

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GGG 40 SFERO DÖKME DEMİRDEN ÜRETİLEN BİR PARÇANIN DÖKÜM SİMÜLASYONU, MİKROYAPISAL
KARAKTERİZASYONU İLE MEKANİK VE TRİBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed ORHAN

**MART 2023
TRABZON**



KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**GGG 40 SFERO DÖKME DEMİRDEN ÜRETİLEN BİR PARÇANIN DÖKÜM SİMÜLASYONU,
MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU İLE MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Muhammed ORHAN

ORCID : - - -

Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
"MAKİNA YÜKSEK MÜHENDİSİ"
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 09 / 02 / 2023

Tezin Savunma Tarihi : 22 / 03 / 2023

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK
ORCID : - - -

Trabzon 2023

ÖNSÖZ

Sfero dökme demirlerde uluslararası standartlara uygun mikroyapı ve mekanik özelliklerin elde edilmesi için ferrit/perlit oranından yararlanılır. % 2-3 aralığında silisyum içeren sfero dökme demirlerin matris yapıları incelendiğinde, ferrit, perlit veya bu ikisinin birlikte oluşumundan meydana geldikleri görülmektedir. Malzeme yapısında bulunan perlit, malzeme mukavemetini artırır, fakat sünekliğini düşürür. Dolayısıyla yapıda bulunan ferrit ve perlit oranlarındaki değişikliklerle, üretilen parçanın istenen mekanik özelliklere getirilmesi sağlanabilmektedir. Fakat mekanik özellikleri standartlara uygun hale getirmek için ferrit/perlit oranından yararlanılan sfero dökme demirlerde çok sık karşılaşılan bir problem vardır. Sfero dökme demir yapısında bulunan ferrit/perlit oranı sadece kimyasal kompozisyona değil, aynı zamanda üretilen parçanın soğuma hızına da bağlı olarak değişmektedir. Değişken kesit kalınlıklarındaki döküm parçalarının kesitlerinde farklı miktarlarda perlit oluştuğu görülmektedir. Bir döküm parçasının kalın kesitlerinde yavaş soğuma gerçekleştiği için bu bölgelerde ferrit oranı artarken, hızlı soğuyan ince kesitlerinde perlit oranının fazla olduğu görülmektedir. Bu durum dökümhanelerin soğutma hattı uzunluklarına veya döküm hat hızlarına göre değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla parçalarda istenilen mekanik değerlerin değişkenlik göstermesi tedarikçi firmalar nezdinde büyük sorunlara yol açmaktadır. Bu tez çalışmasında değişken kesit kalınlıklarına sahip birinci nesil küresel grafitli dökme demir olan bir aks yuvası parçasının dökümü ve döküm sonrası soğuma parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösteren mikroyapı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmiştir.

Bu konuyu seçmeme vesile olarak son derece önemli bir bilgi birikim elde etmemi sağladığı ve çalışmalarım sırasında bilgisini ve tecrübesini paylaştığı için danışman hocam Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK'e içtenlikle teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca araştırmaların ve deneylerin gerçekleştirmesinde bana yardımcı olan Hekimoğlu Döküm Sanayi Nak. ve Tic. A.Ş. firması mühendislik müdürü makine yüksek mühendisi Orhan AYDIN'a, kalite ve kontrol müdürü metalürji ve malzeme mühendisi Mustafa ERDEN'e, çalışanlarına ve yöneticilerine, teşekkür ederim. Son olarak çalışmalarım boyunca yanımda olan ve desteklerini esirgemeyen canım annem, babam, kardeşim ve arkadaşlarıma teşekkürleri bir borç bilirim.

Muhammed ORHAN

Trabzon, 2023

TEZİN ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum ‘‘GGG 40 Sfero Dökme Demirden Üretilen Bir Parçanın Döküm Simülasyonu, Mikroyapısal Karakterizasyonu ile Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi’’ başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK’in sorumluluğunda tamamladığımı, verileri/örnekleri kendim topladığımı, deneyleri/analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı/yaptırdığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim. 22/03/2023

Muhammed ORHAN

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZİN ETİK BEYANNAMESİ	IV
İÇİNDEKİLER	V
ÖZET.....	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	X
TABLolar DİZİNİ	XIV
SEMBOLLER DİZİNİ	XV
1. GENEL BİLGİLER.....	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Dökme Demirler	2
1.3. Küresel Grafitli Dökme Demirler	7
1.3.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Genel ve Mekanik Özellikleri	7
1.3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretim Çeşitleri ve Mikroyapıları	9
1.3.2.1. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirler	12
1.3.2.2. Perlitik - Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirler	13
1.3.2.3. Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demirler	14
1.3.2.4. Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler	15
1.3.2.5. Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	16
1.3.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yapısal Elementleri	17
1.3.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi.....	20
1.3.4.1. Küreselleştirme İşlemi (Mg Tretmanı)	24
1.3.4.2. Aşılınması İşlemi.....	26

1.3.5.	Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılaşma	27
1.3.6.	Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler.....	29
1.4.	Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı	33
2.	DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	35
2.1.	Seçilen Döküm Parça	36
2.2.	Seçilen Döküm Parçasının Yolluk ve Besleyici Dizaynının Hesaplanması	37
2.3.	Numune Olarak Seçilen Döküm Parçasının Simülasyon Çalışmaları	44
2.4.	Uygulanan Prosesler	48
2.4.1.	Ergitme Prosesi	48
2.4.1.1.	Ergitme İşleminde Kullanılan Hammaddeler ve Kompozisyonları	49
2.4.1.2.	Karbon Verici Kullanımı	50
2.4.1.3.	Ocak Metali Kimyasal Analizi.....	50
2.4.1.4.	Ocak Metali Sıcaklık Değeri.....	51
2.4.2.	Sfero Reaksiyon İşlemi	51
2.4.2.1.	Reaksiyon Potası	52
2.4.2.2.	Örtü Malzemesinin Türü ve Kalitesi.....	53
2.4.2.3.	Magnezyum Miktarı.....	53
2.4.2.4.	Ergitilmiş Metalin Döküm Potasına Transferi	53
2.4.2.5.	Aşılama İşlemi	54
2.4.3.	Döküm İşlemi.....	55
2.4.3.1.	Son Metal Sıcaklık Değeri	55
2.4.3.2.	Son Metal Kimyasal Analizi	56
2.4.3.3.	Döküm Süresi.....	56
2.4.4.	Kalıplama ve Döküm Sonrası Kalıp Bozma Süreleri	56
2.4.5.	Kalıp Bozma ve Uygulanan Yumuşatma Tavlaması	60
2.4.6.	Numunelerin Elde Edilmesi	61
2.5.	Döküm Parçası Üzerine Yapılan Testler.....	62

2.5.1.	Mikroyapısal İncelemeler	62
2.5.2.	Penetran Sıvı Testi	63
2.5.3.	Mekanik Özelliklerin İncelenmesi	64
2.5.3.1.	Çekme Testi	64
2.5.3.2.	Sertlik Testi	65
2.5.4.	Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi	66
2.5.4.1.	Sürtünme ve Aşınma Testi	66
3.	BULGULAR VE İRDELEME	74
3.1.	Simülasyon Sonuçları	74
3.2.	Mikroyapı Sonuçları	83
3.3.	Penetran Testi Sonuçları	87
3.4.	Çekme Testi Sonuçları	89
3.5.	Sertlik Sonuçları	92
3.6.	Sürtünme ve Aşınma Testi Sonuçları	94
4.	GENEL SONUÇLAR	102
5.	ÖNERİLER	105
6.	KAYNAKLAR	100
	ÖZGEÇMİŞ	109

ÖZET

GGG 40 SFERO DÖKME DEMİRDEN ÜRETİLEN BİR PARÇANIN DÖKÜM SİMÜLASYONU, MİKROYAPISAL KARAKTERİZASYONU İLE MEKANİK VE TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Muhammed ORHAN

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Gençaga PÜRÇEK
2023, 103 Sayfa

Bu çalışmada esas olarak değişken kesit kalınlıklarına sahip GGG 40 malzemeli bir aks yuvası parçasının dökümü, döküm simülasyonu ve döküm sonrası farklı kalıp bozma süreleri ile elde edilen parçaların mikroyapı, mekanik ve tribolojik özellikleri incelenmektedir. Bu sayede endüstride darbeli yüklere maruz döküm parçalarında oluşabilmesi muhtemel hataların önlenmesi ve ilgili endüstriyel kuruluşların karşılaştığı olumsuzlukların giderilerek üretim süreçlerinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda öncelikli olarak küresel grafitli dökme demirler üretiminin temel ilkeleri üzerinde durulmaktadır. Bu bilgiler ışığında küresel grafitli dökme demirlerin endüstriyel uygulamalardaki elemanlarının mikroyapısal, mekanik ve tribolojik açıdan aşınma davranışları ile bu etki altında meydana gelen özellikler incelenmektedir. Çalışmada döküm proseslerinin modellenmesi, kalıp doldurulurken ve doldurma tamamlandıktan sonra kalıp içerisinde ne tür değişiklikler olduğuna dair bilgi edinilmesi ve gerekli matematiksel yaklaşımların yapılabilmesi için Magmasoft döküm simülasyon programından yararlanılmıştır. Çalışmanın amacına yönelik seri üretim şartlarında dökümü gerçekleştirilen parçalar, dengeli ve dengesiz soğuma koşullarını karşılayacak şekilde iki farklı sürede kalıp kumu bozma işlemine tabii tutularak üretilmiştir. Üretilen parçalardaki metalurjik özellikler incelenip standart değerleri karşılamayan parçalar yumuşatma tavlama ile iyileştirilmeye çalışılmıştır. Belirtilen üretim şartları sonucunda üç farklı gruba ait her gruptan 4 numune olmak koşuluyla toplam 12 farklı parçadan alınan numunelerin mikroyapı, sertlik, yüzde uzama, akma-çekme mukavemetleri ve aşınma davranışları incelenmiştir. Sonuçlar simülasyon programı sonuçları ile karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Dökme Demir, GGG 40, Magmasoft, Yumuşatma Tavlama, Triboloji

Master Thesis

SUMMARY

CAST SIMULATION, MICROSTRUCTURAL CHARACTERIZATION AND INVESTIGATION OF MECHANICAL AND TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF A PART PRODUCED FROM EN GJS 400 SPHERO CAST IRON

Muhammed ORHAN

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Mechanical Engineering Graduate Program
Supervisor: Prof. Genççağ PÜRÇEK
2023, 103 Pages

In this study, the microstructure, mechanical and tribological properties of an axle housing part casted with GGG 40 material with variable section thickness, casting simulation and different mold breaking times are examined. In this way, it is aimed to prevent possible errors that may occur in casting parts exposed to impact loads in the industry and to improve production processes by eliminating the negativities faced by the relevant industrial organizations. In this context, primarily the basic principles of the production of spheroidal graphite cast irons are emphasized. Following this information, the microstructural, mechanical and tribological wear behaviors of the elements of spheroidal graphite cast irons in industrial applications and the properties that occur under this effect are examined. In the study, Magmasoft casting simulation program was used to model the casting processes, to obtain information about the changes in the mold while filling and after filling, and to make the necessary mathematical approaches. The parts that were cast under mass production conditions for the purpose of the study were produced by two different unmolding times to meet the balanced and unbalanced cooling conditions. The metallurgical properties of the produced parts were examined and the parts that did not meet the standard values were tried to be improved by softening with heat treatment. The microstructure, hardness, elongation, yield strength, tensile strength and wear behaviours of 12 samples consisting of 4 parts per each of the 3 different groups, produced with the specified production conditions have been examined. These results were evaluated by comparing with the results of the simulation program.

Keywords: Cast Irons, EN-GJS 400, Magmasoft, Softening Annealing, Tribology

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa No

Şekil 1. Demir-karbon denge diyagramı.....	3
Şekil 2. Grafit yapısına göre; (a) BGDD, (b) TGDD, (c) LGDD ve (d) KGDD.....	4
Şekil 3. KGDD'nin mikroyapı fotoğrafları; (a) Perlit + ferrit, (b) Tamamen ferrit	9
Şekil 4. KGDD mikroyapısı; (a) KDF, (b) KDP, (c) FKGDD, (d) PKGDD	11
Şekil 5. KGDD üretim çeşitleri	12
Şekil 6. FKGDD mikroyapı görüntüsü.....	13
Şekil 7. Perlitik-Ferritik KGDD'lerin mikroyapı görüntüsü	14
Şekil 8. PKGDD mikroyapı görüntüsü.....	15
Şekil 9. Temperlenmiş martenzitik KGDD mikroyapı görüntüsü.....	16
Şekil 10. ÖKGDD mikroyapı görüntüsü	17
Şekil 11. KGDD' lerde Si-C oranlarına bağlı en uygun döküm aralığının şematik gösterimi.....	19
Şekil 12. KGDD' nin genel üretim şeması ve indüksiyon ocağında çözünmeyen grafit parçacıkları.....	22
Şekil 13. Magnezyumun küreselleşmeye etkisi.....	23
Şekil 14. Küreselleştirme işlem yöntemleri.....	24
Şekil 15. KGDD'nin katılaşmasını açıklayan faz diyagramı, soğuma eğrisi ve adımlar ...	28
Şekil 16. Dökme demir ısıtma işlem prosesleri ve sıcaklık-zaman grafiği	30
Şekil 17. Soğuma hızının dökme demirlere etkisi.....	31
Şekil 18. Deneysel çalışma sürecinin akış şeması.....	35
Şekil 19. Deney parçasının şematik görünümü	37
Şekil 20. Toplam dökülen ağırlığa karşılık gelen yolluk girişlerinin kesit alanı grafiği	38
Şekil 21. Deney parçasına temas eden yolluk girişlerinin kesit görüntüsü ve alan hesabı.	39
Şekil 22. Yatay yolluk kesit alanı ve ölçülendirilmesi	40

Şekil 23. Deney parçasına ait dikey yolluk ve havşa ölçüleri	40
Şekil 24. Deney parçasının Magmasoft programındaki katılma görüntüsü ve kritik kesitlerindeki modül değerleri.....	43
Şekil 25. Deney parçasının yolluk ve besleyici dizaynının şematik gösterimi	44
Şekil 26. Stl formatına dönüştürülen her bir döküm elemanının Magmasoft programına tanıtılması.....	45
Şekil 27. Deney parçası ve diğer yardımcı elemanların sonlu elemanlar yöntemine göre en küçük hücrelere bölünmesi.....	46
Şekil 28. Deney parçası döküm alaşımı, kalıp malzemesi ve termofiziksel özelliklerinin Magmasoft simülasyon programına tanıtılması.....	47
Şekil 29. Magmasoft simülasyon programına mevcut kalibrasyon değerlerinin girilmesi ve deney parçasının kalıp bozma sürelerinin programa tanıtılması.....	48
Şekil 30. (a) Ergitme işleminin gerçekleştirildiği indüksiyon ocağı, (b) İndüksiyon ocağı şematik görüntüsü, (c) İndüksiyon ocağı kesit görüntüsü.....	49
Şekil 31. (a) Tandish tip reaksiyon potası, (b) Tandish tip reaksiyon potasının kesit görüntüsü.....	52
Şekil 32. Küreselleştirme işlemi tamamlanan sıvı metalin döküm robotuna aktarılması ..	54
Şekil 33. (a) Akan metale verilen aşılama, (b) Kalıp içi aşılama	55
Şekil 34. Künkel Wagner marka kum mikserinin şematik görünümü	57
Şekil 35. Deney parçasına ait maçaların kalıp içindeki görüntüsü.....	58
Şekil 36. Deney parçasına ait model plaka yerleşimi.....	58
Şekil 37. Deney parçasına ait kalıplama görüntüleri.....	59
Şekil 38. Deney parçalarının tavlama ısı işlemine tabi tutulduğu fırının görüntüsü	60
Şekil 39. Deney parçalarına uygulanan ısı işlemin sıcaklık-zaman grafiği.	61
Şekil 40. Deney parçasının kesit görüntüleri ve test bölgelerinin şematik gösterimi.....	62
Şekil 41. Penetran sıvı testinde deney parçalarının kesildiği testere ve işlem aşamaları ...	63
Şekil 42. TS EN 1563:2018 çekme deneyi standartlarına uygun numune ölçüleri.....	64
Şekil 43. Deneylerin gerçekleştirildiği çekme test cihazı	65
Şekil 44. Deney parçalarından alınan sertlik ölçüm numunelerinin ve deney cihazının görünümü.....	66

