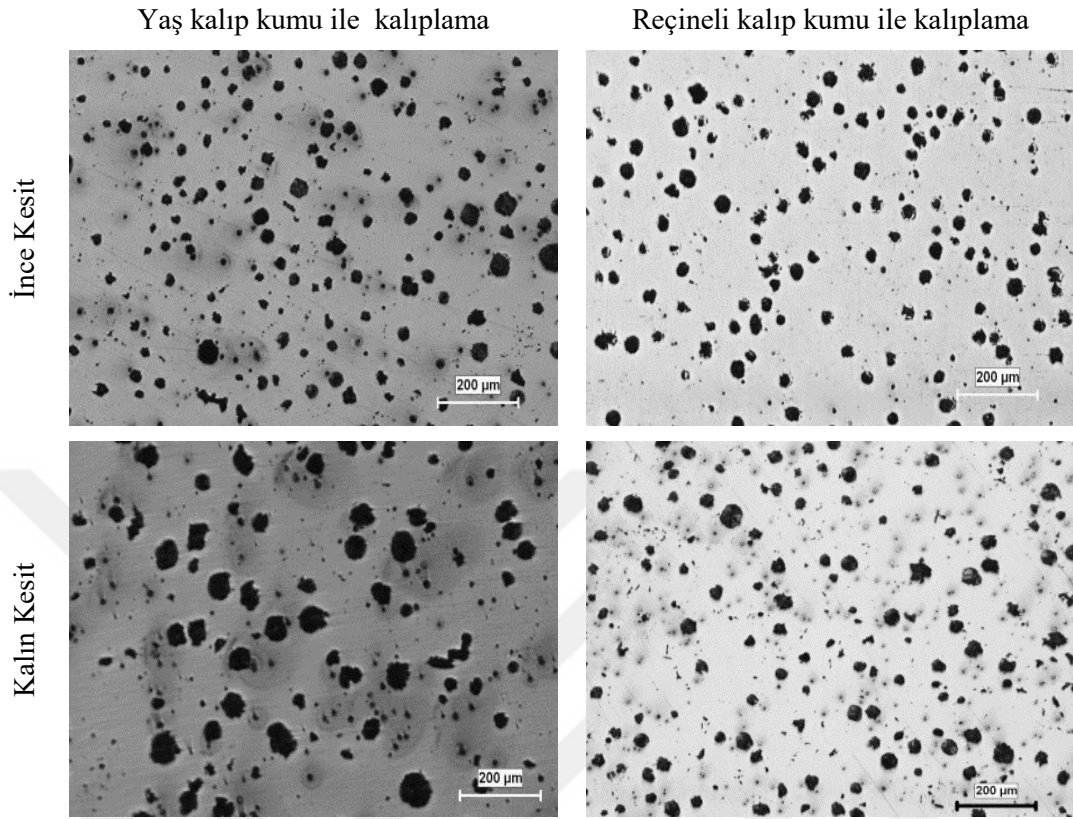
Dökümhanedeki aşılama kalitesini tespit etmek ve kalıplama tasarımının mikro yapı değişimi üzerinde etkisini incelemek üzere döküm numunelerden mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Deneysel çalışmalar bölümünde mikroyapı numunelerinin alındığı bölgeler tespit edilmiştir. Şekil 41’de yan tek besleyici kullanarak kalıplanmış döküm numunelere ait parlatma sonrası ince ve kalın kesitli bölgelerden alınan 50x büyütmede çekilen mikroyapı resimleri verilmiştir.



Şekil 41. Yan tek besleyiciyle dökülmüş numunelerin parlatma sonu mikro yapısı.

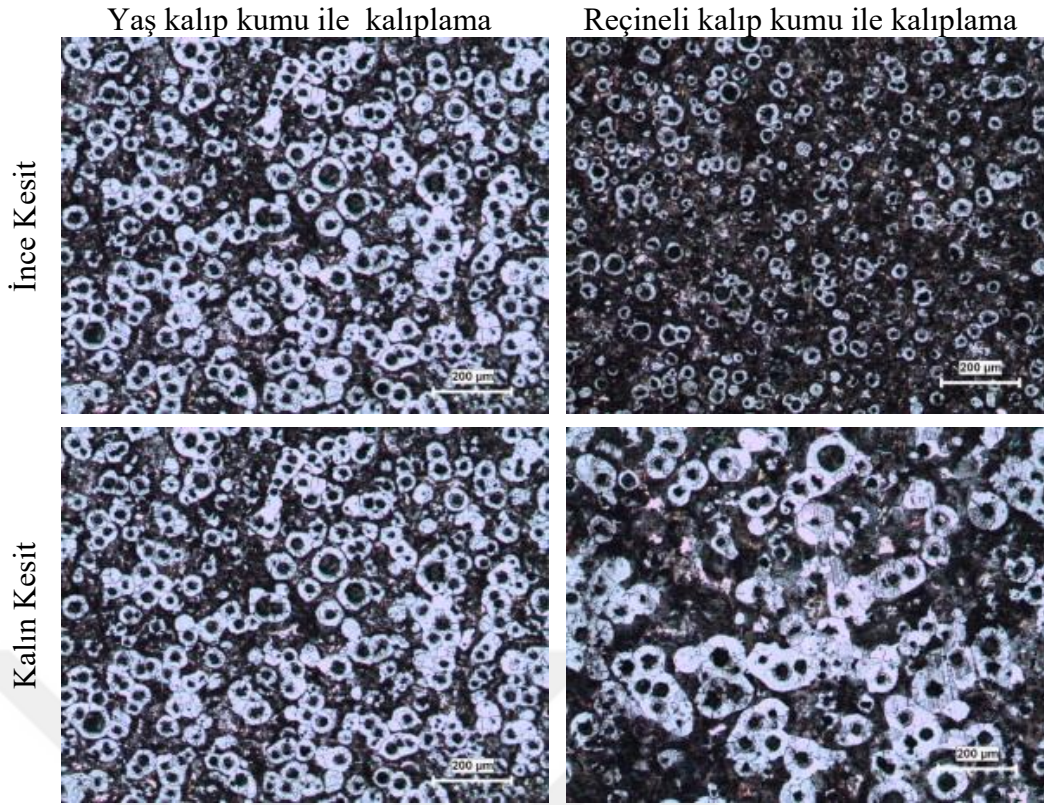
Şekil 41’de verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde grafitlerin küre biçiminde ortaya çıktığı gözlenmekte olduğundan aşılama işleminin uygun olduğu düşünülmektedir. Döküm numunenin kalın kesitli bölgelerinden alınan mikroyapı resimleri ile ince kesitli bölgelerinden alınan mikro yapı resimleri arasındaki karşılaştırma yapıldığında kesit kalınlığının artması ile birlikte yapıda gözlenen grafitlerin ortalama çaplarının daha büyük olduğu anlaşılmaktadır. Kalıp kumu karşılaştırmaları değerlendirildiğinde ortalama grafit küre çapları birbirine yakın olmakla birlikte reçineli kum ile hazırlanan kalıplara yapılan dökümlerde ortaya çıkan kürelerin daha düzgün yapıda oluştuğu görülmektedir.

Şekil 42’de yandan çift besleyici kullanarak yağ kalıp kumu ve reçineli kum ile kalıplanmış döküm numunelere ait parlatma sonrası ince ve kalın kesitli bölgelerden alınan 50x büyütmede çekilen mikroyapı resimleri verilmiştir.



Şekil 42. Yan çift besleyiciyle dökülen numunelerin parlatma sonu mikro yapısı.