Şekil 45. Dairesel hareket esasına dayanan aşınma deney cihazının şematik görünümü...	67
Şekil 46. Deney numune yüzeylerinde elde edilen dairesel-kayma aşınma izi.....	68
Şekil 47. Deney parçasına ait sıvı metal katılma oranlarının simülasyon sonuçları	71
Şekil 48. Deney parçasına ait sıcaklığa bağlı dolumu gösteren simülasyon sonuçları	72
Şekil 49. Deney parçasına ait Feedmod (Besleme etkinliği) simülasyon görüntüsü.....	73
Şekil 50. Deney parçasına ait Hotspot (Sıcak nokta) simülasyon görüntüsü	74
Şekil 51. Deney parçasına ait çekinti simülasyon görüntüsü	75
Şekil 52. Birinci ve ikinci grup deney parçalarının kalıp içi en yüksek sıcaklık-zaman grafiği.....	76
Şekil 53. Birinci ve ikinci grup deney parçalarının kalıp içi ortalama sıcaklık-zaman grafiği.....	77
Şekil 54. Ötektoid üstü bileşimdeki (Ağırlıkça % 4,3 C içeren) bir demir karbon alaşımının ötektoid sıcaklığının altındaki ve üstündeki mikroyapıların şematik gösterilişi.....	79
Şekil 55. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki sertlik değerleri.....	80
Şekil 56. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki yüzde uzama değerleri.....	81
Şekil 57. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki çekme mukavemeti değerleri.....	82
Şekil 58. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki akma mukavemeti değerleri.....	83
Şekil 59. Üç farklı gruba ait deney parçalarının 4 farklı bölgeden alınan numunelerinin ortalama perlit, ferrit ve sferolaşma yüzdelerinin şematik gösterimi.....	84
Şekil 60. Birinci grup deney parçalarına ait dört farklı bölgeden alınan numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	86
Şekil 61. İkinci grup deney parçalarına ait dört farklı bölgeden alınan numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	86
Şekil 62. Üçüncü grup deney parçalarına ait dört farklı bölgeden alınan numunelerin mikroyapı görüntüleri.....	87
Şekil 63. Deney parçasına ait belirtilen A-A kesiti ve penetran testi yüzey kontrollerinin görüntüsü.....	87

Şekil 64. Deney parçasına ait belirtilen 10 bölgeye ait kesitler ve penetran testi yüzey kontrollerinin görüntüsü.....	88
Şekil 65. Birinci grup deney parçalarının ait iki farklı bölgesinden alınan numunelerin gerilme-uzama diyagramları.....	90
Şekil 66. İkinci grup deney parçalarının iki farklı bölgesinden alınan numunelerin gerilme-uzama diyagramları.....	91
Şekil 67. Üçüncü grup deney parçalarının iki farklı bölgesinden alınan numunelerin gerilme-uzama diyagramları.....	91
Şekil 68. Üç farklı gruba ait deney parçalarının iki farklı bölgeden alınan numunelerinin ortalama sertlik değeri grafiği.....	93
Şekil 69. Üç farklı gruba ait deney parçalarından alınan numunelerin aşınma deneyi sonunda ölçülen ağırlık kaybı grafiği.....	95
Şekil 70. Üç farklı gruba ait deney parçalarından alınan numunelerin sürtünme katsayısı- mesafe ve sürtünme kuvveti-mesafe grafiği.....	96

TABLÖLAR DİZİNİ

Sayfa No

Tablo 1. Dökme demirlerin sınıflandırılması	5
Tablo 2. Bazı dökme demirlerin kimyasal bileşimi.....	5
Tablo 3. Dökme demir ve çelik malzemelerinin özellikleri (1: En iyi ve 5: En kötü)	6
Tablo 4. TS EN 1563:2018 (DIN 50125) standartına göre KGDD'lerin sınıflandırılması ve mekanik değer aralıkları.....	8
Tablo 5. Kullanılan çelik hurdanın kimyasal analizi.....	50
Tablo 6. Kullanılan pikin kimyasal analizi.....	50
Tablo 7. Deney parçasının ocak metali kimyasal analiz değerleri	51
Tablo 8. Deney parçasının son metal kimyasal analiz değeri.....	56
Tablo 9. Kalıp kumu mekanik özellikleri değer aralığı.....	57
Tablo 10. Dairesel-kayma aşınma deneyinin uygulama parametreleri	67
Tablo 11. Üç farklı gruba ait deney parçalarındaki 4 farklı bölgeden alınan numunelerin sferolaşma ve perlit oranı değerleri.....	84
Tablo 12. Magmasoft programındaki ve üç farklı gruba ait deney parçalarındaki 2 farklı bölgeden alınan numunelerin çekme-akma dayanımı ve % uzama değerleri.....	90
Tablo 13. Magmasoft programındaki ve üç farklı gruba ait deney parçalarındaki 2 farklı bölgeden alınan numunelerin üç farklı noktadaki BSD olarak sertlik değerleri.....	92

SEMBOLLER DİZİNİ

A	: Alan
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
As	: Arsenik
BCIRA	: British Cast Iron Research Association
BGDD	: Beyaz Grafitli Dökme Demir
B	: Bor
Ba	: Baryum
Bi	: Bizmut
BSD	: Brinell Sertlik Değeri
C	: Karbon
Ca	: Kalsiyum
CaS	: Kalsiyum Kükürt
CE	: Karbon Eşdeğeri
Ce	: Seryum
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
DIN	: Alman Standartlar Enstitüsü
EN	: Avrupa Normu
Fe ₃ C	: Demir Karbür, Sementit
FeSiMg	: Ferro Silis Magnezyum
FKGDD	: Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demir
GDD	: Gri Dökme Demirler
HWS	: Heinrich Wagner Sinto
KDF	: Kaba Döküm Ferrit
KDP	: Kaba Döküm Perlit
KGDD	: Küresel Grafitli Dökme Demir
KW	: Kunker Wagner
La	: Lantan
LGDD	: Lamel Grafitli Dökme Demir
M	: Modül

Mg	: Magnezyum
MgO	: Magnezyum Oksit
MgS	: Magnezyum Sülfür
Mn	: Mangan
Mo	: Molibden
Nd	: Neodimyum
Ni	: Nikel
O	: Oksijen
ÖKGDD	: Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demir
P	: Fosfor
Pb	: Kurşun
PKGDD	: Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demir
Pr	: Praseodim
S	: Kükürt
Sb	: Antimon
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
SiO ₂	: Silisyum Dioksit
Sn	: Kalay
Sr	: Stronsiyum
Stl	: 3D baskı dosyası formatı
Te	: Tellür
TGDD	: Temper Grafitli Dökme Demir
Ti	: Titanyum
V	: Hacim
V	: Vanadyum
W	: Tungsten
α	: Ferrit
cm	: Santimetre
⁰ C	: Santigrat Derece
dk	: Dakika
dm	: Desimetre
gr	: Gram

kg	: Kilogram
m	: Metre
mm	: Milimetre
Mpa	: Megapaskal
μ	: Mikron
sn	: Saniye
γ	: Östenit



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

İçinde bulunduğumuz modern çağa ait ürünler (otomobil, kamyon vb.) metal döküm sektörü olmadan var olamayacağı için; döküm sektörü inşaattan otomotive, havacılıktan madencilğe binlerce sektör için, 1 gramdan hafif veya 300 tondan ağır olabilecek geniş yelpazede parça üretmektedir. Ev ve iş aletlerinden vanalara; uzay araçlarından oyuncaklara; türbinlerden tanklara; mobilyalardan aydınlatma ekipmanlarına; her türlü hava, deniz ve kara ulaşım araçlarından ağır sanayi iş makinelerine kadar, hayatımızın içinde yer alan milyonlarca üründe döküm parçası görmek mümkündür [1].

Döküm sektörü üretiminin kalitesi, çeşitleri, boyutları ve kullanım alanları bakımından imalat sanayinin temel endüstrilerinden biri konumundadır. Üretim metodu olarak ön plana çıktığı gibi aynı zamanda ülkeler için de stratejik öneme sahip ulaşım, yerleşke ve savunma sanayilerine girdi sağlayan vazgeçilmez sektörlerden biridir. Belirtilen birçok sektörün döküm ihtiyacında dışa bağıllığı azaltmak amacıyla döküm sektörünün ilerlemesi, her alanda ülke gelişimine ve güvenliğine yönelik yatırımlarda stratejik öneme sahip olmuştur [2, 3].

İnşaat, enerji, ulaşım gibi alanlar başta olmak üzere çeşitli imalat sanayisine yaptığı katkı ile ülkemizin gelişmesinde ve kalkınmasında büyük pay sahibi olan Türk döküm sektörü, üretim değeri bakımından % 80'lik ihracat oranı ile ülkemizin cari açığının iyileşmesine büyük katkı sağlamaktadır. Türkiye Metal Döküm Sektörü 2020 yılında yaklaşık 2,2 milyon ton üretim ile değeri 5,2 milyar Euro olarak hesaplanan finans kayda geçmiştir. Bunun 3,7 milyar Euro değerindeki kısmı ihraç edilmektedir. Son beş yılda ülkemizde üretilen ürünlerin dünya döküm üretimi içindeki payı yaklaşık % 40 oranında artış göstermiştir. Üretim miktarı bakımından Türkiye, Avrupa'da ikinci büyük döküm üreticisi konumunda yer almaktadır [1].

Dökme demirler, işlenebilirlik, sertlik, mukavemet, korozyon ve aşınma direnci gibi iyi mekanik özellikler gösterdikleri gibi ekonomik ve kolay üretilebilir olmalarından dolayı çok yaygın olarak kullanılan mühendislik malzeme grupları arasında yer alır. Dökme demirin üretimindeki ilk gelişme; aşılama işleminde başarıya ulaşarak GDD'lerin üretilmesi olmuştur. Daha sonra seryum ve magnezyum ilavesi işlemlerinin uygulanması ile gri dökme demirlere nazaran mukavemeti iki kat daha iyi olan KGDD'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir.

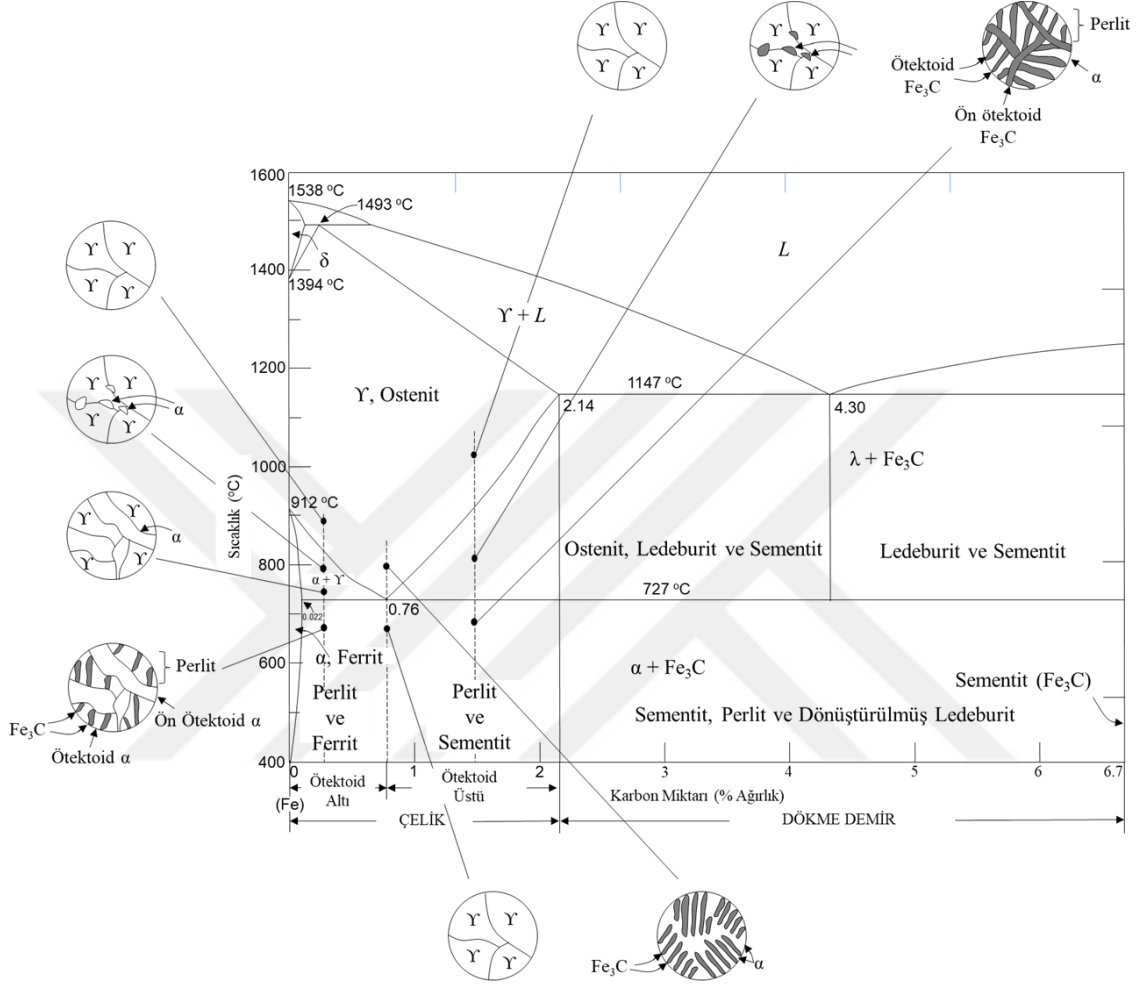
Bu gelişim özelliği grafitin küreselleştirilebilmesi ile mümkün olmuştur. Döküm sektöründeki teknolojik gelişimlere paralel olarak, KGDD mekanik özelliklerinin olduğundan daha fazla geliştirme yolları aranmıştır. Fakat yapılan çalışmalar ve elde edilen sonuçlar doğrultusunda grafitte küreselden başka bir morfoloji kazandırmanın mümkün olmadığı anlaşılmıştır. Bu durum araştırmacıları mekanik özellikleri, matrisin modifikasyonu yoluyla geliştirme çalışmalarına yönlendirmiştir [4].

Endüstriyel uygulamalarda imalat yöntemleri arasında önemli bir yer tutan döküm sektörü, ekonomiklik ve üretim hızı bakımından en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Ancak gerçekleştirilen literatür araştırmasında ve ilgili sektördeki endüstriyel firmalarla gerçekleştirilen görüşmelerde, döküm işleminde kullanılan kalıpların ve döküm yöntemi ile üretilen ürünlerin çeşitli iç ve dış etkenlerin de devreye girmesiyle üretim süresince mikroyapılarında ve mekanik özelliklerinde bozulmalarla karşılaşılabilir. Ayrıca kullanım alanları bakımından aşınmaya maruz kaldıkları gözlemlenmiş ve geliştirilmeye açık oldukları tespit edilmiştir. Şöyle ki, döküm yöntemi ile üretilen ürünlerin mikroyapılarındaki bozukluklar, mekanik ve tribolojik özelliklerindeki aksaklıklar, maruz kaldıkları deformasyon ve aşınma, elde edilen ürünün boyutsal ve yapısal özelliğini, ek işçilik maliyetlerini ve firmanın iç-dış piyasadaki ürün kalitesi istikrarını (firma saygınlığı) etkilemektedir. Gerçekleştirilmesi planlanan bu tez çalışmasında döküm yöntemi ile üretilen GGG 40 malzemeli bir aks yuvası parçasının, üretimi, mikroyapısal karakterizasyonu, mekanik özellikleri, kullanım alanlarına göre sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmesi ayrıca üretilen ürünlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

1.2. Dökme Demirler

Çeliklerde olduğu gibi demir alaşımının da geniş yelpazedeki bölümü dökme demirlerden oluşur. Kimyasal bileşim oranlarına bakıldığında dökme demirler % 2'den daha fazla karbon içerdiği görülmektedir. Bu nedenle demir-karbon alaşımı olarak nitelendirilirler. Karbon elementinin fazlalığı, dökme demirlerin sertleşmesine yani gevrekleşmesine neden olmaktadır. Bu sebeple ticari kullanımlarda dökme demirler için karbon oranının % 2-4 aralığında olması tercih edilmektedir. Ayrıca dökme demirler yüksek oranda silisyum içermektedirler. Dökme demirler ötektik bölgede demir karbür (Fe_3C) fazı içerirler ve bu faz karbon oranı bakımından oldukça zengindir. Bu durum dikkate alınırsa dökme demirlerin ötektik bölgede yarı kararlı olduğu görülmektedir. Fakat kararlı durumda

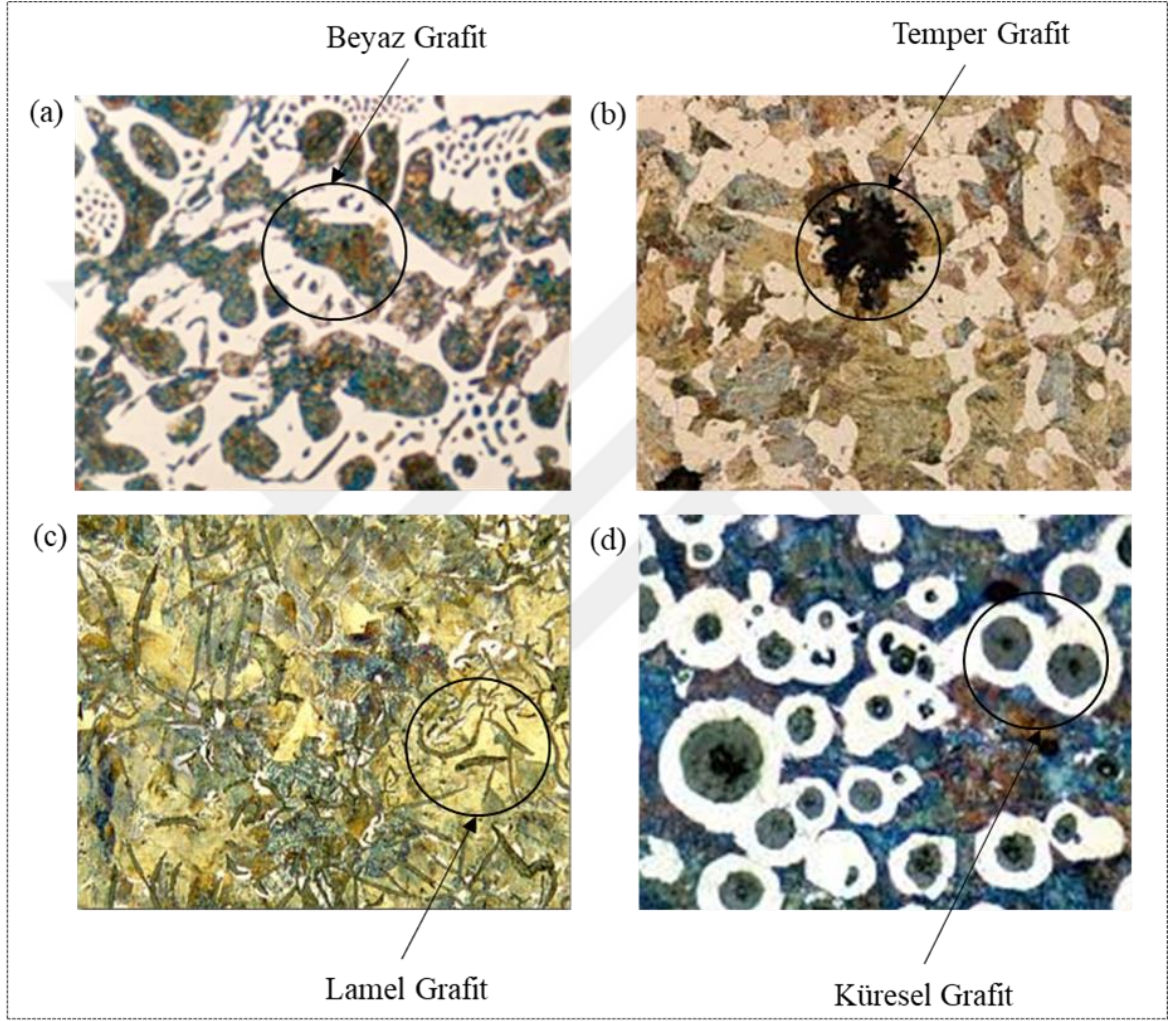
dökme demirler ötektik bölgede grafit fazı içerirler [5]. Şekil 1’de demir-karbon diyagramı görülmektedir.



Şekil 1. Demir-karbon denge diyagramı [2].

Dökme demirlerde ilk sınıflandırma kırılma yüzeylerine göre yapılmıştır. Dolayısıyla dökme demirler gri ve beyaz dökme demirler olarak iki gruba ayrılmıştır. Daha sonra metalografide meydana gelen gelişmeler ile birlikte elde edilen bilgi birikim sayesinde sınıflandırmalar, malzemenin mikroyapı durumuna göre ayrılmaya başlamıştır [7]. Döküm mikroyapısına göre yapılan sınıflandırma, dökme demirlerde kullanılan en başarılı sınıflandırma yöntemidir. Dökme demir üretiminde mikroyapıya etki eden dört temel faktör bulunmaktadır. Bunlar; karbon oranı, alaşımda yer alan elementler veya kirlilik (emprüte) miktarları, katılaşma anında veya katılaşma sonrası soğuma hızı ve dökümden sonraki uygulanan ısı işlemlerdir. Bu faktörler karbonun türüne ve morfolojisine de etki ederler.

Karbon grafitle serbest veya sementitle bileşik halde bulunabilir. Bu açıdan incelendiğinde dökme demirler 5 farklı sınıfa ayrılabilirler. Bu sınıflandırma günümüz endüstrisinde gri, beyaz, temper, küresel grafitli ve alaşımlı dökme demirler olarak isimlendirilir. Şekil 2’de dökme demirlere ait mikroyapı görüntüleri verilmektedir [6, 8].



Şekil 2. Grafit yapısına göre; (a) BGDD, (b) TGDD, (c) LGDD ve (d) KGDD [9].

BDD’de, karbon sıvı demir içinde tamamen çözünmektedir. Dökme demir katılaşırken sıvı içinde çözünen bu karbon sıvı demirin içinden ayrışamaz da, tamamen yapıda çözünmüş olarak kalırsa, ortaya çıkan yapıya beyaz dökme demir adını verilir.

GDD, sıvı dökme demir katılaşırken, sıvı metalde çözünmüş durumda bulunan karbon, katılaşma sırasında ayrı bir faz olarak ortaya çıkabilmektedir. Bu tür bir yapı mikroskop altında incelendiğinde, karbonun grafit formunda, gözle görülebilen ayrı bir yapı olarak

ayrışmış olduğu görülmektedir. Karbonun katmanlar halinde, yani lamel formda ortaya çıktığı bu yapı kırıldığı zaman ortaya mat ve gri bir renk çıktığı için, bu tür dökme demirler gri dökme demir olarak adlandırılır.

TDD türünde, karbon tamamıyla yapıda çözünmüş halde kalacak şekilde dökme demirin katılaşması sağlanır. Daha sonra katılaşmış BDD ısıtılma tabi tutularak, yapıda çözünmüş halde bulunan karbonun yapıdan ayrışması sağlanır. Bu ısıtılma sonrasında, karbonun bozuk şekle sahip küreler halinde, kümelenmiş olarak ortaya çıktığı görülür, bu tür dökme demirler temper dökme demir olarak adlandırılır.

Tablo 1’de ise dökme demirlerin malzeme özelliklerine ait bilgiler verilmektedir.

Tablo 1. Dökme demirlerin sınıflandırılması [6].

<i>Dökme Demir (Ticari Adı)</i>	<i>Karbonca Zengin Faz</i>	<i>Matris</i>	<i>Kırılma Görünümü</i>	<i>Nihai İşlem</i>
Gri	Lamel Grafit	Perlit	Gri	Katılaşma
Sünek	Küresel Grafit	Ferrit, Perlit, Östenit	Gümtüş-Gri	Katılaşma veya Isıl İşlem
Yumru Grafitli	Yumru (Vermiküler) Grafit	Ferrit, Perlit	Gri	Katılaşma
Beyaz	Sementit	Perlit, Martenzit	Beyaz	Katılaşma veya Isıl İşlem
Benekli	Lamel Grafit + Sementit	Perlit	Benekli	Katılaşma
Temper	Temperlenmiş Grafit	Ferrit, Perlit	Gümtüş-Gri	Isıl İşlem
Östemperlenmiş	Küresel Grafit	Beynit	Gümtüş-Gri	Isıl İşlem

Tablo 2’de dört farklı dökme demir sınıfına ait kimyasal içerik bilgileri verilmektedir.

Tablo 2. Bazı dökme demirlerin kimyasal bileşimi [7, 3].

<i>Dökme Demir</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>P</i>	<i>S</i>
Küresel Grafitli D.D.	2.5-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.05-0.1	0.008-0.03
Lamel Grafitli D.D.	2.5-4.0	1.0-3.0	0.25-1.0	0.05-1.0	0.02-0.25
Beyaz D.D.	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2
Temper D.D.	2.2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.06-0.2

GDD'ler birçok farklı alanda kullanılmakta olan yüksek oranda karbon içeren ve karbon-silisyum alaşımından meydana gelen en eski dökme demir sınıfıdır. TGDD'ler GDD ile benzer kompozisyona sahiptir, fakat ısıtma işlem uygulamaları ile süneklik özelliği verilebilmesi bakımından farklılık göstermektedir. BGDD'lerin ham döküm yapısı serttir. TGDD'lerin sünekliği, KGDD'ler ile yakın değerler sergilemektedir. Genel olarak GDD ya da BGDD'lere alaşım ilavesi verilerek daha iyi korozyon dayanımı ve sertlik değerleri elde edilmektedir [6]. GDD'ler döküm sektörünün başlangıcı olarak kabul edilir. Sonrasında KGDD'ler üretilmiş ve bu dökme demir sınıfının mekanik özellikleri bakımından çeliğe en yakın olduğu belirlenmiştir. KGDD malzemelerinde serbest karbon yapı içerisinde küresel şekilde bulunur. KGDD'ler döküm öncesi sıvı metale az oranda magnezyum ve seryum elementi ilavesi ile sementit oluşumunun önlenmesi sonucunda oluşmaktadır. KGDD'nin kimyasal içeriği GDD'lerle benzerlik göstermektedir, fakat KGDD'lerde az oranda fosfor ve kükürt bulunmaktadır. TGDD'ler ile karşılaştırıldığında ise KGDD'nin akma dayanımları daha iyidir [7]. Ek olarak KGDD'ler; iyi akışkanlık özelliği, yüksek işlenebilirlik kabiliyeti, düşük üretim maliyeti, yüksek aşınma ve korozyon dayanımına sahiptir, ayrıca büyük-küçük-karmaşık şekillerdeki parçaların üretimine olanak vermektedir. Sahip oldukları özellikler bakımından otomotiv sektörü başta olmak üzere; yapısal uygulamalar ile endüstriyel alanlarda tercih sebebi olmakta ve kullanılmaktadır.

Tablo 3'te bazı dökme demir ve çelik malzeme sınıflarına ait mekanik özellikler hakkında bilgi verilmiştir.

Tablo 3. Dökme demir ve çelik malzemelerinin özellikleri (1: En iyi ve 5: En kötü) [3].

Özellik	Küresel Grafitli D. D.	Lamel Grafitli D. D.	Temper D. D.	Beyaz D. D.	%0,3 Karbonlu Çelik D.
Dökülebilirlik	1	1	2	3	5
İşlenebilirlik	2	1	2	-	3
Titreşim Sönümleme	2	1	2	5	4
Yüzey Sertleştirilebilirlik	1	1	1	-	3
Elastik Modülü	1	3	2	-	1
Darbe Dayanımı	2	5	3	-	1
Korozyon Dayanımı	1	1	2	5	4
Dayanım / Ağırlık Oranı	1	5	4	-	3
Aşınma Dayanımı	2	3	4	1	5
Üretim Maliyeti	2	1	3	2	4

1.3. Küresel Grafitli Dökme Demirler

1.3.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Genel ve Mekanik Özellikleri

Günümüzde önemli bir dökme demir çeşidi olan sfero dökme demirler; başta otomotiv ve makina sektörü olmak üzere pek çok endüstriyel alanda mühendislik malzemesi olarak başarı bir şekilde kullanılmaktadır. Üretim yönteminin diğer dökme demir malzeme sınıfları ve çeliğin üretildiği ünitelerde gerçekleştirilebilmesi, üstün mekanik özelliklere sahip olması, hem döküm halinde hem de ısıtılma işlem uygulamaları sonrası kullanıma elverişli olması sfero dökme demirlerin endüstride yaygın olarak kullanılma nedenleri arasındadır.

KGDD'ler, dökme demir türlerinin tamamının üretim özelliklerine ve neredeyse çeliğin mekanik özelliklerine eşdeğer bir malzeme grubu olarak tanımlanır. Diğer dökme demir türlerine göre KGDD'ler süneklik, yüksek dayanım, tokluk gibi özelliklere sahiptir. Çeliğe göre ise daha iyi işlenebilme ve kolayca dövülebilme özelliğine sahiptir. Diğer demir dökümler incelendiğinde kendi aralarında çok iyi bireysel özellikler sergilemelerine rağmen, KGDD'ler düşük maliyet ve mikroyapı ile elde edilebilecek birçok özelliğe sahiptir. Üretimdeki bu maliyet avantajı; sfero dökme demirlerin kullanım alanını, hem diğer dökme demirlere hem de çeliğe göre gün geçtikçe genişletmektedir ve onu ürün geliştirme mühendislerinin malzeme seçiminde ilk akla gelen malzemelerden biri yapmaktadır [7, 10, 11].

Sfero dökme demir mekanik özelliklerinin uygunluğu, alaşıma ilave edilen elementler ile oranları bakımından; grafit kümeleşmesi ve dağılımı, sementit oluşumu ve mikroyapı türünü etkilediği için, büyük önem arz etmektedir. Ayrıca bu mekanik özellikler, alaşım elementlerinden farklı olarak ısıtılma işlem uygulamaları ve soğuma süreleri ile de doğrudan ilişkilidir [7]. KGDD'ler çoğunlukla ısıtılma işleme gerek kalmadan kullanılır ve yapılarında çoğunlukla ferrit ve perlit birlikte yer alır. Isıtılma işlem ile mukavemet, süneklik ve dayanımın artması mümkün olduğu gibi işlenebilirlik kabiliyetleri de yükseltilebilir [6].

Sfero dökme demirlerin korozyon ortamlarında aşınma dirençleri GDD'lere göre daha iyidir. Ayrıca ani sıcaklık değişimlerine gösterdikleri direnç GDD ve çoğu çeliğe göre çok daha iyidir. Malzeme içyapısı tamamen ferritik olan KGDD'lerin tokluk değeri çok yüksektir, diğer taraftan perlit hacim oranı arttıkça tokluk değerlerinde azalma görülmektedir [6, 12]. Tablo 4'te TS EN 1563:2018 (DIN 50125) standartına göre KGDD'lerin sınıflandırılması ve mekanik özellikleri gösterilmektedir.