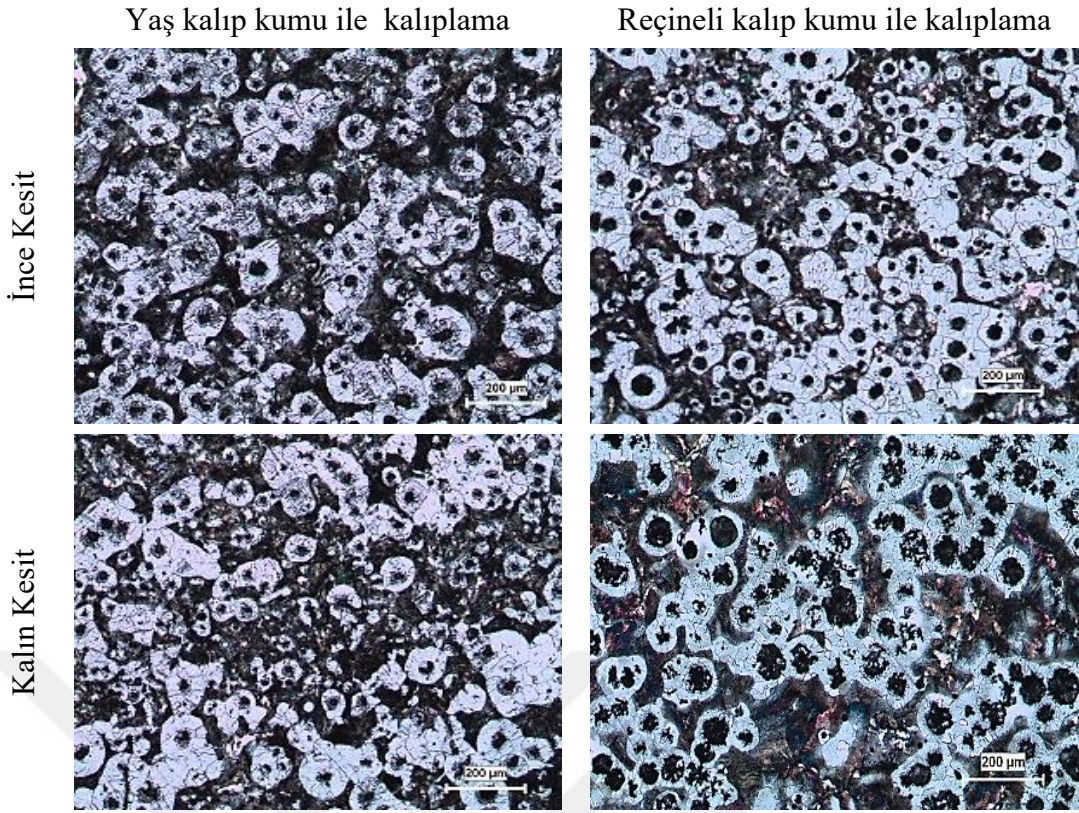
Şekil 42’de verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde kesit kalınlığına bağlı grafit çapları değişimi tek besleyicili kalıpla dökülen numunelerde olduğu gibi yine artış göstermiştir. Bunun yanı sıra benzer şekilde reçineli kalıp ile elde edilen numunelerde daha düzgün küresellik elde edildiği anlaşılmaktadır. Tek besleyicili ve çift besleyicili kalıp ile elde edilen numune mikroyapıları incelendiğinde çift besleyicili tasarımda grafitlerin daha büyük çapta ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Özellikle çift besleyicili yağ kum kalıba yapılan dökümde kalın kesitli numunede katılma zamanının büyümesine bağlı olarak grafitlerin diğer döküm numunelere nazaran daha büyük olduğu ve küreleşmenin bozulmaya başladığı anlaşılmaktadır. Ancak genel olarak aşılma kalitesine yönelik yapılan değerlendirmede döküm yapılarının uygun olduğu ve kabul edilebilir küresellik değerlerine sahip olduğu değerlendirilmektedir.



Şekil 43. Yan tek besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı.

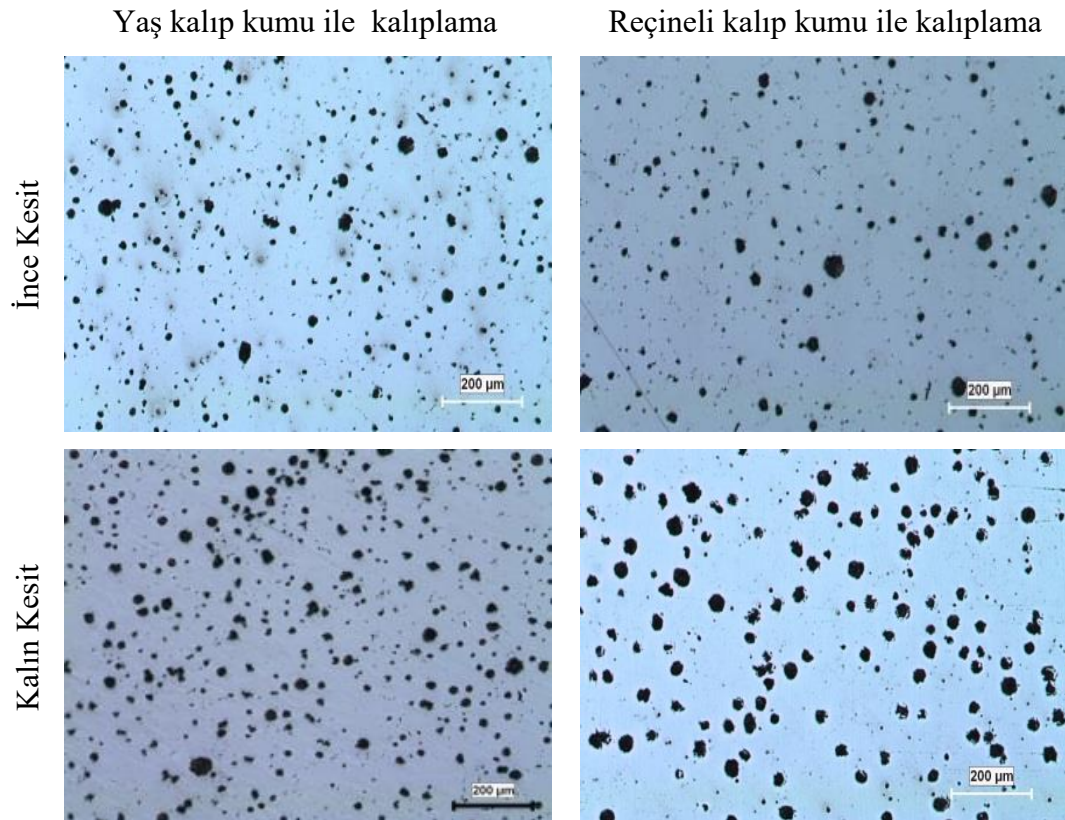
Numuneler parlatma sonrası %2 Nital dağlayıcısı ile dağlandıktan sonra mikroskopta incelemeye tabi tutulmuş ve yapı içerisinde ortaya çıkan faz dağılımları değerlendirilmiştir. Şekil 43'te tek yan besleyicili kalıp, Şekil 44'te çift yan besleyicili kalıp için dağlama sonrası numune mikroyapı resimleri verilmiştir.

Şekil 43 ve 44'te verilen dağlanmış mikroyapı resimleri incelendiğinde döküm numune kimyasal bileşimine bağlı olarak yapıda grafit küreleri, ferrit ve perlit fazları ortaya çıktığı gözlenmiştir. Besleyici tasarımının değişimi, kalıplamada tek ya da çift besleyici kullanımı yapıdaki değişimi etkilemediği tespit edilmiştir. Ortaya çıkan yapı ilgili alaşım standardına göre beklenen bir yapı olup, mikroyapı resmindeki değişim alaşımların grafit çaplarına bağlı olarak değişkenlik gösterdiği anlaşılmaktadır.

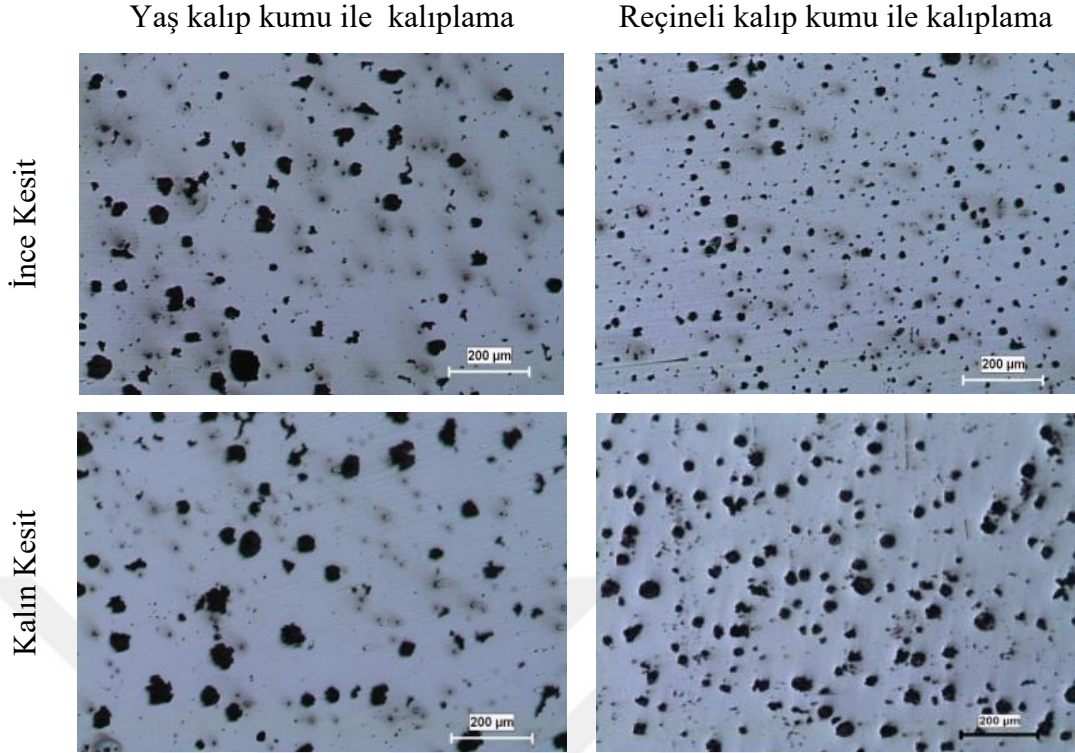


Şekil 44. Yan çift besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı.

Şekil 45'te üstten tek besleyici, Şekil 46'da üstten çift besleyici kullanarak kalıplanmış yaş kalıp kumu ve reçineli kum ile kullanarak kalıplanmış döküm numunelere ait 50x büyütmede çekilmiş mikroyapı resimleri verilmiştir.



Şekil 45. Üst tek besleyiciyle dökülen numunelerin parlatma sonu mikro yapısı.