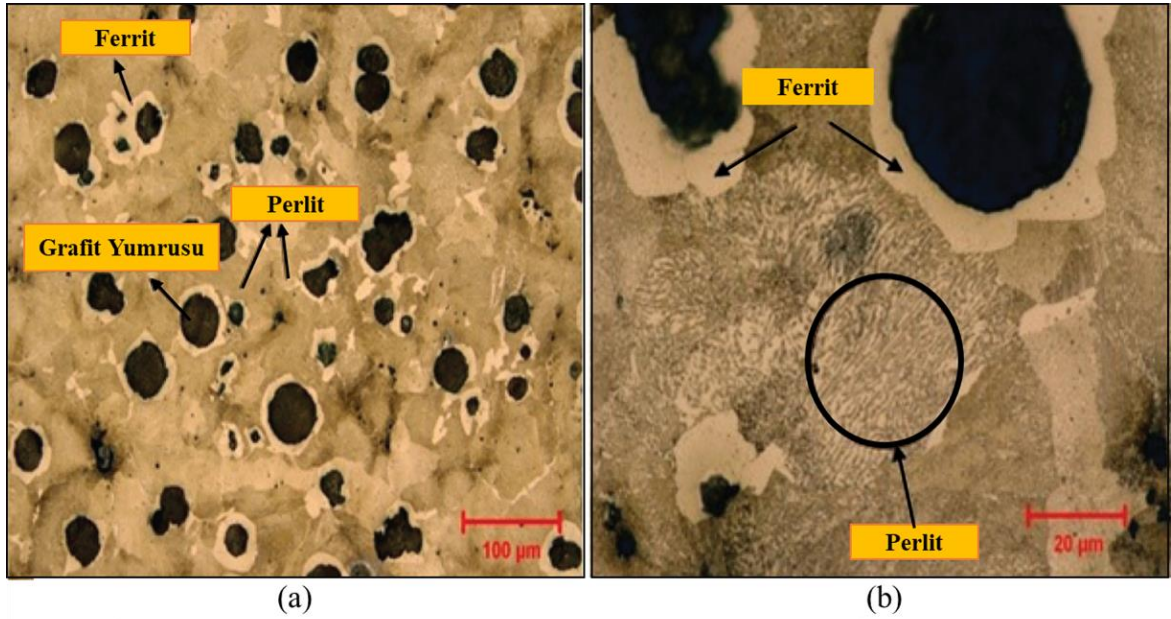
Tablo 4. TS EN 1563:2018 (DIN 50125) standartına göre KGDD'lerin sınıflandırılması ve mekanik değer aralıkları [6].

Dökme Demir Sınıfı		İlgili duvar kalınlığı, t (mm)	Akma Dayanımı (Mpa) (min.)	Çekme Dayanımı (Mpa) (min.)	Yüzde Uzama (%) (min.)
Sembol	No				
EN-GJS-350-22-LT ^a	5.3100	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 30$	210	330	18
		$60 < t \leq 200$	200	320	15
EN-GJS-350-22-RT ^b	5.3101	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 30$	220	330	18
		$60 < t \leq 200$	210	320	15
EN-GJS-350-22	5.3102	$t \leq 30$	220	350	22
		$30 < t \leq 30$	220	330	18
		$60 < t \leq 200$	210	320	15
EN-GJS-400-18-LT ^a	5.3103	$t \leq 30$	240	400	18
		$30 < t \leq 30$	230	380	15
		$60 < t \leq 200$	220	360	12
EN-GJS-400-18-RT ^b	5.3104	$t \leq 30$	250	400	18
		$30 < t \leq 30$	250	390	15
		$60 < t \leq 200$	240	370	12
EN-GJS-400-18	5.3105	$t \leq 30$	250	400	18
		$30 < t \leq 30$	250	390	15
		$60 < t \leq 200$	240	370	12
EN-GJS-400-15	5.3106	$t \leq 30$	250	400	15
		$30 < t \leq 30$	250	390	14
		$60 < t \leq 200$	240	370	11
EN-GJS-450-10	5.3107	$t \leq 30$	310	450	10
		$30 < t \leq 30$	Üretici ve alıcı arasında kararlaştırılır.		
		$60 < t \leq 200$			
EN-GJS-500-7	5.3200	$t \leq 30$	320	500	7
		$30 < t \leq 30$	300	450	7
		$60 < t \leq 200$	290	420	5
EN-GJS-600-3	5.3201	$t \leq 30$	370	600	3
		$30 < t \leq 30$	360	600	2
		$60 < t \leq 200$	340	550	1
EN-GJS-700-2	5.3300	$t \leq 30$	420	700	2
		$30 < t \leq 30$	400	700	2
		$60 < t \leq 200$	380	650	1
EN-GJS-800-2	5.3301	$t \leq 30$	480	800	2
		$30 < t \leq 30$	Üretici ve alıcı arasında kararlaştırılır.		
		$60 < t \leq 200$			
EN-GJS-900-2	5.3302	$t \leq 30$	600	900	2
		$30 < t \leq 30$	Üretici ve alıcı arasında kararlaştırılır.		
		$60 < t \leq 200$			

1.3.2. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretim Çeşitleri ve Mikroyapıları

Yapısında bulunan grafitlerin küresel formda olmasından dolayı KGDD olarak adlandırılırlar [13]. KGDD’lerde grafit, lameler formdan küresel forma dönüştürülür. Bu aşılama işlemi ile gerçekleşir. Karbon elementinin küre formuna dönüşmesini sağlayabilmek için dökme demire ergimiş halde magnezyum ve seryum gibi elementler ilave edilir [8, 14]. KGDD’lerde, mikroyapı oluşumunda grafitlerin dağılımı ve küre boyutu katılaşma sürecinde oluşmaktadır. Belirtilen bu metalurjik özellikler ısıtım işlemi ile değiştirilememektedir. Kürelerin dağılımı ve boyutu dökme demirin mekanik özelliklerinde önemli ölçüde farklılıklara yol açmaktadır. Grafitlerin küreselleşmesi üretim anında doğru ve yeterli aşılama ile gerçekleştirilmektedir. Yapıdaki küresel oluşum süneklik ve mukavemeti doğrudan etkilemektedir [6, 15]. Dökme demire süneklik ve mukavemet kazandıran grafit şeklinin lamel değil küre oluşudur. Bu özellikler pek çok uygulamada ısıtım işleme ihtiyaç duymadan KGDD’yi diğer dökme demir türlerine göre daha avantajlı hale getirmektedir [8, 14].

Şekil 3’te de görüldüğü gibi KGDD’ler ferrit, perlit veya her ikisi içerisinde dağılmış matris yapısından oluşmaktadır [6]. Bu matris literatürde “dana gözü” olarak nitelendirilir. Şekil 3’te KGDD’nin bu mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir.



Şekil 3. KGDD’nin mikroyapı fotoğrafları; (a) Perlit + ferrit, (b) Tamamen ferrit [16, 18]

Malzeme içyapısında oluşan ferrit ve perlit oranları alaşım elementlerin içeriğine, grafit miktarına ve soğuma hızına göre değişkenlik gösterebilir. Bunların dışında döküm şartlarındaki birçok değişken göz önüne alındığında kullanılan şarj malzemelerinin saflığına ve döküm kalıplarının soğuma hızına göre döküm parçalarının içinde çoğu zaman segregasyonlar mevcuttur. Bu etkiyi optimum düzeyde tutmak için şarj girdileri kontrol sıklığı çok iyi belirlenmelidir. Bu sayede üretilecek ürünün ve kalitesinin istenilen mekanik özelliklere sahip olması sağlanır. Ayrıca arzu edilmeyen bileşiklerin en düşük düzeyde kalmasına yardımcı olur [16, 17, 18].

Yapı içerisinde bulunan ferrit iyi bir darbe direnci ve sünekliğin yanında düşük karbonlu çeliklere yakın akma ve çekme mukavemeti sağlamaktadır. Katılaşmanın çok yavaş olması ile ferritik bir yapı elde edilmektedir.

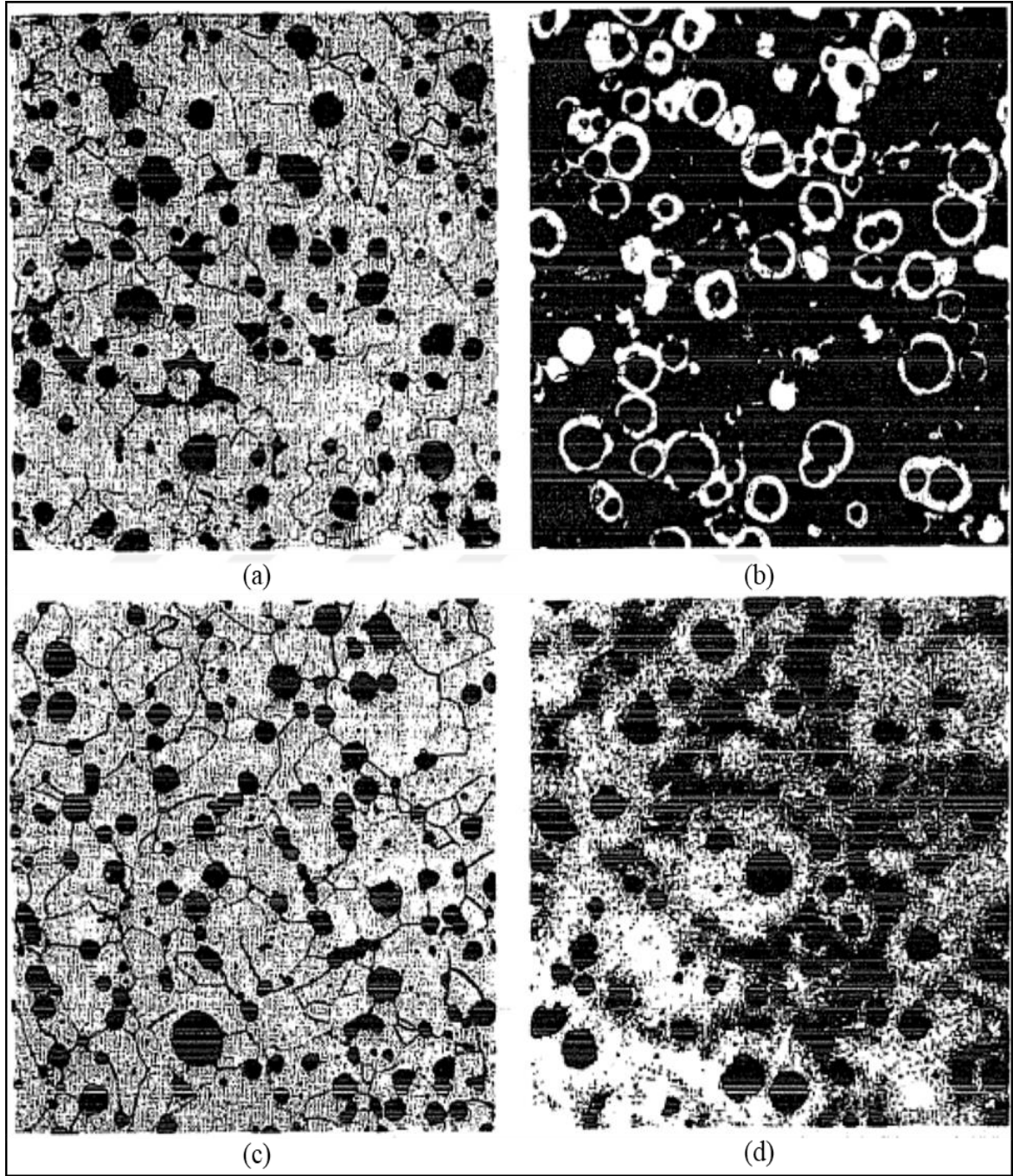
Perlitik ve ferritik yapının birlikte bulunduğu KGDD'lerin işlenebilirlikleri yüksektir olduğu gibi üretim maliyeti de düşüktür. KGDD'lerde yapı içerisindeki perlit fazı içinde bulunan sementit yapısının sertliğe pozitif yöndeki etkisinden dolayı; aşınma direnci ve mukavemete yüksek, sünekliğe ise ortalama bir değer kazandırmaktadır.

Sfero dökme demirlerde kesit değişkenliği metalürjik özelliklere direkt etki etmez. Kesit kalınlıklarındaki farklılık soğuma hızına bağlı olarak yapıdaki faz türünü ve tane boyutunu belirler. Perlitik yani küçük taneli bir mikroyapı düşük süneklik göstermesine rağmen mukavemeti yüksektir [6].

KGDD'lerde hem döküm işleminde, hem de döküm sonrasında uygulanan ısı işlemler ile değişken içyapılar elde etmek mümkündür. KGDD'lerin sınıflandırılmasında bu içyapılardan yararlanılmaktadır. KGDD yüksek sıcaklıklarda östenitik, 735 °C'nin altındaki sıcaklıklarda ise daha farklı yapıya sahiptir. Ferrit içinde karbonun çözünürlüğü çok azdır fakat östenit içinde çözünebilir karbon miktarı % 1 civarındadır. Östenitten ayrılan % 1 oranında karbon östenitin ferrite dönüşümü ile gerçekleşir. Ferritik yapı içinde dağılan küresel grafitler, ancak östenit içinde çözünen karbonun tamamı küresel grafit dönüşmeye zaman bulduğu takdirde oluşur. Fakat çoğunlukla östenitten ayrılan karbon, grafitlerin bulunduğu bölgelere kadar hareket edemez ve bu bölgelerde difüze olamaz dolayısıyla orada katılaşmaya zaman bulamaz. Bu durumda ayrılan karbon grafitler ince karbür tabakaları şeklinde oluşur ve küre formundaki grafitler katılaşır. Ferrit yapının devamlılığını bu karbürli tabakalar bozar. Dolayısıyla ferrit ve karbür tabakaları sürekli olarak birbirine bitişik şekilde oluşum gösterir; bu yapıya da perlit adı verilir. Bu tanımlamanın sonunda

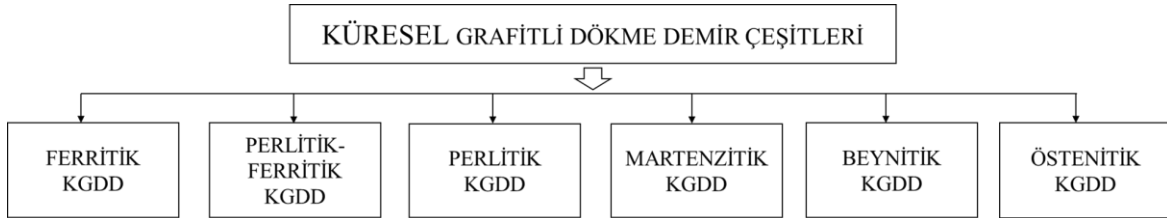
KGDD'lerin yapısında, yapı bileşenlerinden bir ya da bir kaçının görülmesi mümkündür. Kullanım alanları ve kimyasal bileşimler bu yapıların oluşumunda etkin rol oynar.

Şekil 4'te KGDD'lerin döküm ve ısıtılma işlemi uygulanmış haldeki mikroyapı görüntüleri verilmektedir.



Şekil 4. KGDD mikroyapısı; (a) KDF, (b) KDP, (c) FKGDD, (d) PKGDD [13].

KGDD'ler üretim çeşitleri yönünden Şekil 5'de de görüldüğü üzere 6 gruba ayrılır. Bunlar; ferritik KGDD, perlitik-ferritik KGDD, perlitik KGDD, martenzitik KGDD, beynitik KGDD ve östenitik KGDD'dir [19].



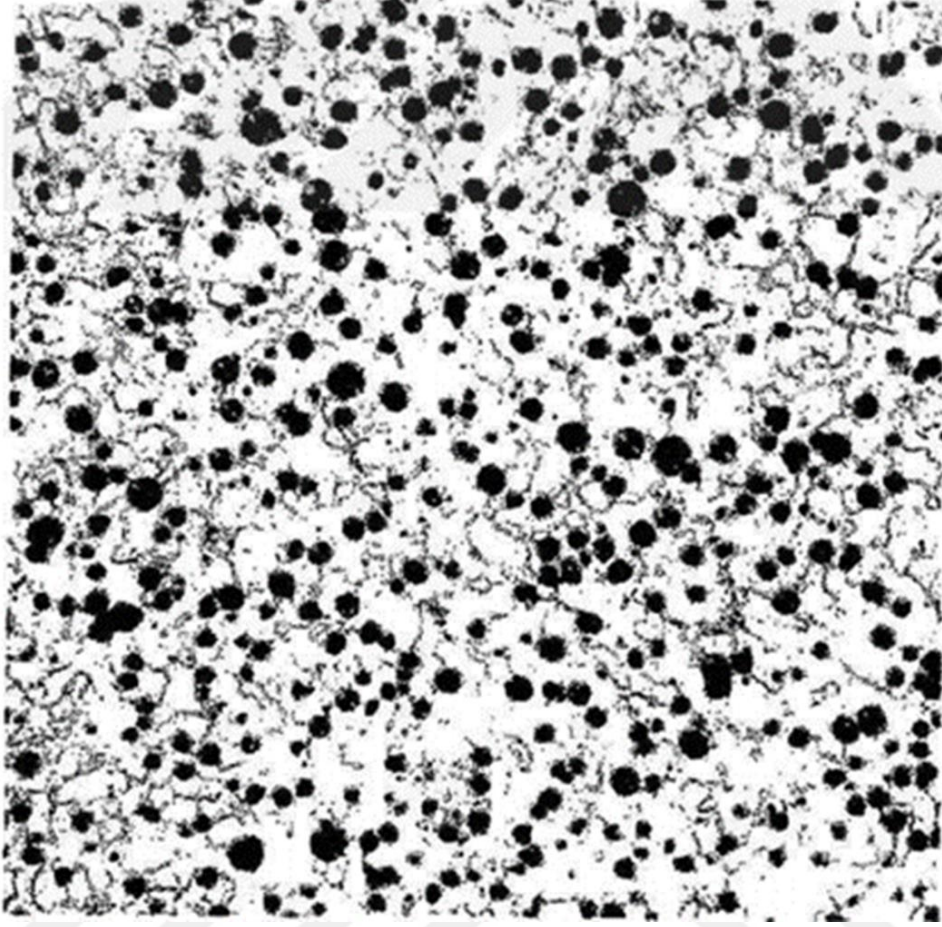
Şekil 5. KGDD üretim çeşitleri

1.3.2.1. Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirler

Ferritik bir matris ve bu matris içerisinde rasgele dağılmış küresel grafitlerin oluşması istenen mikroyapı için östenit içerisinde çözülen karbonun tamamı küresel grafitte dönüşmeye zaman bulması gerekmektedir. Ferritik bir matris ve bu matris içerisinde rasgele dağılmış küresel grafitler bu dökme demirlere yüksek oranda süneklik ve darbe direnci ile birlikte aynı zamanda düşük karbonlu çeliklere yakın bir akma ve çekme mukavemeti sağlar. Ayrıca iyi bir termal iletkenlik, yüksek darbe direnci ve manyetik geçirgenlik, düşük gecikme kayıpları, işlenebilirlikte kolaylık ve bazı ortamlar için yüksek korozyon direnci de belirgin özellikleri arasında yer alır.

Sıvı metale uygun miktarda magnezyum alaşımı katmak, dökümü gerçekleştirilen KGDD'nin katılaşmasını uygun bir şekilde gerçekleştirmek, PKGDD'e ısıtma işlemi uygulamak, ferritik yapılu dökme demir üretimi için başlıca kullanılan yöntemler arasında yer almaktadır.

Şekil 6'da FKGDD'lerin mikroyapısı görülmektedir. FKGDD'ler, büyük iş makina parçaları, araç poyraları, inşaat iskele parçaları, fren merkezleri, makina pistonları, potalar, ocak ve fırın kapakları, vb. yerler kullanıldığı alanlardır [8, 13, 19, 20].



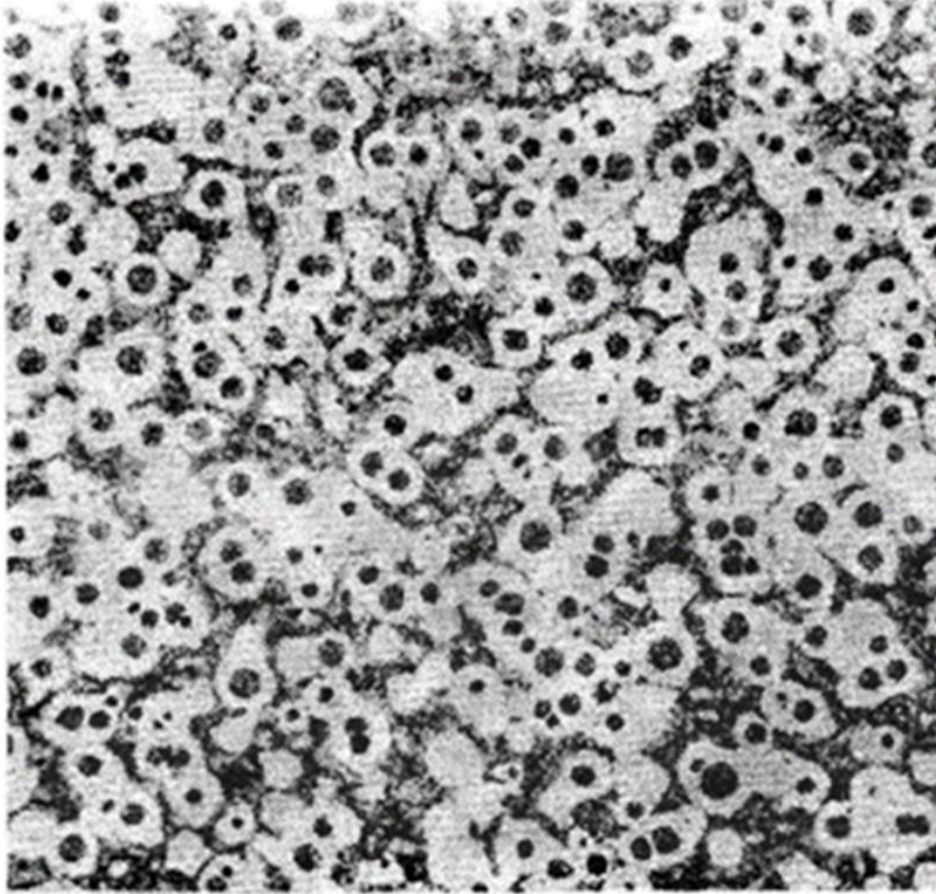
Şekil 6. FKGDD mikroyapı görüntüsü [8].

1.3.2.2. Perlitik - Ferritik Küresel Grafitli Dökme Demirler

Perlitik-Ferritik KGDD küresel grafitli malzemelerin en yaygın kullanılan çeşididir. Doğrudan döküm yoluyla elde edilir ve kullanılırlar. Matris yapısı içine dağılan grafit kürecikleri hem ferrit hem de perlit olarak bulunur. KGDD'ler arasında en ekonomik tür olup belirgin özellikleri arasında iyi işlenebilirlik gelse de diğer özellikleri tam perlitik ve tam ferritik KGDD'ler ile benzerlik göstermektedir [19].

Perlitik ve ferritik yapının oranları aynı oranda olabilmesi muhtemel olup mikroyapısı Şekil 7'de gösterilmektedir. Bu içyapıya sahip KGDD'lerin çekme dayanımı ve aşınma direnci özellikleri ferritik yapılara göre daha iyi davranışlar sergilemektedir. KGDD'lerin çoğu bu gruba girer. Bu gruptaki malzemeler, büyük miktarlarda alaşım içermez ve dökme demir durumunda kullanılırlar. KGDD yüksek mukavemet ve aşınmaya dayanıklılığın perlitik istendiği yerlerde tercih edilir. Maksimal dayanıklılığın istenildiği ve mukavemetin çokça önem kazanmadığı işlerde de ferritik KGDD'ler kullanılır.

Tarım makine ve traktör parçaları, tekerlekler, dişli kutuları, kompresör pistonları, pompa gövdeleri, valfler, kâğıt sanayiinde kullanılan haddeler, hidrolik kontrol aletleri, uçak motor parçaları, vb. ürünler bu sınıfa ait KGDD'lerin kullanıldıkları alanlardan bazılarıdır [8].



Şekil 7. Perlitik-Ferritik KGDD'lerin mikroyapı görüntüsü [8].

1.3.2.3. Perlitik Küresel Grafitli Dökme Demirler

Östenitten ayrılan karbon, matris içerisinde grafitlerin bulunduğu bölgelere kadar ilerleyemediği ve orada katılaşmaya zaman bulamadığı durumlarda, grafitler karbürlü levhalar şeklinde oluşurlar ve ferrit matrisin devamlılığını bozarlar. PKGDD'lerin mikroyapısı Şekil 8'de gösterilmektedir [8]. Perlit matrisli yapı içerisinde bulunan grafit kürecikleri bu sınıfa, yüksek mukavemet, aşınma ve darbe direnci ve uygun bir değerde süneklik kazandırır. Bu sınıfa ait dökme demirler makina parçaları, pitonlar, miller,

kavramalar, kazıcı uçlar, kalıplar vb. parçalarda oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır [8, 17, 20].

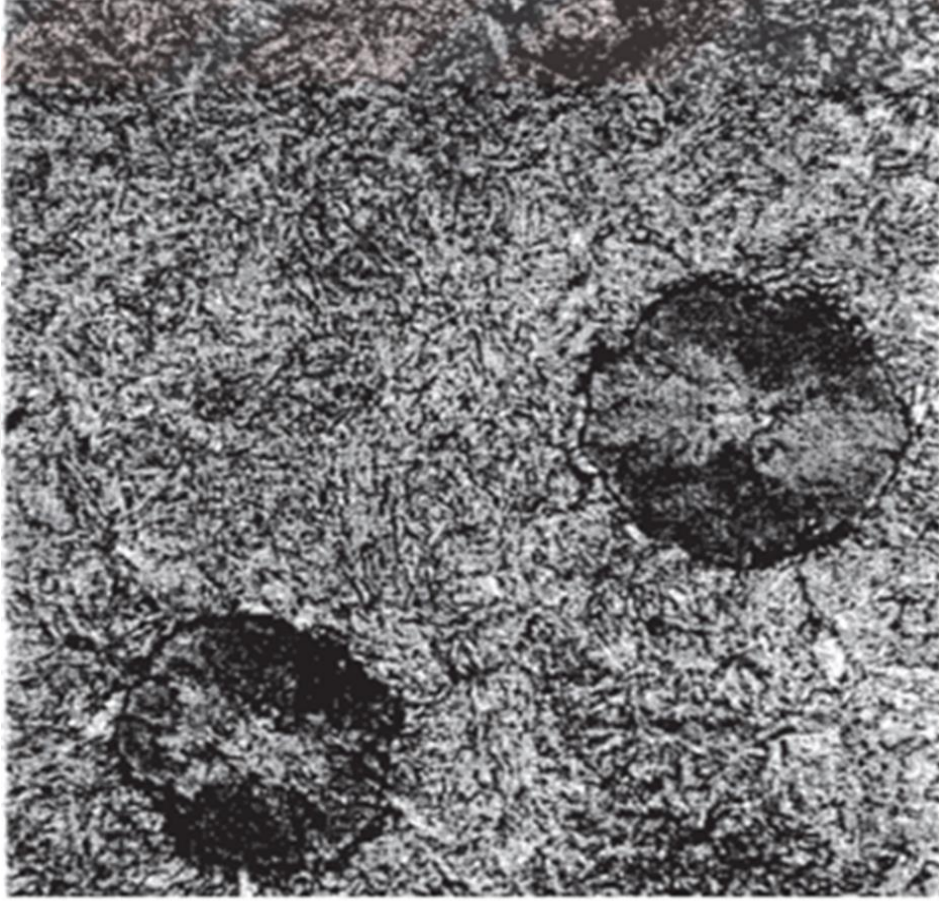


Şekil 8. PKGDD mikroyapı görüntüsü [8].

1.3.2.4. Sertleştirilmiş ve Temperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

Alaşımsız halde yağda su verilmiş, özel alaşımlanmış ya da temperlenmiş KGDD'ler ile östemper veya martemper işlemlerine tabii tutulan KGDD'ler, pek çok üstün özellik göstermekle birlikte maliyetleri oldukça yüksektir. Bu gruba ait ana dokuları beynitik ya da temperlenmiş martenzit oluşturur. Nadiren kullanılan martenzitik KGDD; döküm halinde iken sert ve kırılgan bir yapı sergiler. Yeterince alaşım elementi ilavesi yapıldığı takdirde bu tür perlit oluşumu önlenabilir ya da su verme ile temperleme ısı işlemi uygulanabilir. Bu işlemlerin uygunlanması sonucunda oluşan temperlenmiş martenzit yapı yüksek aşınma

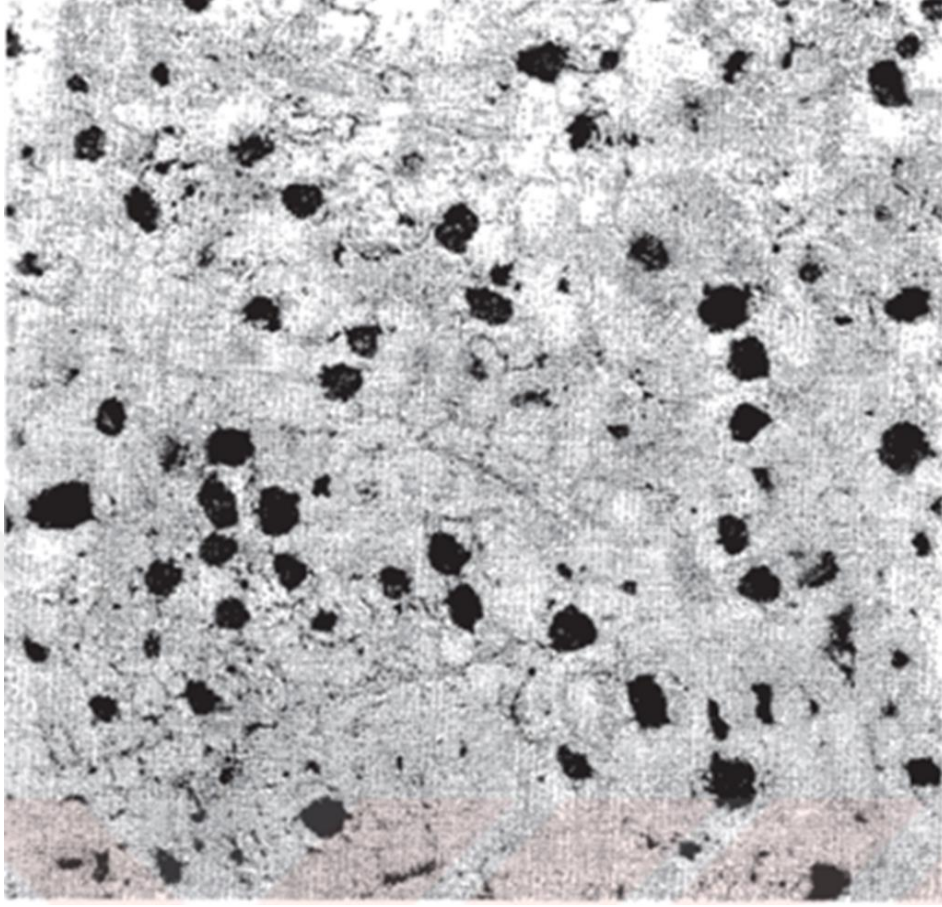
direnci ve iyi mukavemet özelliğinin yanında düşük tokluk ve süneklik sağlar [19]. Sertleştirilmiş ve temperlenmiş KGDD'lerin mikroyapısı Şekil 9'da gösterilmektedir [8, 20].



Şekil 9. Temperlenmiş martenzitik KGDD mikroyapı görüntüsü [8].

1.3.2.5. Östenitik Küresel Grafitli Dökme Demirler

KGDD türleri incelendiğinde çekme dayanımı en düşük olan tür bu sınıfa aittir. Genellikle yüksek miktarda nikel içerir. Bu tür KGDD'ler östenitik matris elde etmek için alaşımlandırılır. Bu tür yapılar döküm parçalarına yüksek oksidasyon ve korozyon direnci, iyi mukavemet, üstün manyetik özellik ve yüksek sıcaklıklarda boyutsal değişimde kararlılık sağlar. Matris yapıları incelendiğinde az miktarda perlitten ve östenitten oluştuğu görülür. Bu yapılarda grafitler küresel şekillerini bir ölçüde kaybederler. ÖKGDD'lerin mikroyapısı Şekil 10'da gösterilmektedir [19].



Şekil 10. ÖKGDD mikroyapı görüntüsü [8].

1.3.3. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Yapısal Elementleri

KGDD'lerin bileşimindeki temel elementler karbon ve silisyumdur [19, 21]. Karbon ve silisyumun yanında KGDD'ler periyodik tablodaki 50'ye yakın elementi bileşimlerinde bulundurmaları muhtemeldir. Bu elementlerin çoğu zararlı etkilerinden dolayı (Ar, As, Bi, P, Pb, S, Sb) dökme demir içerisinde bulunması istenmez [13].