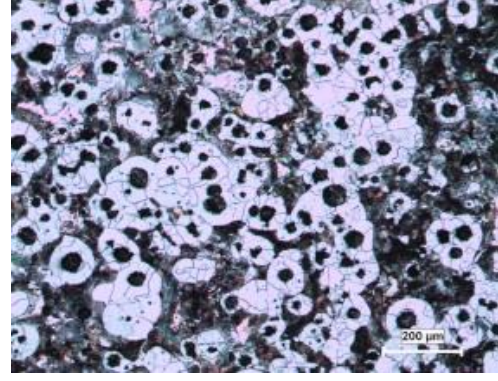
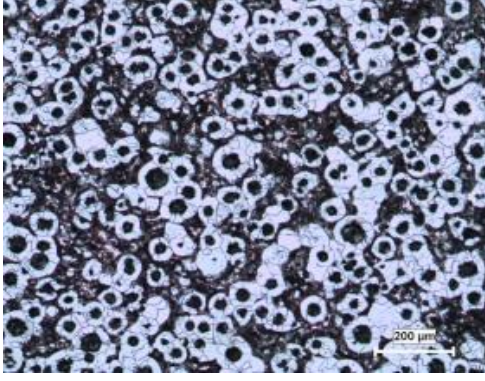
Şekil 46. Üst çift besleyiciyle dökülen numunelerin parlatma sonu mikro yapısı.

Parlatma sonrası verilen mikroyapı resimleri incelendiğinde yandan besleyicili kalıp tasarımına paralel sonuçlar ortaya çıktığı anlaşılmaktadır. Kesit kalınlığının artmasına bağlı olarak ortaya çıkan grafit çaplarının daha da büyüdüğü ve reçineli kalıpta ortaya çıkan grafit kürelerinin daha düzgün küreselliğe sahip olduğu gözlenmiştir. Bu durumun kalıp rijitliğinden dolayı katılaşma esnasında ortaya çıkan genişlemede reçineli kalıbın genişlemeden stabil olarak kalması ile açıklanabilir. Ayrıca kalıp tasarımında besleyici yerleşiminin üstten veya yandan yapılması durumunun mikroyapı değişimine etkisi incelendiğinde üstten besleyici ile kalıplanan dökümlerde kalıp katılaşma zamanının besleyici boğazına bağlı olarak daha erken olmasından dolayı özellikle reçineli kalıpta daha küçük grafit çaplı küreler ortaya çıkardığı anlaşılmaktadır.

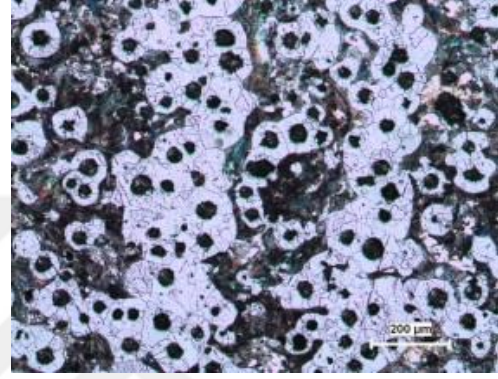
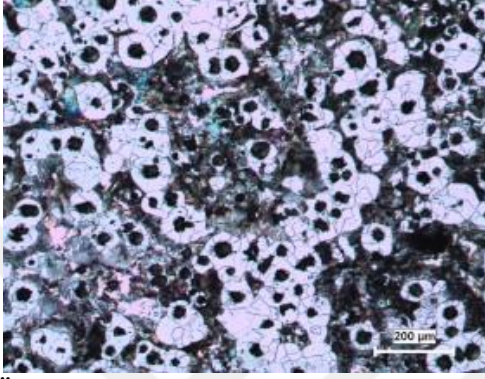
Yaş kalıp kumu ile kalıplama

Reçineli kalıp kumu ile kalıplama

İnce Kesit



Kalın Kesit

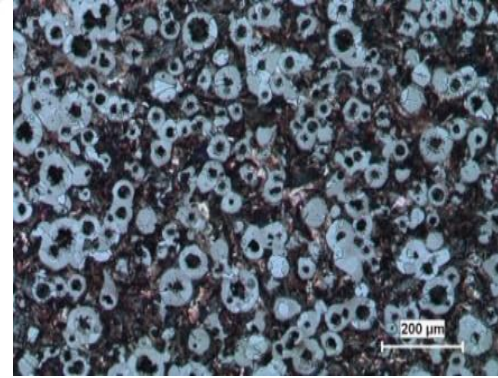
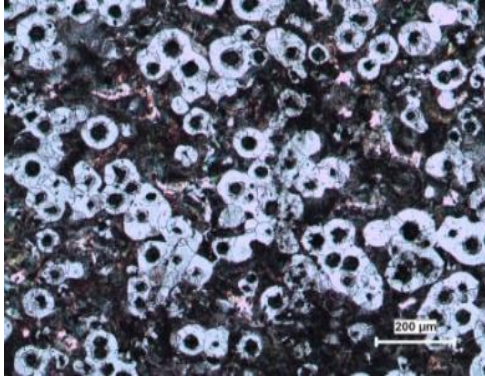


Şekil 47. Üst tek besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı.

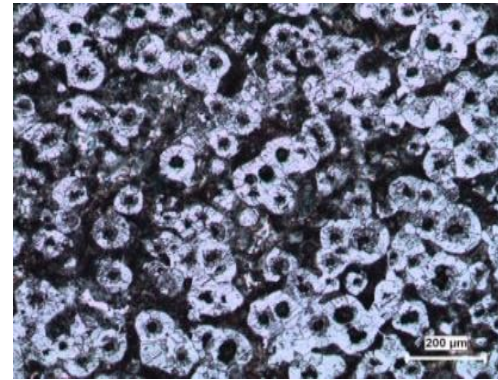
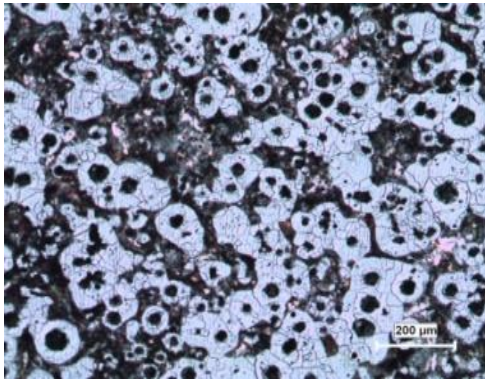
Yaş kalıp kumu ile kalıplama

Reçineli kalıp kumu ile kalıplama

İnce Kesit



Kalın Kesit



Şekil 48. Üst çift besleyiciyle dökülen numunelerin dağlama sonu mikro yapısı.

İmaj Analiz Değerlendirmeleri

Tez kapsamında yapılan imaj analiz değerlendirmelerinde farklı kalıplama tasarımı ve kalıp kumu ile hazırlanan kalıplara yapılan KGDD'lere ait numunelerin bilgisayar destekli imaj analiz yazılımlarıyla mikro yapı analizleri inceleme sonuçları verilecektir. Numunelerin mikro yapı özelliklerinden üretimlerinin dökülen standarda uygunluğu kontrol edilecektir. Numuneler parlatma sonrası ve dağlama sonrası ayrı ayrı mikro yapı incelemelerine tabi tutulmuştur.

KGDD numuneler metalografik olarak hazırlandıktan sonra bilgisayara bağlı kamera ile Nikon marka mikroskoptan mikro yapı görüntüleri alınarak resimler Clemex İmaj Analiz yazılımıyla işlenmiştir. Parlatma sonrası yapılan mikro yapı incelemelerinde resimde sadece ana matris ve grafit küreleri tespit edilebilmektedir. Numunelerin parlatma sonrası mikro yapı resimleri çekilerek, resimlerden numune içyapısındaki % küresellik miktarı, ortalama küre çapı ölçümü ve kürelerin kapladığı yüzde alan ölçümleri yapılmıştır. Ölçümler daha geniş bir alanı kapsaması ve daha net sonuçlar verdiği tespit edildiğinden, numunelere ait 100x büyütmede çekilen mikro yapı resimleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

Tablo 5 'te değişen kalıp tasarımı, inceleme yapılan kesit bölgesi, kalıp kumuna bağlı olarak her bir numune için yapılan ölçümlere ait ortalama imaj analiz sonuçları verilmiştir.

KGDD numunelerden alınan mikro yapı resminden yapılan inceleme sonuçlarına göre, yaş kalıp kumu ile üretilen numunelerde küresellik ortalama % 84 civarında ölçülürken, reçineli kum ile hazırlanan kalıplarda küresellik değerinin % 87 civarına çıktığı tespit edilmiştir. Mikroyapı da ortaya çıkan ortalama küre çapı, % küresel grafit miktarı ve 100x büyütmede küre sayıları değerlerinde yapılan karşılaştırmada kalıp kumu değişimi açısından somut ve açıklanabilir bir değişiklik olmadığı gözlenmiştir. Ancak tüm kalıplama ve kalıp kumu ile yapılan dökümlerde dikkat çeken bir husus kesit kalınlığının değişmesine bağlı olarak küre çapındaki değişimdir. Kesit kalınlığı arttıkça katılama süresinin uzamasına bağlı olarak ortaya çıkan grafitlerin ortalama çaplarında artış gözlenmiştir. Benzer şekilde çift besleyicili dökümlerde katılama süresi daha uzun süreceğinden dolayı küre çapı artmış ve buna bağlı olarak yapıda 100x büyütmede ortaya çıkan grafit küre sayısında artış meydana gelmiştir. Genel olarak yapılan değerlendirmeler sonucunda farklı şartlara sahip KGDD üretiminde mikro yapı üzerinde etkisinin incelendiği ve modül sayılarının belirlendiği çalışmada kesit kalınlığının incelenmesi ile katılama zamanının azalmasına bağlı olarak küre çapının azaldığı ve küre sayısının arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca soğuma hızının artması ile birlikte, kürelerin daha düzgün yapıda oluşarak % küresellik değerlerinin arttığı, ortalama küre çapının azalarak, birim alana düşen küre sayılarının arttığı tespit edilmiştir.

Tablo 5. İmaj analiz ölçüm sonuçları

Kalıp Kumu	Besleyici Durumu	Kesit Yeri	% Küresellik	Küre çapı (µm)	% Küresel Grafit miktarı	100x Büyütmede Küre Sayısı	
Yaş kalıp	Yan Tek Besleyici	İnce	84,4	21,5	9,4	216	
		Kalın	84,6	28,6	9,5	185	
	Yan Çift Besleyici	İnce	83,2	23,6	9,3	204	
		Kalın	83,4	29,2	9,5	176	
	Üst Tek Besleyici	İnce	83,8	20,8	9,6	224	
		Kalın	83,3	24,5	9,2	198	
	Üst Çift Besleyici	İnce	84,1	22,4	9,7	215	
		Kalın	83,9	26,3	9,9	193	
	Reçineli kalıp	Yan Tek Besleyici	İnce	87,8	21,4	9,7	218
			Kalın	88,1	28,2	9,8	182
Yan Çift Besleyici		İnce	87,5	22,5	9,6	218	
		Kalın	87,3	26,8	9,9	186	
Üst Tek Besleyici		İnce	87,5	20,2	10,1	235	
		Kalın	87,2	23,9	9,6	198	
Üst Çift Besleyici		İnce	86,8	25,6	9,7	206	
		Kalın	88,6	28,9	9,8	191	

İmaj analiz yazılımında ayrıca mevcut kürelerin hangi çaptan % kaç ve kaç adet küre olduğu tespit edilebilmektedir. Küresellik ölçüm sonuçları ise numunenin ASTM A247 standardına göre yapıda sayılan kaç adet grafit küresinin % kaç küresellik değerine sahip olduğunu gösterilebilmektedir. İstenirse kaç adet kürenin hangi küresellik yüzdesinde olduğu sonuçlarda istatistiki değerlerden anlaşılabilir. Bu değerlere göre mikro yapının ve dökümün uygunluğu hakkında fikir sahibi olunabilir. İlgili döküm parçayı temsil edilecek şekilde alınan numuneden benzer şekilde birçok ölçüm yapılarak ortalama sonuçları alınıp buna yapılan değerlendirmelerde her bir modül değerindeki dökümlerin % küresellik değerlerinin, küre sayısı ve küresel grafit çaplarının ilgili alaya ait standart değerlere uygun olduğu anlaşılmaktadır.

Numuneler parlatma sonrası %2 nital çözeltisi ile dağlandıktan sonra tekrar mikro yapı incelemeleri yapılmış ve resimleri çekilmiştir. Dağlama sonrası numune mikro yapısında fazlar farklı renklerde görüntülenebilmektedir. Bu resimlerin incelemeleri sonucu yapıdaki fazları ve yüzde faz dağılımları tespit edilebilecektir. İmaj analiz çalışmalarında renk farklılığının daha belirgin olduğu ve daha net sonuçlar alınabileceği düşünülerek çalışmalar 100x büyütmedeki resimlerde yapılmıştır. Dağlama sonrası mikro yapı incelemelerinde de görüldüğü gibi perlit ağırlıklı yapıda, ayrıca ferrit ve küresel grafitler mevcuttur. İmaj analiz çalışmalarında fazların

belirlenmesi aşamasında mikro yapı resmi üzerinde perlit ve küresel grafitler renk tonlarının birbirine yakın olmasından dolayı aynı faz gibi algılanmaktadır. Bu sebeple ilgili analizde elde edilen perlit değerinin belirlenmesi için yapıda belirlenen perlit ve grafitlerin toplamı elde edilecektir. Elde edilen değerden parlatma sonrası elde edilen % küresel grafit değeri çıkartılarak ilgili şartlarda yapılan döküm numune ortalama perlit faz değeri tespit edilmiştir. Tablo 6’da tez kapsamında yapılan dökümlerden elde edilen numunelerden yapılan birçok ölçüme ait ortalama faz miktarları mevcuttur.

Tablo 6’da verilen ortalama faz analize değerleri incelendiğinde ve yapılan çalışmalardan elde edilen bilgiler ışığında değişen döküm şartlarının yapıdaki faz değişimine sistematik ve doğrudan bir etkisi olmadığı düşünülmektedir. İlgili faz analizi değerlerinin değişimi daha çok mevcut numunelerin kimyasal bileşimine bağlı olarak etkilenmekte ayrıca hızlı katılaşmaya bağlı olarak oluşan grafit kürelerinin ebatlarının küçülmesi ile ilişkili olduğu düşünülmektedir. Yapı içerisinde ayrıca kalıntı seviyelerde diğer renklerde görüntülenen fazlarda mevcut olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 6. Faz analizi ölçüm sonuçları

Kalıp Kumu	Besleyici Durumu	Kesit Yeri	% Perlit	% Ferrit	% Küresel Grafit miktarı
Yaş kalıp	Yan Tek Besleyici	İnce	78,2	12,4	9,4
		Kalın	77,3	13,2	9,5
	Yan Çift Besleyici	İnce	77,6	13,1	9,3
		Kalın	77,7	12,8	9,5
	Üst Tek Besleyici	İnce	77,9	12,5	9,6
		Kalın	77,1	13,7	9,2
Üst Çift Besleyici	İnce	76,8	13,5	9,7	
	Kalın	77,2	12,9	9,9	
Reçineli kalıp	Yan Tek Besleyici	İnce	77,1	13,2	9,7
		Kalın	76,9	13,3	9,8
	Yan Çift Besleyici	İnce	76,8	13,6	9,6
		Kalın	77,5	12,6	9,9
	Üst Tek Besleyici	İnce	77,1	12,8	10,1
		Kalın	76,7	13,7	9,6
Üst Çift Besleyici	İnce	76,8	13,5	9,7	
	Kalın	76,9	13,3	9,8	

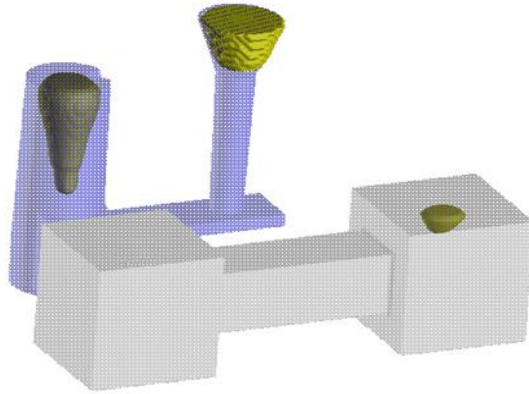
Penetrant Test Sonuçları ve Modelleme Sonuçları ile Karşılaştırılması

Döküm numuneleri deneysel çalışmalar bölümünde açıklandığı gibi kesilmiş ve yüzeyleri frezede işlenerek, penetrant testlerine tabi tutulmuştur. Şekil 49’da yaş kalıp kumu ile hazırlanmış yandan tek besleyicili döküme ait penetrant testi sonuçları verilmiştir.



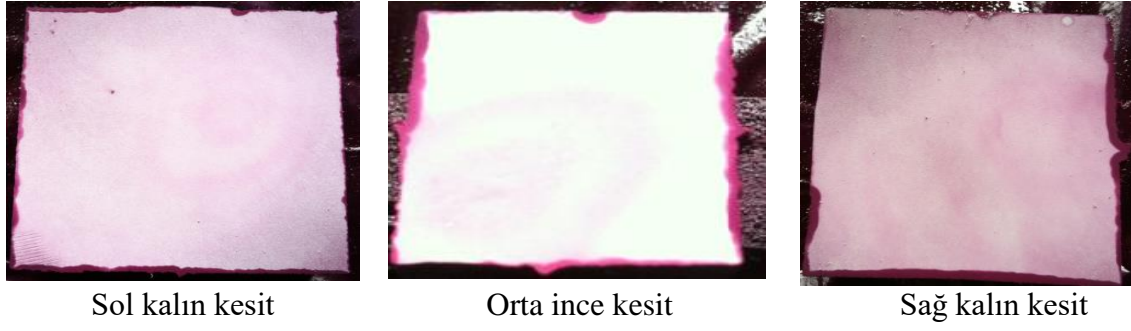
Şekil 49. Yaş kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin penetrant testi.

Şekil 49’da verilen test sonuçları incelendiğinde döküm numunenin sol tarafta kalan kalın kesitli bölgesinde çekinti boşluğu olduğu görülmektedir. İlgili tasarıma ait kalıplama tek besleyici ile yapıldığında besleyici bağlı olmayan kısımda hata oluşmuştur. Gerçek döküm sonuçlarının karşılaştırılması amacıyla SolidCast döküm simülasyon yazılımıyla modellemeler yapılmıştır. Şekil 50’de yandan tek besleyicili tasarıma ait %99,8 hassasiyette çekinti riskine ait sonuç görüntüsü verilmiştir.



Şekil 50. Yaş kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin makroporozitesi.