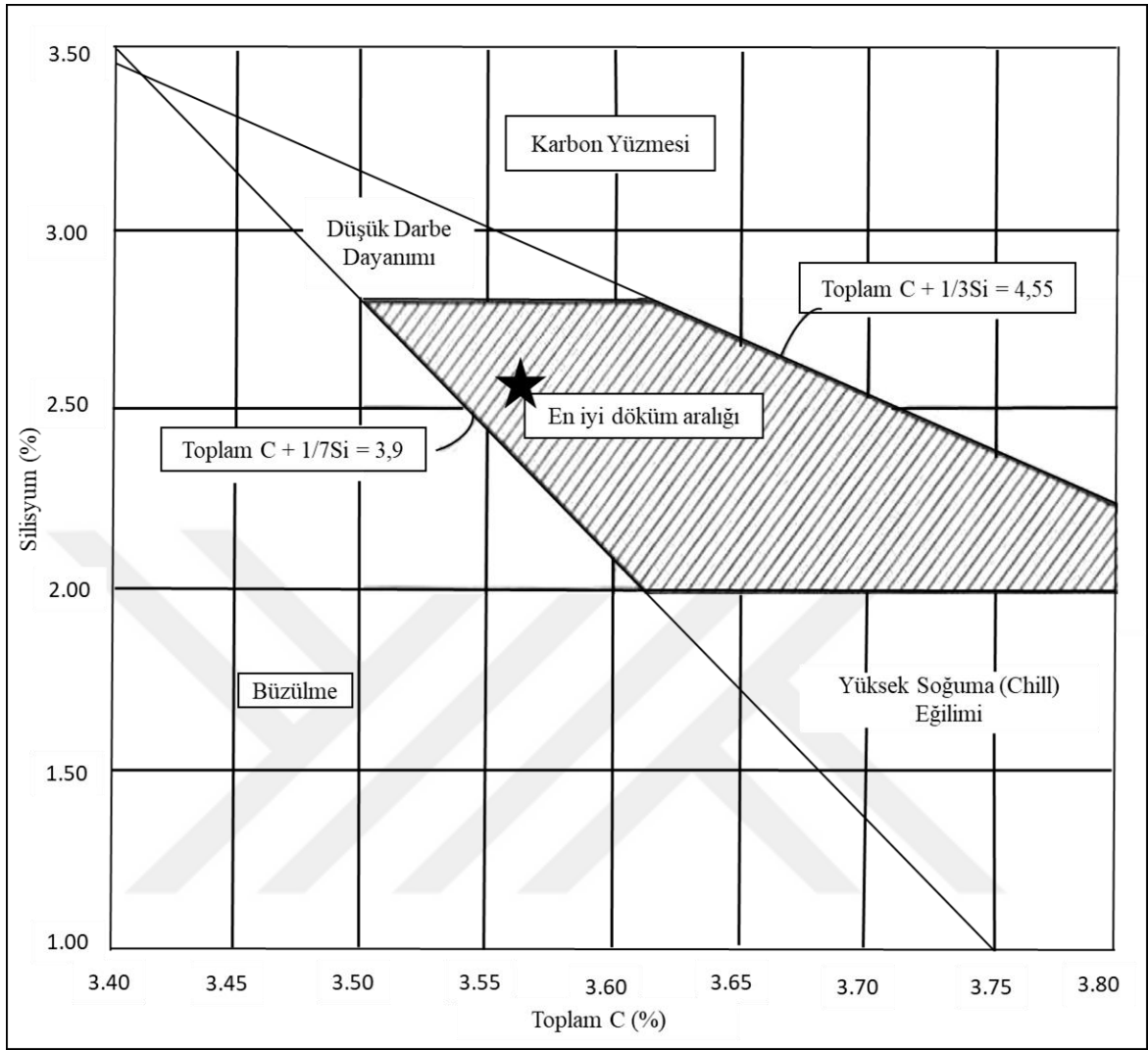
Mekanik özelliklerdeki iyileştirmeler için KGDD'ler farklı alaşım elementleriyle alaşımlandırılır. Bu elementlerinin en önemlileri: Cu, Cr, Ni, Mn, Mo, V vb. elementlerden oluşur. Bu alaşım elementlerinin bazıları tek başına, bazıları ise değişik kombinasyonlarda harmanlanarak dökme demire ilave edilirler [7].

Grafitlerin oluşumu pik, geri dönüşüm hurdaları ve karbon içeren malzemelerden sağlanarak gerçekleştirilmektedir. Karbon bileşiminin en uygun aralığı % 3,5-3,75; silis için ise

% 2-2,75 arasındaki değerlerdir. Grafitlerdeki küre formunun oluşması için gerekli magnezyum miktarı genellikle % 0,04-0,06 aralığında seyrederek. Kükürt miktarı % 0,015'in altında ölçülen değerlerde % 0,035-0,04 magnezyum miktarı yeterli olmaktadır. Magnezyum miktarı belirtilen değerlerin altında kaldığı takdirde içyapıda yeterli küreselleşmenin oluşmaması ve dolayısıyla mısır patlağı şeklinde (vermiküler) grafitlerin oluşması muhtemeldir.

Ergimiş metal kimyasal kompozisyonları dikkate alındığında bileşim içindeki kükürt miktarının ise % 0,02'nin altında olması tercih edilmektedir. Döküm sonrasında ise kükürt miktarı yaklaşık % 0,015 civarında olmalıdır. Küreleştirme işlemi kalıp içinde yapıyor ise kükürt miktarının % 0,01'in altında olması tercih edilmektedir [22]. Mangan oranının kontrol altında tutulması KGDD'de karbür oluşumunu önlemektedir. Karbür oluşturunca etkisi olmasından dolayı, kesit aralığına ve % Si oranına bağlı olarak mangan maksimum bir değerde tutulur. Kesit kalınlığı 25 mm ve daha fazla olan döküm parçalarında, karbür oluşturunca mangan etkisi, silisyum miktarındaki artış ile karşılanabilmektedir. 12 mm civarı kesit kalınlığındaki döküm parçaları için Si oranının % 2,5'dan % 3,0'e gerçekleşen bir artış, mangan oranında da % 0,25'den, % 0,35'e artmasını sağlar. Segregasyon nedeninin yol açtığı bu tür mangan artışı kalın kesitli döküm parçalarında meydana gelmektedir. Mangan yapısı gereği sıvı içerisinde segrege olur. Katılama hızındaki azalma bu segregasyonu belirginleştirir. Yapılan çalışmalarda % 0,4 oranında mangan içeren bir alaşımda son katılama sıvısındaki magnezyum oranının % 2,5 civarında veya daha fazla olabileceği kanıtlanmıştır. Bu segregasyon kesit kalınlığının artmasıyla birlikte silisyum tarafından engellenemez hale gelir. Bunun sebebi ise ilk katılamada anında silisyum segregasyonunun oldukça fazla olmasıdır [19, 21].

KGDD'lerde uygulanan en iyi döküm aralığı Şekil 11'de gösterilmektedir. Şekil incelendiğinde silisyum oranının % 2,8'i geçmesi durumunda darbe dayanımında düşme olacağı görülmektedir. Ayrıca % 2-2,8 silisyum ve % 3,5-3,8 karbon içeriğinde en iyi döküm aralığının sağlandığı taralı çizgilerle gösterilmiştir. Karbon eşdeğerinin en uygun değeri ise % 4,30-4,65 aralığında olduğu belirtilmiştir. Bu değerlerin üstündeki değerlerde ergimiş metalin akışkanlığı belirgin ölçüde azalır ve döküm esnasında zorluklar yaşanır, altında kalan değerlere sahip malzemelerde ise kırılma başlar. Karbon eşdeğerindeki değişkenlik malzeme yapısındaki mekanik özelliklere de etki edeceği gibi döküm kusuru olarak bilinen döküm parçaları içerisindeki mikro çekinti boyutlarını da etkilemektedir. Dolayısıyla sıvı metal hazırlanırken grafikte belirtilen aralık değerlerine çok dikkat edilmelidir.



Şekil 11. KGDD 'lerde Si-C oranlarınaa bağlı en uygun döküm aralığının şematik gösterimi [19].

Segregasyon KGDD'de, katı çözeltide alaşım elementlerinin yüksek bölgesel konsantrasyonu veya alaşım elementlerinin meydana getirdiği karbürler şeklinde meydana gelmektedir. Cu, Ni, Si gibi elementleri KGDD'in katılaşması sırasında grafit kürelerine yakın yerlerde segrege olmaktadır. Buna ilaveten Cr, Mn, Mo, Ti, V gibi elementler ise tane sınırlarında yer alma eğilimi göstermektedirler. Bu doğrultuda homojen ve kabul görülebilir bir döküm matrisin oluşması için küre sayısının önemi artmaktadır. Homojen yapısal dağılımın artışında ve zararlı etkiye sahip taneler arası karbür oluşumunun önlenmesinde katılaşma hızı etkili olmaktadır. Dolayısıyla uygun döküm tasarımı yapılmayan parçalarda kesit kalınlığı arttıkça katılaşma hızı azalmakta ve bu doğrultuda segregasyon oluşumu artış göstermektedir.

KGDD'lerin yapısında kimyasal bileşimin rolü çok önemlidir. Kabul edilebilir bir ürün için başlangıçtaki kimyasal bileşimin oluşması istenen özelliklere uygun olarak seçilmeli ve döküm yapısında karbür oluşumu engellenmelidir. Segregasyon minimum düzeyde tutulması için eş dönüşümlerin sağlanması gerekmektedir. Proses aralığını büyüten alaşım elementleri tercih edilmesiyle beynitik ikinci dönüşümden kaçınmak mümkündür. Özellikle nikel ve molibden elementleri, beynitik dönüşümleri geciktiren ve dolayısıyla proses aralığını genişleten elementler arasında yer almaktadır [19, 23]. Bunların elementler dışında KGDD'lerin yapısına etki eden pek çok element olduğu bilinmektedir. Yapıya etki eden başlıca elementler; [13].

Karbon: KGDD'lerde karbon oranı arttıkça küre yapısına sahip grafitlerin sayısı artar. Bileşim içerisindeki karbon oranının artmasıyla beslenme ve akışkanlık özellikleri de artış gösterir. Dolayısıyla karbon oranı artışı dökülebilirlik kabiliyetini de artırır [12]. Endüstride üretilen KGDD de çoğunluk % 3–4 oranlarında karbon aralığı tercih edilir [13].

Silisyum: KGDD'ler üzerinde magnezyum miktarını artırmakta etkili olan element silisyumdur. Silisyum miktarı karbon segregasyonu ve grafitleşme üzerinde etkin rol alır. Silisyum ötektoid dönüşümde oluşan ferritin oranını ve yapı sertliğini artırarak malzemeye ait mukavemet değerlerinde artışa yol açar. Çoğunlukla ergimiş metale ferrosilisyum olarak ilave edilir. Si miktarı % 1.80–2.80 oranında değişkenlik göstermektedir [13].

Fosfor: GDD'lerde olduğu gibi steadit (kırılgan bir yapı) oluşumuna neden olmaktadır. Bu element, yapı içerisinde süneklik ve tokluğu düşüren bir etki gösterir. Bileşim içerisinde maksimum % 0.05 oranında bulunması kabul görülmektedir [13].

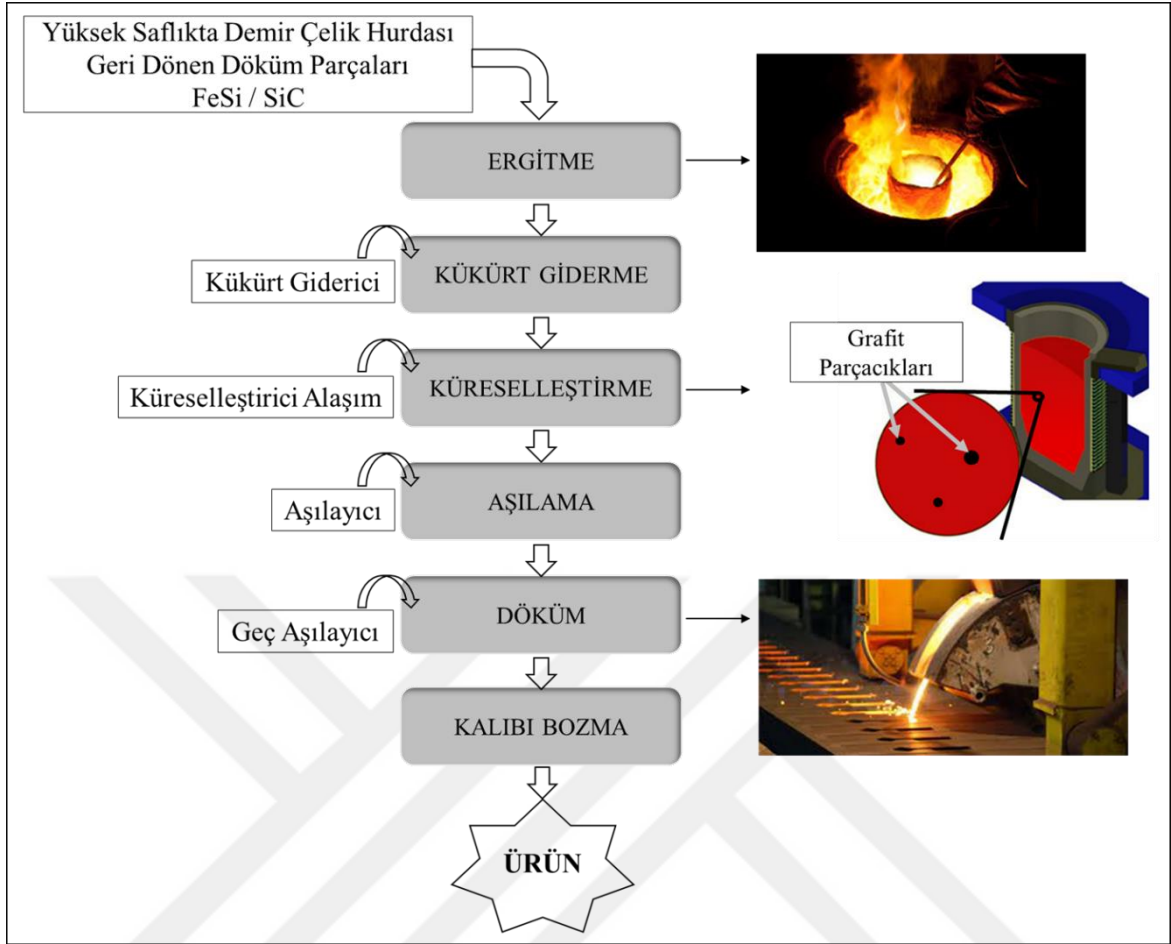
1.3.4. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi

KGDD üretimi için üretildiği zamanı ve firmayı belirten şarj verileri çok önemlidir. Üretim aşamasında önemsenmesi ve dikkat edilmesi gereken bir işlemdir. Üretim aşamasında hazırlanan sıvı metale yönelik elementlerin kabul edilebilir oranlarda kullanılması gerekmektedir. Üretim aşamasında kullanılan çelik hurdanın ve diğer farklı malzemelerin kimyasal kompozisyonlarının bilinmesi gerekmektedir. Alaşım element yüzdelерinin kontrol edilmesi yapıyı kontrol edebilmek adına oldukça önem arz etmektedir. Ferrit oluşumuna eğimli olan C ve Si'nin yanında, C, Mn, Mo, Ni, gibi elementler de perlit oluşumunu desteklemektedir. Oluşan grafitlerin küreselleşme işlemi ergitme işleminden sonra yapılması gerekmektedir [6, 10].

KGDD üretimi genel olarak ergitme ve ocakta alaşımlama aşaması, küreselleştirme ve aşılama işlemi ile bu işlemlerin verimlerinden oluşur. KGDD üretiminde iki temel aşama vardır; birincisi aşama küreleştirici yani magnezyum ilavesidir. Bu yöntem en ekonomik ve etkili olanıdır. Bileşimde % 0,015-0,05 oranında magnezyum kabul görülmektedir. İkinci aşama ise üretimde oldukça önemli olan ergimiş metal üzerinde katılaşmanın başlayacağı çekirdeklerin sağlandığı aşılama aşamasıdır [8]. Aşılama ile KGDD'nin mikroyapısında küresel formdaki grafit sayısını artırmak mümkündür. Eriyik malzeme soğumaya başladığında aşılama etkisini kaybettiğinden dolayı döküm işleminin hızı aşılama etkin bir faktördür [6, 10]. Ferrosilisyum alaşımları KGDD'ler için uygun aşılama ajanlarıdır. Dökme demirlerde ürün kalitesini geliştirmek için ve sıvı metalde oksijeni gidermek amacıyla aşılama elementi olarak kullanılırlar. Silisyum temel olarak mukavemet ve aşınma direnci, esneklik, korozyon direnci (ısıya dayanıklılık) ve düşük elektriksel iletkenlik ve manyetik büzülme özelliklerini artırır.