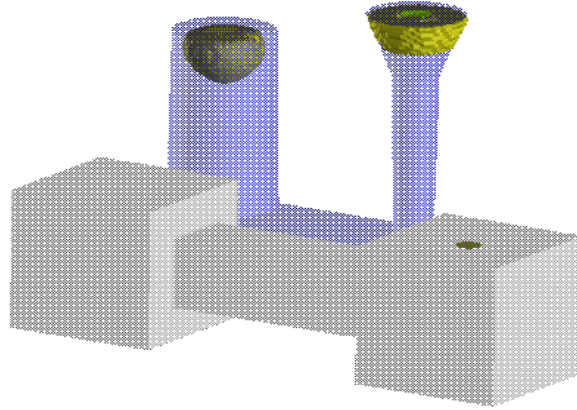
Modelleme çalışmalarında elde edilen sonuçlar ile gerçek döküm sonuçları karşılaştırıldığında sonuçların uyumlu olduğu görülmektedir. İlgili tasarımda hata çıkmasının sebebi olarak tasarımda tek besleyicinin yaş kalıp kumu için yeterli olmadığı anlaşılmaktadır. Aynı tasarım için reçine kum kalıba yapılan dökümlere ait penetrant testi sonuçları Şekil 51’de verilmiştir.



Şekil 51. Reçineli kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin penetrant testi.

Şekil 51’de verilen penetrant testi sonuçları incelendiğinde döküm numunede besleyici olmayan kalın kesit üst kısmında çok az bir porozite riski ortaya çıktığı görülmektedir. Yaş kum kalıpta tek besleyici parça ile karşılaştırıldığında ortaya çıkan porozite çok azalmıştır. Bu durumun reçineli kalıpta, yaş kum kalıba göre kalıp rijitliğinin çok daha sağlam olması ile ilişkilendirilmektedir. Kalıp rijitliğinin fazla olmasından dolayı dökme demirin katılaşmasında ortaya çıkan genleşmede döküm parça reçineli kalıpta genleşemediğinden dolayı hata minimize edildiği düşünülmektedir.

Şekil 52’de aynı tasarım için reçineli kalıp kumu şartları göz önüne alınarak yapılan makro porozite gözenek sonucu verilmiştir. Modelleme programında yaş kalıp kumu ile reçineli kalıp kumu özellikleri farkı girilirken, kum farkının yanı sıra dökme demir özelliklerinin belirtilmesi kısmında “Mold Rigidity” kalıp rijitliği kısmında farklı değerler girilmiştir. Modelleme eşleştirmeleri sonucu yaş kalıp kumu için 40, reçineli kalıp kumu için 90 değeri girilerek modellemeler yapılmıştır.

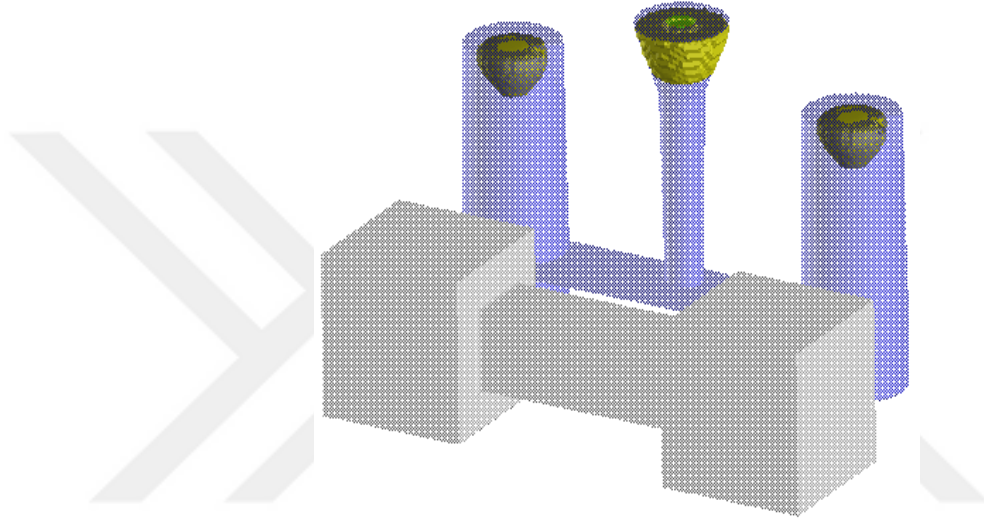


Şekil 52. Reçineli kalıp kumda yan tek besleyicili numunelerin makroporozitesi.

Şekil 52’de verilen modelleme sonucunda geçek dökümle uyumlu olarak besleyicisiz olan kalın kesit üst kısımlarında az miktarda çekinti riski olacağı gözlenmiştir. Yandan çift besleyici ile yaş kalıp kumu ile yapılan dökümlere ait penetrant testi sonuçları Şekil 53’de ve makroporozite riski sonuçları Şekil 54’te verilmiştir.



Şekil 53. Yaş kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin penetrant testi.



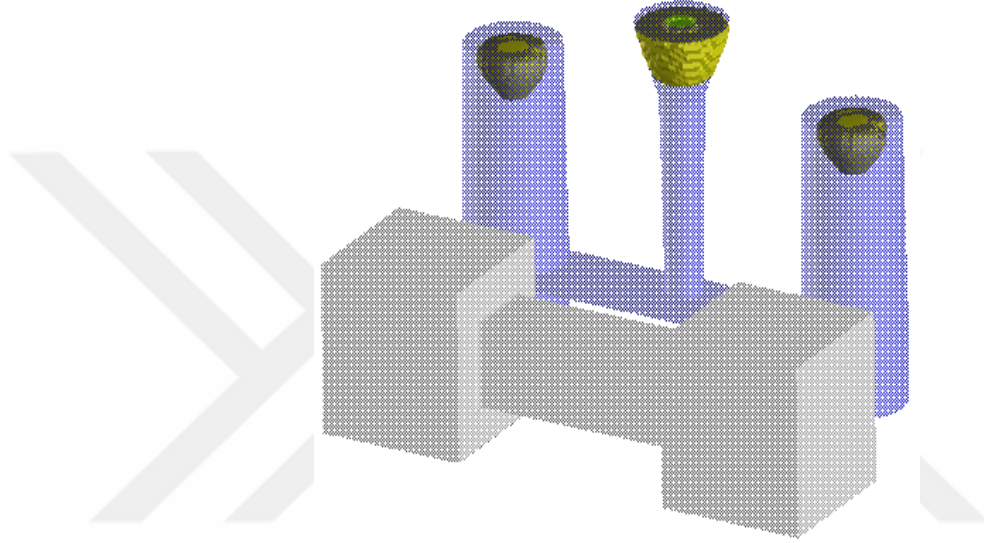
Şekil 54. Yaş kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin makroporozitesi.

Şekil 53 ve Şekil 54’te verilen yan çift besleyicili kalıp tasarımına ait sonuçlarda görüldüğü gibi parça üzerinde hem modelleme sonuçlarında hem de penetrant testi sonuçlarında herhangi bir çekinti gözlenmemiştir. Model üzerinde ilgili döküm şartlarında kalın kesitli bölgelerde oluşan sıcak noktalar besleyiciler ile beslendiğinden döküm parçanın sağlam çıktığı tespit edilmiştir.

Şekil 55’te yandan çift besleyicili kalıp tasarımı için reçineli kalıplara yapılan döküm numunelere ait penetrant testi sonuçları ve Şekil 56’da gerçek fiziki şartlara göre yapılan modellemeden alınan makro porozite sonuçları verilmiştir.



Şekil 55. Reçineli kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin penetrant testi.



Şekil 56. Reçineli kalıp kumda yan çift besleyicili numunelerin makroporozitesi.

Şekil 55 ve Şekil 56’da verilen yan çift besleyicili kalıp tasarımına ait sonuçlarda görüldüğü gibi hem yaş kalıp ile kalıplama da hem reçineli kalıplamada parça üzerinde çekinti gözlenmemiştir. İlgili sonuçlar penetrant testleri ve modelleme sonuçları ile teyit edilmiştir.

Tez çalışmaları kapsamında yandan besleyicili tasarımlar dışında üstten tek ve çift besleyicili kalıplama tasarımları yapılmış ve bu tasarımlar yaş kalıp kumu ve reçineli kumlar ile kalıplanarak dökümleri yapılmıştır. Şekil 57’de üstten tek besleyicili yaş kalıp kumu ile dökülmüş numunelere ait penetrant testi sonuçları ve Şekil 58’de aynı tasarım için modelleme programından alınan makro porozite sonuçları verilmiştir.

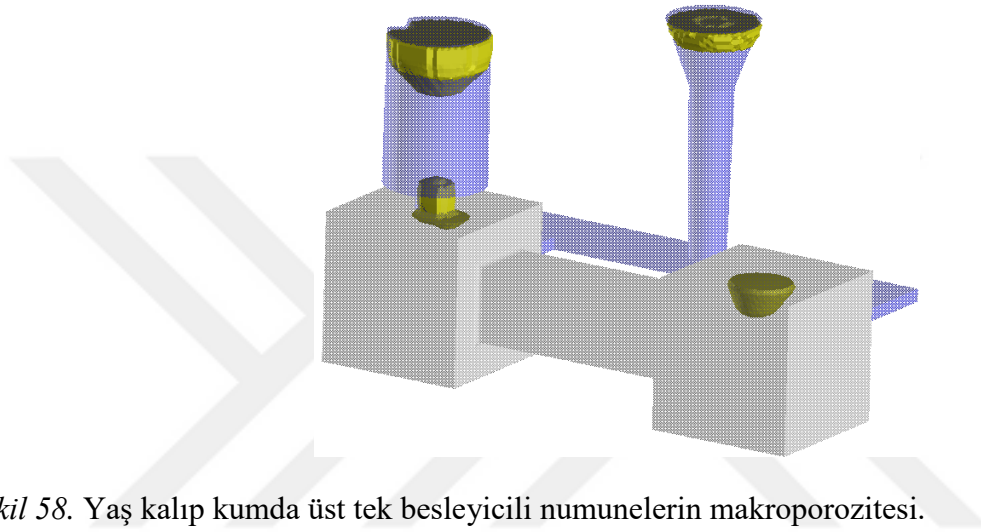


Sol kalın kesit

Orta ince kesit

Sağ kalın kesit

Şekil 57. Yaş kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin penetrant testi.



Şekil 58. Yaş kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin makroporozitesi.

Üstten tek besleyicili yaş kalıp kumu ile yapılan döküm numunelere ait sonuçlar incelendiğinde kalın kesitlerin her ikisinde de bariz bir şekilde çekinti ortaya çıktığı görülmektedir. Bu durum ile ilgili yapılan değerlendirmeler sonucu, besleyici boğaz bağlantısının dar olmasından ve yaş kalıp kumunda genişleme esnasında kalıp ebatlarının bir miktar daha büyümesinin mevcut duruma sebep olduğu düşünülmektedir.

Üstten tek besleyicili reçineli kalıp tasarımına ait penetrant testi sonuçları Şekil 59'da ve makro porozite sonuçları Şekil 60'da verilmiştir.

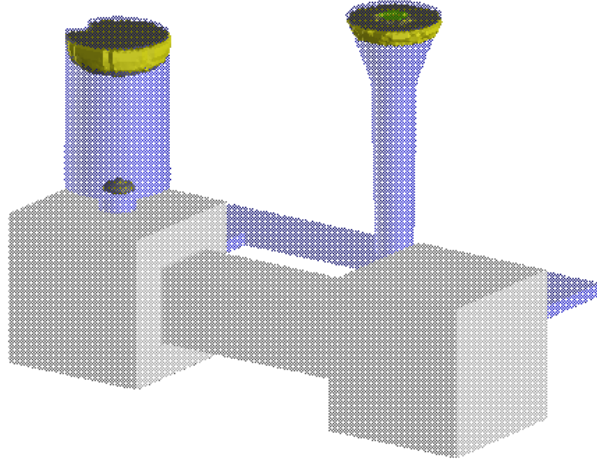


Sol kalın kesit

Orta ince kesit

Sağ kalın kesit

Şekil 59. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin penetrant testi.



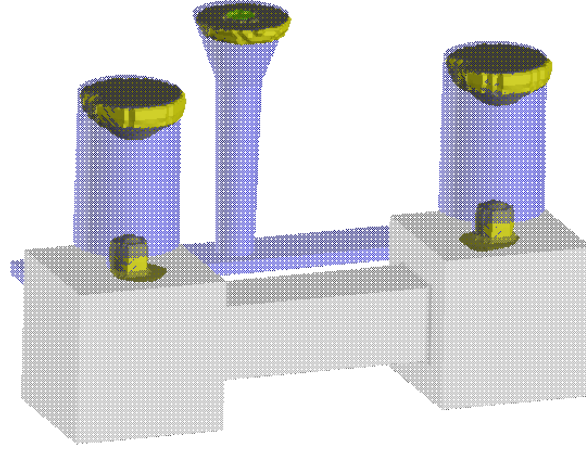
Şekil 60. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin makroporozitesi.

Şekil 59 penetrant testi sonuçları ve Şekil 60 modelleme sonuçlarındanda görüldüğü gibi ilgili tasarım reçineli kum ile hazırlanan kalıplara döküldüğünde döküm parça üzerinde çekinti riski içermemektedir. Aynı tasarım yaş kalıp kumu ile imal edildiğinde ortaya çıkan hatalar besleyici boğazının genişmeden dolayı açılarak kalıbı yeterince besleyememesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca aynı tasarım için kalıp kumu değişimine bağlı olarak besleyicideki çekinti oranları incelendiğinde yaş kalıp kumunda besleyicide daha fazla çekinti olmasına rağmen kalıp ebatlarının genişmeden dolayı büyümesinden kaynaklı hata çıktığı ancak reçineli kalıpta besleyicide daha az çekinti olmakla birlikte besleyici boğazının kalıbı beslemesi sonrası katılaşmasından dolayı genişleme etkisiyle döküm parçada çekinti ortaya çıkmadığı gözlenmiştir.

Üstten çift besleyicili yaş kalıp kumu ile yapılan dökümlere ait numunelerin penetrant testi sonuçları Şekil 61’de ve makro porozite sonuçları Şekil 62’de verilmiştir.



Şekil 61. Yaş kalıp kumda üst çift besleyicili numunelerin penetrant testi.



Şekil 62. Yaş kalıp kumda üst çift besleyicili numunelerin makroporozitesi.

Yaş kalıp kumu ile yapılan üstten çift besleyicili döküm sonuçları incelendiğinde dökümlerin besleme boğazının genişleme esnasında kapanamaması ve kalıp rijitliğinin genişlemeye karşı koyamamasından dolayı dökümlerde bariz bir şekilde çekinti ortaya çıkmıştır. Yandan çift besleyicili tasarımla sonuçlar karşılaştırıldığında bu tasarımdaki besleme boğazının daha düşük olmasından dolayı üstten besleyicili tasarımın boğaz bağlantısından dolayı ilgili tasarımın uygun olmadığı görülmüştür.

Şekil 63'te üstten çift besleyicili reçineli kalıp kumu ile yapılan dökümlere ait numunelerin penetrant testi sonuçları ve Şekil 64'te makro porozite sonuçları verilmiştir. Sonuçlar incelendiğinde reçineli kalıba yapılan tek besleyicili dökümler gibi parça üzerinde herhangi bir çekinti riski oluşmadığı anlaşılmaktadır.

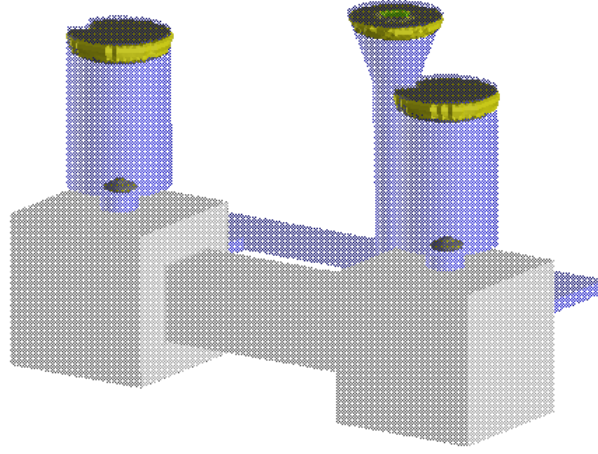


Sol kalın kesit

Orta ince kesit

Sağ kalın kesit

Şekil 63. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin penetrant testi.



Şekil 64. Reçineli kalıp kumda üst tek besleyicili numunelerin makroporozitesi.

Javaid ve Davis (2002) çalışmasında ince çeperli KGDD'lerin mekanik özelliklerine etki eden parametreleri değerlendirmiştir. Yapmış oldukları çalışmada çeper kalınlığı artarsa ferrit miktarında ve grafit çapında artış olduğunu belirtmişlerdir. Kalınlığın azalması durumunda ise sementit miktarının ve küre sayısının arttığını gözlemlemişlerdir (Javaid & Davis, 2002).

Doğan, Schrems ve Hawk (2003) çalışmasında basamak plaka ve küresel grafitli dökümlerin mikroyapılarını incelemiştir. Sayısal analiz yapılarak döküm parametrelerinin mikroyapıya ne oranda etki ettiği sorusuna cevap bulmaya çalışmıştır. Araştırmaları neticesinde kesit kalınlığı azaldıkça içerdiği perlitin, nodülerliğin ve nodül sayısının arttığı, nodül boyutunun ise azaldığı sonucunu elde etmiştir (Doğan vd., 2003).

Ekinci (2009) çalışmasında numuneleri %2' lik Nital ile dağlanmıştır (%98 saf alkol ve %2 Nitrik asit). Dağlama 11-13 sn süre ile yapılmıştır. Leke oluşumunu önlemek amacıyla numune tamamen kurutulmuştur. Mikroyapı fotoğraflarından ortalama küre sayısı tespit edilmiştir. Testi yapılan numunelerde küre sayısı arttıkça küreselliğin arttığı ve kalınlığın azalmasına bağlı olarak ortalama grafit çapında küçülmenin meydana geldiği gözlemlenmiştir (Ekinci, 2009).

Bockus ve Zaldarys (2009) çalışmasında kesit boyutunun KGDD üretimi üzerindeki etkisini ne oranda olduğunu tespit etmeyi amaçlamışlardır. Farklı kesit kalınlığına sahip parçaların mikroyapıları incelenmiştir. Bu inceleme sonucunda küre çaplarının artışının kesit kalınlığının artmasıyla ilişkili olduğu görülmüştür (Bockus & Zaldarys, 2009).