Sıvı metal içerisine eklenen aşılama ajanı ilk olarak çözünür. Ardından, sıvı içerisinde çok küçük boyutlarda CaS ve MgS gibi inklüzyonlar oluşturur. Bu inklüzyonlar üzerinde çeşitli silikatların oluşur. Sıvı metal içerisindeki çekirdeklenme bu silikatların üzerinde gerçekleşir. Dolayısıyla aşılama ajanı taneciklerin katılaşma başlayana kadar erimeden yayılmasıyla yeni kristallerin oluşması için uygun ortam sağlanır. Bu durumda daha fazla sayıda grafitleşme merkezi ile birlikte daha çok grafit küreciklerinin oluşması sağlanır. Bu açıdan aşılama, karbür oluşumunun önlenmesini ve grafit oluşturma eğiliminin artmasına olanak verir [8, 14].

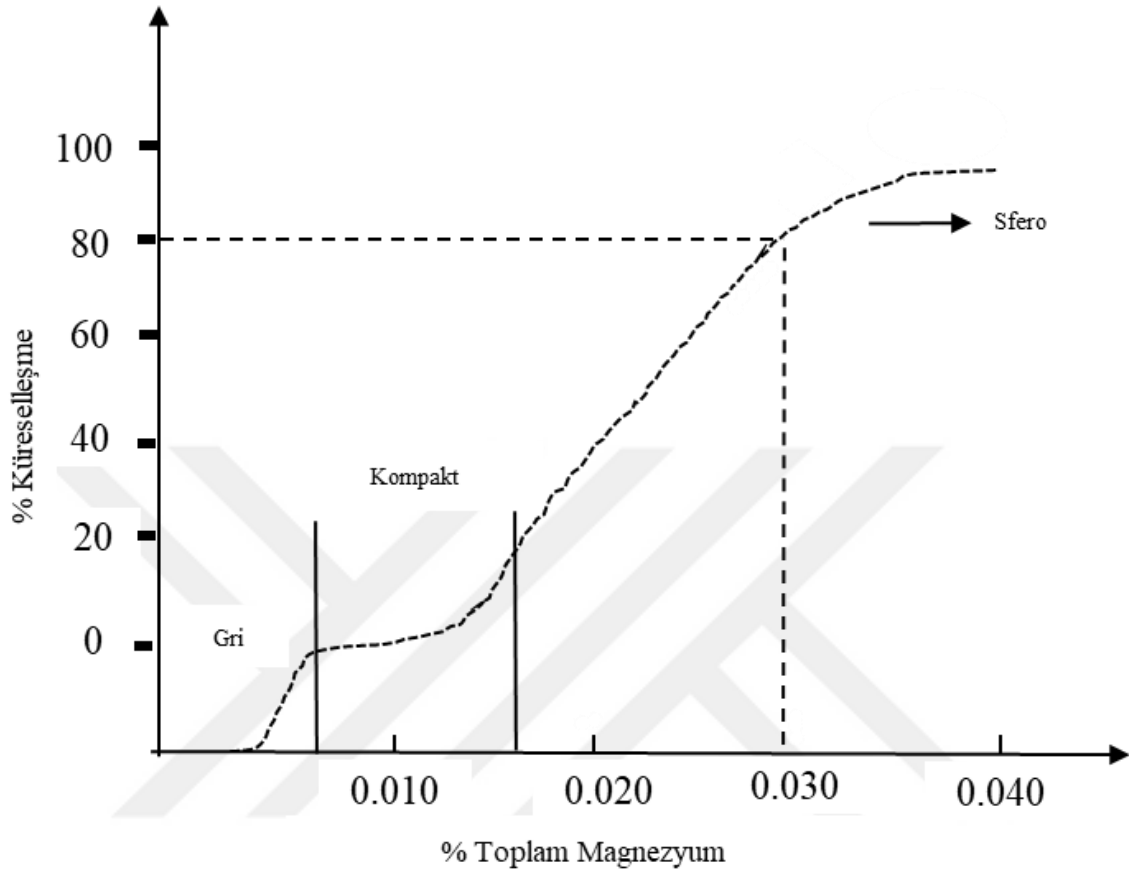
Yüksek kalitede bir döküm elde edebilmek için Şekil 12'de gösterilen akış şeması önem arz etmektedir [6, 24]. Üretim esnasında döküm işlemi gerçekleşmeden hemen önce ergimiş metale yeterli miktarda magnezyum ilave edilerek demir aşılanır ve döküm işlemi gerçekleştirilir [6]. Magnezyum ilavesi zor fakat çok önemli aşamaların başındadır. Magnezyum küreselleştirme malzemesi olduğu gibi aynı zamanda sıvı metal için kükürt ve oksijen giderici olarak da rol almaktadır. Sıvı metalin oksijen ve kükürt bulundurma seviyesi çok yüksek ise önemli miktarda magnezyum, sülfür ve magnezyum oksit oluşumunda kaybolacaktır. Ayrıca nedeni tam olarak bilinmemekle birlikte magnezyum elementi lamel grafit oluşumunu önleyerek içyapıdaki grafit şeklinin küre olmasını sağladığı tespit edilmiştir. Küreleşmenin sağlanması için genel olarak sıvı metal bileşiminde % 0.05 oranında artık magnezyum gerekmektedir [26].



Şekil 12. KGDD' nin genel üretim şeması ve indüksiyon ocağında çözünmeyen grafit parçacıkları [6, 25].

Magnezyum miktarı küre şeklindeki grafitleri oluşturmak, dökme demirin ana bileşimindeki oksijen ve kükürt miktarlarına bağlıdır. Küreselleştirme işlemi sırasında, ergimiş metal sıcaklığı 1538-1560 °C civarında olduğundan magnezyum buharlaşma sıcaklığının oldukça üzerinde bir değerdedir. Bu doğrultuda sıvı metalle temas eden magnezyum aniden buharlaşır dolayısıyla uygun bir şekilde yapılmadığı düşünüldüğünde reaksiyonun çok şiddetli olması muhtemeldir. Küreselleşme işleminde magnezyumun verimi, hava ile temas etmeden önce, magnezyum buharının içinden geçerek yükseldiği sıvı metal derinliğine bağlıdır. Dolayısıyla sıvı metalin magnezyum buharı ile ulaşılan derinlik verim açısından oldukça önemli olmaktadır. Reaksiyon şiddetini azaltmak ve uygun metalürjik şartları sağlamak adına, çoğunlukla magnezyum farklı elementlerle alaşımlandırılır.

Şekil 13 incelendiğinde magnezyum oranının artmasıyla yapının KGDD'ye geçtiği görülmektedir [8].



Şekil 13. Magnezyumun küreselleşmeye etkisi [2, 20].

Literatürde ergimiş metale ilave edilecek magnezyum miktarı ile ilgili pek çok formül bulunmaktadır. Bunlar arasında kullanımı en kolay ve basit olanı Denklem (1)'de verilmiştir;

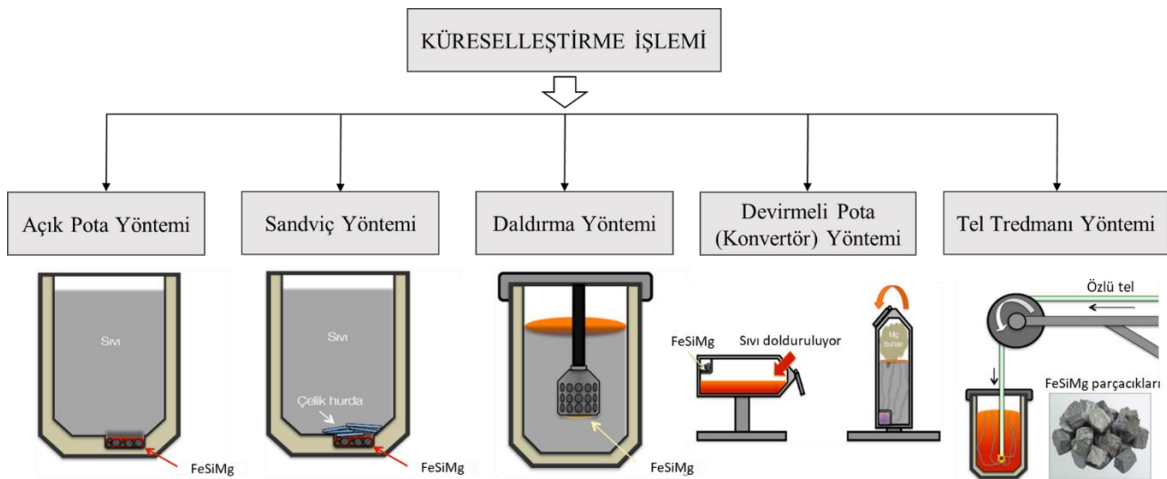
$$\% \text{ Mg} = [(\text{İstenilen } \% \text{ Mg}) / (\% \text{ Mg Verimi}) \times 0,01] - \text{Bileşimdeki } \% \text{ S} \quad (1)$$

Bu bağıntıda şartlara bağlı oran, magnezyum verimine ait olandır. Bu oran % 10-90 arasında değişkenlik göstermektedir. Dolayısıyla bu değişkenlik nedeniyle formül her uygulayıcının kendi şartları ve daha önceden elde edilen tecrübe sonuçlarına göre

hesaplanmalıdır. Aşırı magnezyum kullanımı maliyet artışlarına neden olacağı gibi döküm parçası içinde mikro boşluk oluşumunu da arttırmaktadır. Bu nedenle bileşimlerde istenen magnezyum oranı % 0,040-0,050 aralığında kontrol altına alınmalıdır [8, 27].

1.3.4.1. Küreselleştirme İşlemi (Mg Tretmanı)

KGDD üretiminde, ergimiş metal alaşımı bir magnezyum tretmanı işleminden geçirilerek grafitin küresel bir şekilde çökmesi sağlanır. Bu işlem, ergimiş metaldeki yüzey gerilimini azaltmak ve bu sayede grafitin istenilen form dışı (yapraksı biçimde) büyümesine yol açan oranlarını düşürmek için uygulanmaktadır. Magnezyum kükürt ve oksijen ile tepkimeye girebilen bir element olmasının yanında yüksek denge buhar basıncı sayesinde karıştırmaya gerek kalmadan sıvı içine kolaylıkla yayılabilmesi sayesinde dökümhanelerce sıklıkla tercih edilir. Ayrıca magnezyum demirle de herhangi bir bileşik oluşturmaması onu tercih sebebi yapmaktadır. Magnezyum dışında bazen seryum içeren bazı toprak elementleri de karışımlarda bu amaçla kullanılırlar [25]. Şekil 14'te küreselleştirme işleminde kullanılan yöntemlerin şematik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 14. Küreselleştirme işlem yöntemleri [25].

Birkaç farklı şekilde küreselleştirme işlemi yapılabilir. Bunlardan en basit olanı ferroalyaj formunda (FeSiMg) magnezyumun bir potanın dibine yerleştirip, ocakta hazırlanan ergimiş metalin belirtilen potaya dökülmesiyle gerçekleştirilir. Bu işleme Açık

Pota İşlemi adı verilir. Bu yöntemde, ergimiş metale nazaran daha hafif olan FeSiMg; bir taraftan tepkimeye girerken, diğer taraftan yüzme eğiliminde olur ve dolayısıyla işlemin verimi yaklaşık % 20-30 gibi düşük değerlerde kalır.

Sandviç yöntemi, potanın dibine yerleştirilen, FeSiMg alaşımının yüzmesini engelleyen ve ferroalyajın üzerinde örtü görevi gören bir malzemeye ergimiş metalin ilavesi ile gerçekleştirilen yöntemdir. Bu yöntemde, FeSiMg üzerine çoğunlukla demir-silisyum veya çelik hurda ile bir battaniye yapılır. Ayrıca reçineli kum ya da kalsiyum karbür battaniye olarak kullanılarak bekletme süresi uzatılabilir. FeSiMg'nin yüzmesini engellemek için gerçekleştirilen bu önlem ile küreselleştirme işleminin verimi yaklaşık % 40-45 oranlarına kadar yükseltilebilmektedir. Türkiye'deki birçok dökümhanenin bu yöntemi tercih etme sebebi uygulamasının kolay oluşudur. Battaniye olarak kullanılan malzeme miktarının istenilen değerden fazla olması durumunda sıvı metal sıcaklığında azalma meydana getireceğinden bu diğer yöntemlere göre belirgin bir dezavantaja neden olacaktır.

Daldırma yöntemi, bardak yapısında ferroalyaj refrakter bir kaba doldurup, ters bir şekilde sıvı içine daldırılarak gerçekleştirilir. Bu yöntemde, ergimiş metal pota içinde bulunduğu durumda, ferroalyajı dışarıdan ergimiş metale daldırılır. Bu işlem yaklaşık % 50 ile oldukça yüksek bir verime sahiptir ve sandviç yöntemin de önüne geçmektedir. Sıvı içine daldırılan düzeneğin soğuk olması, sıvı sıcaklığının azalmasına yol açacaktır. Bu durum yönteme ait dezavantaj olarak değerlendirilir.

Konvertör veya diğer adı ile devirmeli pota işlemi yönteminde, üst kısmında cep bulunan bir pota kullanılır ve ilk aşamada bu pota yatay olarak konumlandırılır. Bu yöntemde çoğunlukla saf magnezyum kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımı yatay olarak konumlandırılan ve potanın içindeki bulunan bu cebe yerleştirilir. Ergimiş metal pota içine doldurulup, potanın kapağı kapatıldıktan sonra pota dikey pozisyona getirilir ve ergimiş metal cebe yerleştirilmiş olan magnezyum alaşımıyla tepkimeye girmesi sağlanır. Pota üzerinde bulunan kapak vasıtasıyla magnezyum buharı pota içinde hapsedilerek verim arttırılmış olur. Böylelikle % 50'ye varan oranda bir verim sağlanmış olur. Fakat potanın soğuk olması durumunda sıvı metalde gerçekleşen soğuma bu yöntemde büyük dezavantajlara yol açmaktadır. Bu dezavantajı engellenmek için konvertörün sürekli olarak kullanılması ve sıcak tutulması gerekmektedir.

Tel tretmanı yönteminde; sıvı metal içerisine belirli bir hızda özlü bir tel daldırılarak küreselleştirme işlemi gerçekleştirilmiş olur. Tel tretman yönteminde, otomasyon ve süreç kontrolü açısından önemli ölçüde avantajlar sağlamaktadır. Fakat sandviç ya da açık pota

gibi yöntemlerin bu yöntemle göre daha kolay uygulanabilir ve ucuz olmalarından dolayı bu yöntemin tercih edilebilirliği düşüktür [25].

1.3.4.2. Aşılama İşlemi

Demir döküm üretiminde yer alan en önemli aşamalardan bir tanesi de aşılama işlemidir. Dökme demirlerin aşılama; sıvı metale çekirdek ilave edilerek, katılama mekanizmasını ve mikroyapısını istenilen özellikleri elde edebilmek için etkilemek anlamına gelmektedir. Çekirdekler $\leq 4 \mu\text{m}$ boyutunda, grafit çökmesi için kristalleşme merkezleri işlevini gören ince parçacıklardır. Aşılama; geliş güzel değil, hesaplar doğrultusunda ergimiş metalin ihtiyacına göre ve dizayn doğrultusunda doğru bir seviyede yapılmalıdır. Aşılama, hem grafit çökmesini (sayı, boyut, şekil açısından) hem de katılama (gri katılama teşvik etmek, ledebürte soğumayı engelleme) etkilemek için tasarlanmalıdır. Bu doğrultuda aşılama işlemi birkaç farklı aşamada uygulanabilmektedir. Ön koşullandırıcıları: Ocak aşısı olarak da isimlendirilmektedir. Bu aşamada amaç ergimiş metali aşılama değildir. Yapılacak olan aşının çalışması için, yani sıvıyı alamaya hazır halde tutabilmek için gerçekleştirilir. Ocakta bulunan yeni erimiş sıvı metal, tamamen sıvı fazda görünüyorsa olmasına rağmen aslında içinde çok küçük boyutta grafit parçacıkları bulundurulur.