Güzel, Yüksel, Bayrak, Şen ve Ekerim (2014) çalışmasında KGDD' lere kesit kalınlığının sertlik ve mikroyapı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Taşlama, dağlama ve parlatma işlemlerinden sonra farklı kesit kalınlıklar üzerinde metalografik incelemeler

yapmışlardır. Kesit kalınlığı arttıkça ferritik yüzdesinin ve nodül çapının arttığını, nodül sayısının azaldığını, tespit etmişlerdir (Güzel *vd.*, 2014).

Alabbasian, Boutorabi ve Kheirandish (2016) çalışmasında oda sıcaklığında nikel (Ni) dirençli KGDD'in mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. En yüksek nodül sayısına sahip numune 2 mm kalınlıkta numune olup onu sırasıyla 6 mm kalınlıkta numune ve son olarak 10 mm kalınlıkta numune takip etmiştir. Nodül sayısında kalınlık artmasına bağlı olarak, soğutma oranının azalmasından dolayı bir azalış durumu olduğu tespit edilmiştir (Alabbasian *vd.*, 2016).

Kasvayee, Ghassemali, Svensson, Olofsson ve Anders (2017) çalışmasında, % 2,36 ve % 3,71 silisyum içeriğine sahip iki sünek demir kullanmıştır. Değişen soğutma hızları sağlayan farklı incelikteki altı plakadan oluşan dökme malzeme üzerinde mikroyapı analizleri yapmışlardır. % 5 Nital çözeltisi ile mekanik olarak parlatılan numuneler kazanmıştır. Grafit boyutu ve çevreleyen ferrit bölgelerinin plaka kalınlığının artırılmasıyla arttığı görülmüştür. Kalın plakalarda grafit parçacıklarının daha büyük olduğu sonucuna ulaşmışlardır (Kasvayee *vd.* 2017).

Mozammil *vd.* (2017) dökme sıcaklığı ve besleyici yolluk tasarımının gözeneklilik oluşumunda etkili olduğunu belirtmiştir. Alüminyum dökümler üzerine yaptıkları bu çalışmayı AutoCAST simülasyon programıyla desteklemişlerdir (Mozammil *vd.* 2017).

Megahed, El-Kashif, Shash ve Essam (2018) çalışmasında GGG 70'in bir orta frekans indüksiyon ocağında temel metal olarak kullanarak döküm için üretilen sıkıştırılmış grafit demir örnekleri (CGI) üretilmiştir. Numunelerin mikro yapısı optik mikroskop kullanılarak incelenmiştir. Numuneler bloğun farklı kalınlıklarından (5, 10, 15 ve 20 mm) kesilerek 16 numune oluşturulmuş ve bakalite konulmuştur. Daha sonra numuneler elle öğütülmüş ve 1 mikrometre tanecik büyüklündeki elmas süspansiyonla cilalanma işlemi yapılarak; % 2 Nital ile kazanmıştır. Perlit yüzdesinin dökülme süresine ve kalınlığına bağlı olduğu daha uzun dökülme süresi, düşük kalınlıklarda daha küçük perlit yüzdesinin olduğu anlaşılmıştır. Tüm numuneler için çeper kalınlığı arttıkça nodülerlik yüzdesinin azaldığı ortaya çıkmıştır (Megahed *vd.*, 2018).

Sonuçlar ve Öneriler

Bu tez çalışmasında farklı kesit kalınlıklarına sahip model yandan ve üst boğaz bağlantısı ile tek ve çift besleyicili olarak tasarımı, SolidCast döküm simülasyon programında modellenmesi ve ticari olarak faaliyet gösteren farklı dökümhanelerde yaş kalıp kumu ve reçineli kum kalıp ile KGDD malzemedan üretilmiştir. Elde edilen sonuçlardan derlenen özet bilgiler aşağıda verilmiştir;

- KGDD demir dökümlerinde dökümhane şartları besleyici tasarımı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir
- Aynı tasarıma sahip parçalar farklı döküm şartlarında döküm yapıldığında sonuçlarda ciddi oranda farklılıklar gözlenmektedir.
- KGDD mikroyapıları incelendiğinde katılma zamanı oluşan küre çapı ve büyüklüklerinde etkilidir. Daha küçük modüle sahip ince kesitli bölgelerde oluşan küre çapları büyük kesitli bölgelere nazaran daha homojen bir şekilde dağılım göstererek nispeten daha küçük çaplıdır.
- Ocak içerisine katılan şarj malzeme çeşit ve oranları ile küreselleştirme işlemi, aşılama işlemi döküm yapısını, döküm tasarımını ve döküm kalitesini doğrudan etkilemektedir.
- Kalıp rijitliği çok iyi olmayan, yaş kalıp kumu ile kalıplama yapıldığında döküm parçanın katılma esnasında genişlerken kalıbı genişlettiği ve çıkan döküm parçanın ölçülerinin daha büyük olduğu gözlenmiştir.
- KGDD dökümlerinde kimyasal bileşim, döküm sıcaklığı, döküm parça modülü, kalıp rijitliği (kullanılan kalıp kumu malzemesi), aşılama kalitesine (metalürjik şartlar) göre gerekli besleyici tasarımı değişkenlik göstermektedir. Aynı model için bu şartlar değiştiğinde besleyici gereksinimi tek ya da çift olabilmektedir.
- Besleyici tasarımı yapılırken tek sıcak nokta oluşan ve tek besleyici gereken durumda daha fazla besleyici kullanıldığında parça sakat çıkabilmektedir.
- Döküm parça besleyici tasarımında besleyici boğaz bağlantısı önemlidir ve boğaz bağlantısının tipi gerekli besleyici ölçülerini etkilemektedir.
- Dökme demirlerde besleyici tasarımı yapılırken hacimsel genişleme özellikleri çekinti genişlemeyi bir arada göstermektedir. Bu sebeple tasarım yapılırken özellikle boğaz bağlantısı dikkatle seçilmeli ve çekinti sonrası parçada genişleme başladığı noktada boğazın

katılaşmasını tamamlayacak şekilde hesaplanarak kusma olarak tabir edilen durumlar önlenmelidir.

- Besleyici tasarımı için döküm simülasyon programları etkili araçlardır ve döküm şartları birebir programa aktarıldığında gerçek döküm sonuçları ile uyumlu sonuçlar vermektedir.

- Gerçek döküm sonuçları ile modelleme sonuçları incelendiğinde genelde uyumlu sonuçlar elde edilmiştir, ancak porozitenin tam olarak yeri ve büyüklüğü ile ilgili farklılıklar mevcuttur. Buda halen gerçekte var olan ancak simülasyon programında gözardı edilen bazı faktörlerin habercisi niteliğindedir. Bu faktörlerin araştırılarak daha gerçekçi sonuçların alınması mümkün hale gelebilir.



KAYNAKÇA

- Albayrak, Ö. (2001). *Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Porozite Oluşumunun Araştırılması*. Mersin Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 114174)
- Alabbasian, F., Boutorabi, S. M. A., & Kheirandish, S. (2016). *Effect of inoculation and casting modulus on the microstructure and mechanical properties of ductile Niresist cast iron*. *Materials Science & Engineering A*, 651, 467-473.
- Arda, İ., & Kayıkcı, R. (2006). *Döküm simülasyonu nedir? Ne değildir?* Metal Dünyası.
- ASM Handbook, Vol.15, *Castings* (1988). ASM International, Metalspark, Ohio, USA.
- ASM Specialty Handbook, “*Cast Irons*” (1996). ASM International.
- Baydoğan, M. (1996). *GGG-60 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirde Ostemperleme Isıl İşleminin Çekme, Yorulma ve Aşınma Özelliklerine Etkisi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 55712)
- Bilici, M.K. (2004). *Alaşimsız Dökme Demirlerin Aşınma Özelliği*. Marmara Üniversitesi (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 155150)
- Bhatt, H., & Barot, R. (2014). *A design optimization of feeding system and solidification simulation for cast iron*. In: *Proceeding on 2nd International Conference on Innovations in Automation and Mechatronics Engineering*, vol. 14, pp. 357—364.
- Bockus, S., & Zaldarys, G. (2009). *Influence of the Section Size and Holding Time on the Graphite Parameters Of Ductile Iron Production*. *Metalurgia*, 48 (1), 19-22.
- Campbell, J. *Casting* (1991). Heinemann Ltd Oxford.
- Cavcar, M. M. (1996). *Dökme Demirler ve Dökme Demirlerin Kaynağı*. Ankara: Oerlikon Yayın Evi.
- Choudhari, C. M., Narkhede, B. E., & 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.
- Chvorinov, N. (1940). *Theory of Solidification of Castings*, *Giesserei*, 27, 177- 225.

- Çavuşoğlu, E. N. (1981). *Döküm Teknolojisi I*. İstanbul Teknik Üniversitesi Matbaası, Gümüşsuyu.
- Çetin, A. (2016). *Küresel Grafitli Dökme Demir*. Ankara: El Kitabı Dökümhane Eğitim Projesi Özel Sayı Serisi.
- Çolak, M., Şirin, S., Kayıkçı, R., & Bilgin, Ö. (2009). *Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümlerinde Simülasyon Tekniği ile Besleyici Tasarımı ve Uygulamaları*.
- Dabade, U. A., & Bhedasgaonkar, R. C. (2013). *Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique*. Procedia CIRP, 7, 616-621.
- Doğan, Ö. N., Schrems, K. K., & Hawk, J. A. (2003). *Microstructure Of Thin-Wall Ductile Iron Castings*. 107th MetalCasting Congress & CastExpo, Milwaukee.
- Ekinci, E. (2009). *Düktül Demirlerde Aşıl原因ının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 245372)
- Erdoğan, M. (2000). *Mühendislik Alaşımalarının Yapı ve Özelliği*. Nobeli Yayın Dağıtım , Cilt. 1, Ankara, Türkiye.
- Ersümer, A., Uzunova, T. (1971). *Demir Dökümü*. İ. T. Ü Matbaası İstanbul, Türkiye.
- Franssman, H. (2007). *Hızlı ve Doğru Yolluk ve Besleyici Dizaynı için Döküm Simülasyon Programlarının Pratik Kullanımı*. Metal Dünyası, 164, 30-31.
- Fredriksson, H., Stjerndahl, A., & Tinoco, J. (2005). *On The Solidification Of Nodular Cast Iron And Its Relation To The Expansion And Contraction*, Materials Science and Engineering. A 413–414, 363-372.
- Freitag, L., Schafföner, S., Faßauer, C., & Aneziris, C.G. (2018). *Functional coatings for titanium casting molds using the replica technique*. Journal of the European Ceramic Society.
- Guo, Z., Saunders, N., Miodownik, A. P., & Schillé, J. P. (2005). *Modelling of materials properties and behaviour critical to casting simulation*. Materials Science and Engineering: A, 413, 465-469.
- Gül, F. (1989). *Küresel grafitli dökme demirde malzeme ve proses parametrelerinin küre dağılımına etkisi*. Sf.4-8.

- Güzel, E., Yüksel, Ç., Bayrak, Y., Şen, Ö., & Ekerim, A. (2014). *Effect of Section Thickness On The Microstructure and Hardness Of Ductile Cast Iron*. *Materialprüfung*, 56 (4), 285-288.
- Hodbe, G. A., & Shinde, B. R. (2018). *Design And Simulation Of LM 25 Sand Casting For Defect Minimization*. *Materials Today: Proceedings*, 5(2), 4489-4497.
- Javaid, A., & Davis, K.G. (2002). *Evaluation of Microstructural Factors Affecting the Mechanical Properties of Thin-Wall Ductile Iron Castings*. *Road Materials and Pavement Design*. *Microscopy Society of America*, 12(1), 177-194.
- Kasvayee, K. A., Ghassemali, E., Svensson, I. L., Olofsson, J., & Anders, E. W. J. (2017). *Characterization and Modeling of The Mechanical Behavior of High Silicon Ductile Iron*. *Materials Science & Engineering A*, 708, 159-170.
- Kayıkçı, R. (2008). *Büyük kütleli bir çelik parçanın dökümünde klasik ve bilgisayar destekli mühendislik yöntemlerinin karşılaştırılması*. *Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Cilt 23, No 2.
- Kayıkçı, R. (2010). *Besleyicisiz Döküm Yöntemi İle Dökülen Bir Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümün İncelenmesi*, 3. Uluslararası Döküm ve Çevre Sempozyumu (IFES 2009), İstanbul.
- Kayıkçı, R., & Akar, N. (2007). *Farklı Kesit Kalınlıklarına Sahip Büyük Hacimli Bir Çelik Dökümünün Simülasyon Teknikleriyle Tasarlanması*. *Politeknik Dergisi*, 10-4, 214-227.
- Kayıkçı, R., & Akar, N. (2010). *Bilgisayar Destekli Döküm Tasarımı kitabı*. Dts Teknoloji Arge Yazılım Eğitim Ve Dan. Ltd. Şti, Sakarya.
- Kayıkçı, R., & Çolak, M. (2009). *Döküm Simülasyon Programıyla Dökme Demir Dökümlerinde Besleyici Tasarımı Uygulamaları*, *Metal Dünyası*.
- Kermanpur, A., Mahmoudi, S., & 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.
- Lacaze, J. (1999). *Solidification Of Spheroidal Graphite Cast Irons: III. Microsegregation Related Effects*. *Acta mater*. Vol. 47, No. 14, pp. 3779-3792.
- Ling, Y., Zhou, J., Nan, H., Yin, Y., & Shen, X. (2017). *A shrinkage cavity prediction model for gravity castings based on pressure distribution: A casting steel case*. *Journal of Manufacturing Processes*, 26, 433-445.

- Liu, F., Yang, L., Huang, Y., Jiang, P., Li, G., Jiang, W., Liu, X., & Fan, Z. (2017). *Performance of resin bonded sand for magnesium alloy casting*. Journal of Manufacturing Processes.
- Martinez, R. G., Torrea, U., Lacazeb, J., & Sertuchaa, J. (2018). *Effects of high silicon contents on graphite morphology and room temperature mechanical properties of as-cast ferritic ductile cast irons*. Part I– Microstructure.
- Masoumi, M.H., Hu, J., Hedjazi, M., & Boutorabi, A. (2005). *Effect of gating design on mould filling paper*. AFS Trans. 05-152 (2), 1–12.
- Megahed, H., El-Kashif, E., Shash, A. Y., & Essam, M. A. (2018). *Effect of holding time, thickness and heat treatment on microstructure and mechanical properties of compacted graphite cast iron*. Journal of Materials Research and Technology, 487, 1-9.
- Meredith, J. F. (2008). *Solving Porosity Problems in Graphitic Iron Castings*. Casting Solutions Pty Ltd Moorebank, NSW, Australia.
- Metals Handbook (1990). *Properties and Selection: irons, steels and high performance alloys*. Vol. 1, Tenth Edition, ASM International.
- Mozammil, S., Karloopiaa, J., & Jhaa, P.K. (2017). *Investigation of porosity in Al casting* Materials Today: Proceedings 5 (2018) 17270–17276.
- Nimbulkar, S. L., & 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.
- Odabaşı, A. (2004). *Kokil ve Kum Kalıba Döküm Yöntemleriyle Üretilen Yüksek Kromlu Beyaz Dökme Demirlerin X-Işınları ve Taramalı Elektron Mikroskobu Çalışmalarıyla Karakterize Edilmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 152319)
- Özel, A. (1994). *GGG 40-80 Sınıfı Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Ostemperleme Isıl İşleminin Darbe Direnci ve Geçiş Sıcaklığına Darbe Etkisinin İncelenmesi*. İstanbul Teknik Üniversitesi,(Doktora Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 39529)
- Pathak, N., Kumar, A., Yadav, A., & Dutta, P. (2009). *Effects of mould filling on evolution of the solid–liquid interface during solidification*. Applied Thermal Engineering, 29(17-18), 3669-3678.
- Pedersen, K. M., Hattel, J. H., Tiedje, N. (2006). *Numerical modelling of thin-walled hypereutectic ductile cast iron parts*. Acta Materialia 54, 5103–5114.

- Ravi, B., & Joshi, D. (2007). *Feedability analysis and optimization driven by casting simulation*. Indian Foundry J. 53 (6), 71—78.
- Riahi, A.R., & Alpas, A.T. *Wear*. (2003). Wear map for grey cast iron.
- Sağlam, D. (2009). *Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri*. Marmara Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 256708)
- Schmidt, D. C. (2007). *The Basics of Solidification, Gating and Riser Design of Cast Irons*, AFS Wisconsin Regional Conference, Finite Solutions Inc Slinger WI, February 8.
- Seo, H. Y., Seo, P. K., & Kang, C. G. (2019). *A study on the S/W application for a riser design process for fabricating axisymmetric large offshore structures by using a sand casting process*. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering.
- Stefanescu, D. M., (2005). *Solidification and modeling of cast iron*. A short history of the defining moments, Materials Science and Engineering A 413–414, 322–333.
- Sutaria, M., Gada, V. H., Sharma, A., & Ravi, B. (2012). *Computation of feed-paths for casting solidification using level-set-method*. Journal of Materials Processing Technology, 212(6), 1236-1249.
- Şahin, Z. (1992). *Ostempelenmiş Küresel Grafitli Dökme Demir*. Bitirme Ödevi. İ.T.Ü. Kimya-Metalurji Fakültesi Malzeme Kürsüsü.
- Şirin, S., Çolak, M., & Kayıkçı, R. (2009). *Küresel Grafitli Dökme Demir Dökümlerinde Simülasyon Tekniği ile Besleyici Tasarım ve Uygulamaları*.
- Türen, Y. (1998). *Kupol Ocağında Kullanılan Flakslardan Kireçtaşı ve Mermerin Alternatif Kullanımının Gri Dökme Demirin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi*. Gazi Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 76335)
- Vijayaram, T. R. (2005). *Mechanical Property Investigation of LM 6 Alloy Castings Manufactured with the Aid of Casting Solidification Simulation Technology*. Indian Foundry Journal, 51(11), 30-34.
- Yıldız, M. (2014). *Dökme Demirlerde Nicel Faz Teknikliklerinin İncelenmesi*. Sakarya Üniversitesi, (Yüksek Lisans Tezi), Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 354308)

ÖZGEÇMİŞ

Mete ŞEKERDEN

1987 yılında Adıyaman’da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Adıyaman’da tamamladı. 2012 yılında Niğde Üniversitesi makine mühendisliğinden mezun oldu. 2013 yılında vatani görevini kısa dönem er olarak İzmir/Narlıdere’de yerine getirdi. 2014 temmuz ayına kadar özel sektörde çalıştıktan sonra Bayburt Üniversitesi Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığına mühendis olarak atandı. Aynı yıl Bayburt Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği tezli yüksek lisans eğitimine başladı. Mete Şekerden meslek hayatına Bayburt Üniversitesi bünyesinde mühendis kadrosunda devam etmektedir.