Potada aşılama: Bu yöntem dökümhanelerde oldukça yaygın kullanılmakta olan bir aşılama yöntemidir. KGDD üretiminde bu işlem genellikle, küreselleştirme işleminden hemen sonra gerçekleştirilir. Aşı boyutları potadaki metalin ihtiyacına göre 0,6 mm ile 6 mm arasında değişkenlik gösterebilir. Bu yöntemde aşı; özlü tel içinde veya ergimiş metal içine doğrudan elle verilebilir.

Geç aşılama: akan metal verilerek (ağız aşısı) veya kalıp içine blok yerleştirilerek yapılabilir. İlk olarak ergimiş metale verilene aşı çözünür. Daha sonra ergimiş metal içinde çok küçük boyutlarda MgS ve CaS gibi inklüzyonlar oluşmaya başlar. Bu durumda büyük boyutlar cürufa giderken küçük olanlar ergimiş metal içinde kalır. Devamında gerçekleşen süreçte bu sülfür inklüzyonlarının civarında SiO_2 , MgO gibi silikatlar oluştuğu görülür. Son aşamada bu silikatların üzerinde de Al, Ba, Ca ve Sr gibi elementler içeren daha farklı silikatlar çekirdeklenmektedir. Son aşamada oluşan bu silikat katmanı üzerinde grafit çekirdeklenir. KGDD üretiminde kullanılan aşılar bu sebeple Al, Ca ve Ba gibi elementleri içerir [25].

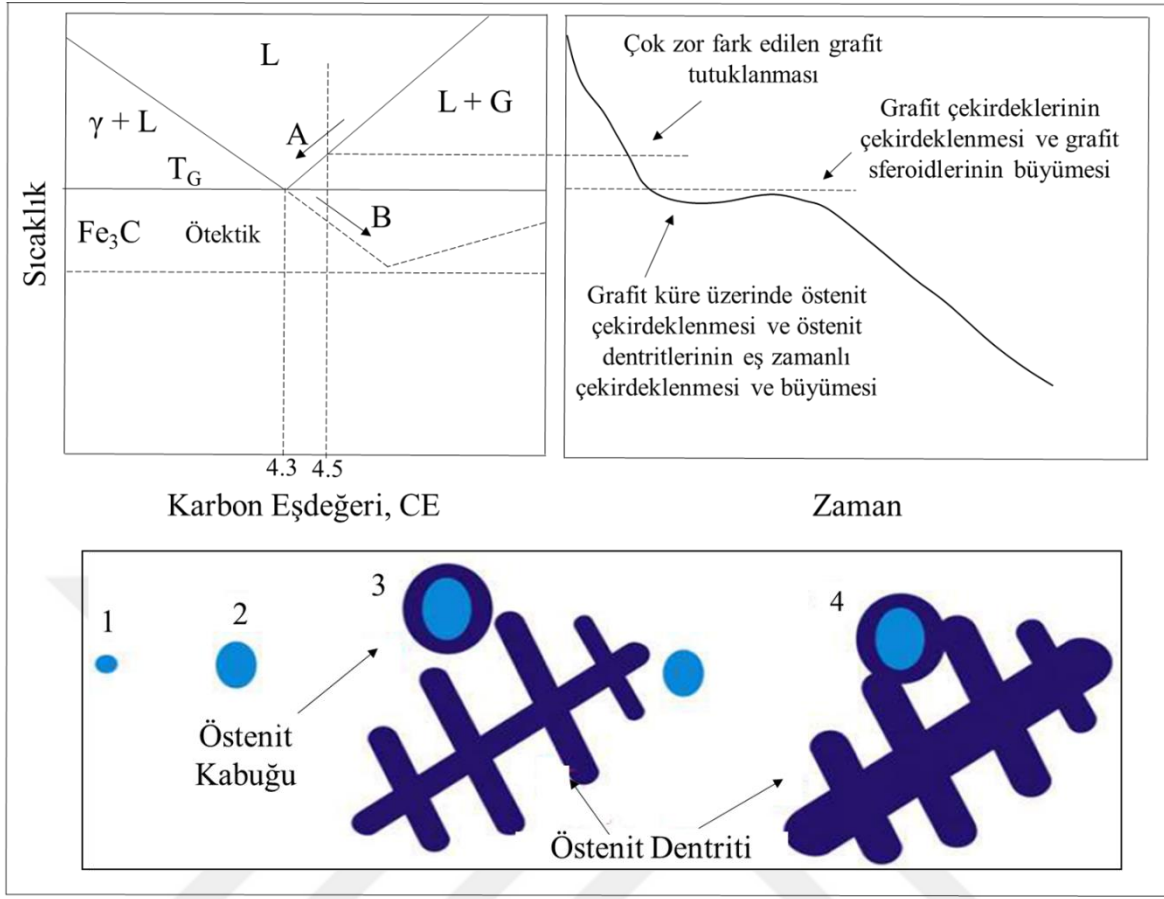
1.3.5. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Katılaşma

Sfero dökme demirlerin matris içinde dağılmış küre formundaki şekilleri çeliğinkine benzer bir yapıya sahiptir. Bu türün yapı içerisinde gri dökme demirden farklılığı grafitlerin şekillerinin küre oluşudur. Ayrıca KGDD gri dökme demirlerden farklı olarak, aynı karbon oranlarında, ötektik katılaşması daha yüksek sıcaklıkta başlayan malzeme grupları arasında yer alır. Bu durumda küre formu şeklindeki grafitler östenit kabuğu ile çevrilir. Bu sayede yalnız bir faz (östenit) ötektik yapıyla temas halinde kalır ve bu tarz katılaşmaya neoötektik katılaşma adı verilir.

Her bir östenit kabuğu bir hücreyi ifade eder ve bu hücre içindeki grafitlerin büyüebilmesi için östenit kabuğundan içeriye doğru karbon difüzyonu olmak zorundadır. Bu sebeple GDD'lerde, KGDD'lere nazaran daha hızlı bir katılaşma olmaktadır. Neoötektiğin büyümesi başladıktan sonra, yapı içerisinde grafit çekirdeklenmesi olmaz. Dolayısıyla küresel grafitlerin sayısı katılaşmadan hemen önce belirlenmiş olur. Ötektoid sıcaklığına ulaşana kadar grafitler üzerine karbon çökelmeleri devam eder [8, 17].

Sfero dökme demirler için genel sınıflandırma, malzeme yapısı ve mekanik özellikler dikkate alınarak yapılmaktadır. Bu tarz demir dökümlerde mekanik özelliklerin matris yapısına bağlı olma sebebi grafitlerin küresel formdaki şekilleridir. Küre boyutları malzemenin mekanik özellikleri etkilemez. Döküm parçanın kesit kalınlığına ve oluşum sırasında grafit çökmesi için yeterli çekirdek sayısına bağlı olarak küresel grafitler çeşitli büyüklüklerde olabilirler. Çoğunlukla ince kesitlerde daha çok sayıda çekirdek bulunur dolayısıyla ince kesitlerde grafit kürelerinin boyutları da daha küçük olur. KGDD'lerde, grafit dağılımı ve sayısı malzemeye ait metalurjik kalitenin bir göstergesidir. Küre sayısı ortalama olarak 100 adet/mm² olması tercih sebebidir. Bu tür demir dökümlerde de GDD'lerdeki gibi ötektoid sıcaklığından geçme anındaki alaşımlandırma ve soğuma hızı, matris yapısını belirler. Uygun sayıda kürenin gerçekleşmesi durumunda tamamen küresel grafitli bir yapının elde edilmesi mümkündür. Karbonun yayılabileceği yer alanının az olması küre sayısının yeterli seviyelere ulaşmaması anlamına gelir dolayısıyla döküm işleminde gerçekleşen değişkenlerine ve kimyasal bileşime bağlı olarak, soğuma anında ya demir karbür ya da lamel şekilli grafitler oluşur [13].

Şekil 15'te KGDD'lerin katılaşmasını açıklayan faz diyagramı ve soğuma eğrisi adımları verilmiştir.



Şekil 15. KGDD'nin katılaşmasını açıklayan faz diyagramı, soğuma eğrisi ve adımlar [28].

KGDD malzemelerinin içyapısı, bir matris ve bu matris içindeki oluşan küresel grafitleri temsil eder. Tercihen yapının içindeki grafitlerin hacimsel olarak % 8-10'unu kaplaması tercih sebebidir. Yapıda bulunması muhtemel olan karbürler, östenitik KGDD dışında pek tercih edilmez. Karbürler tokluk ve mukavemet gibi mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilerler. Hipoötektik bileşimine sahip KGDD'lerde östenit dentritlerinin oluşumunun hemen ardından katılaşma başlar. Hiperötektik bileşimlilerde de katılaşma genel olarak benzerlik gösterir. İlk katılaşan faz olan küre şekilli grafitler buradaki ayrıcalık arasında yer alır. Hipoötektik katılaşma ile iyi bir KGDD üretimi gerçekleştirilir. İlk katılaşan östenit fazının katılaşma sonrasında alaşımsız veya alaşımlı KGDD'lerin yapısı tamamen östenittir. Bu yapı katı çözelti halinde yaklaşık % 1 karbon içermektedir. Ergimiş metal soğudukça, karbonun östenitteki çözünürlüğü de azalır, çözülden gelen karbon çöker ve grafit kürelerine bağlanır. Bu etkileşim, katılaşma sonlanana kadar devam eder. Alaşımsız KGDD'lerde östenit başka bir kristallografik form olan ferrite dönüşür ve oda

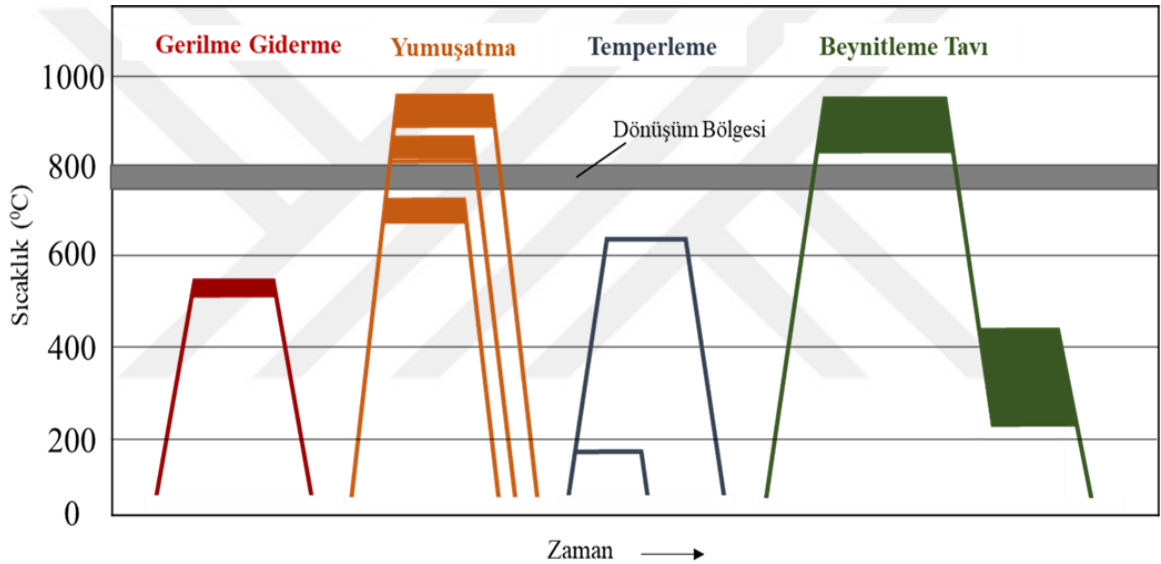
sıcaklığında kararsız bir yapı sergiler. Bu dönüşüm sıcaklığı 723 °C seviyelerindedir ve içyapıdaki silisyum miktarından etkilenir. Östenit-ferrit dönüşümü sfero dökme demirlerde matris yapının karbon oranını etkiler. Karbon oranı östenitin kristalleşme sıcaklığında % 1 civarındadır ve bu oran soğuma sırasında azalmaktadır. Karbonun östenitteki çözünürlüğü östenit-ferrit dönüşümü sırasında % 0.55 seviyelerindedir. Fakat ferrit içinde karbonun çözünürlüğü sıfır olduğundan dönüşüm sırasında soğuma hızına, kimyasal bileşime ve grafit dağılımına bağlı olarak karbon açığa çıkar. Düşük soğuma hızlarında açığa çıkan bu karbon çökerek grafit kürelerine eklenir. Bu şekilde matris yapı tamamen ferrittir forma dönüşür ve FKGDD elde edilmiş olur. Fakat hızlı soğuma gerçekleşirse karbon çökmeye zaman bulamaz. Karbon, katılaşma sırasında östenit bölgelerinde dönüşümüne devam ettiği ferrit içinde çözünemez. Bunun sonucunda östenit doku içinde ince Fe_3C plakaları oluşmaya başlar. Bu plakalar ferrit ile ardışık plakalar oluşturur ve matrisin sürekliliğini bozar. Oluşan bu yapıya da perlit adı verilir. Bu aşamalardan geçerek oluşan dökme demirler ise PKGDD olarak adlandırılır. KGDD'ler döküm sonrası matris yapılarında farklı oranlarda ferrit ve perlit fazı içerirler. Çeşitli katılaştırma ve ısıtma işlem teknikleriyle bu yapılar değiştirilebilir. Katılaşmadan sonra soğuma hızına müdahale edilerek veya döküm parçaları üzerinde farklı ısıtma uygulamalarıyla birlikte beynitik, martenzitik veya östenitik matris yapıların elde edilmesi mümkündür [8, 17].

1.3.6. Küresel Grafitli Dökme Demirlere Uygulanan Isıl İşlemler

Kullanılan kimyasal bileşim ve mekanik özellikler bakımından demir dökümler, kullanım yerlerine göre farklılıklar gösterirler. Birçok değişkene sahip olan döküm şartlarında; model kalıplama, ham madde ergitme ve döküm işlemi çoğu zaman farklılık gösterir. Bu etkenler doğrultusunda aynı alaşımdan dökülen parçalar da farklı metalürjik özellikler gösterebilir. Hatta aynı parça üzerinde bile farklı metalürjik özellikleri görmek muhtemeldir. Döküm parçaları farklı kesit kalınlıklarına sahip olabileceği gibi, bu farklılık; döküm işleminin ardından da farklı soğuma ve katılaşmaya etkilerine sebep olmaktadır. Soğuma ve katılaşmadaki bu değişkenlik, yine parça üzerinde farklı yapı ve mekanik özellikleri oluşturur. Ayrıca döküm parçalarında meydana gelen gerginlikler kullanılan alaşım dayanımını azaltır. Belirtilen bu etkiler doğrultusunda ısıtma işlem uygulamaları döküm parçalarında; oluşması muhtemel yapı farklılıklarını gidermek, gerilimleri azaltmak, mukavemeti arttırmak ve işlenebilirliği kolaylaştırmak için kullanılmaktadır [29].

Dolayısıyla uygulanan ısıtım prosesleri ile KGDD'lerin üstün özelliklere sahip olması sağlanmaktadır.

KGDD'lere uygulanan ısıtım işlemler çeşitleri ve bu çeşitler için geçerli olan sıcaklık-zaman grafiği Şekil 16'da verilmiştir. Bu ısıtım işlemler uygulamaları çelik parçalara uygulanan ısıtım işlemler prosesleri ile benzerlik göstermektedir. Fakat dökme demirlerin kimyasal kompozisyonunda bulunan farklı alaşım elementleri nedeniyle dönüşüm kararlı ya da yarı-kararlı olabilmektedir. Bu durum dökme demirlerin ısıtım işlemler uygulamalarını çeliklerden ayırır. Bu duruma ek olarak, dökme demir parçalarının içyapılarında görülen bağlı karbon elementi, kritik sıcaklıkta grafit formunda ayrışabilmektedir [11, 30].



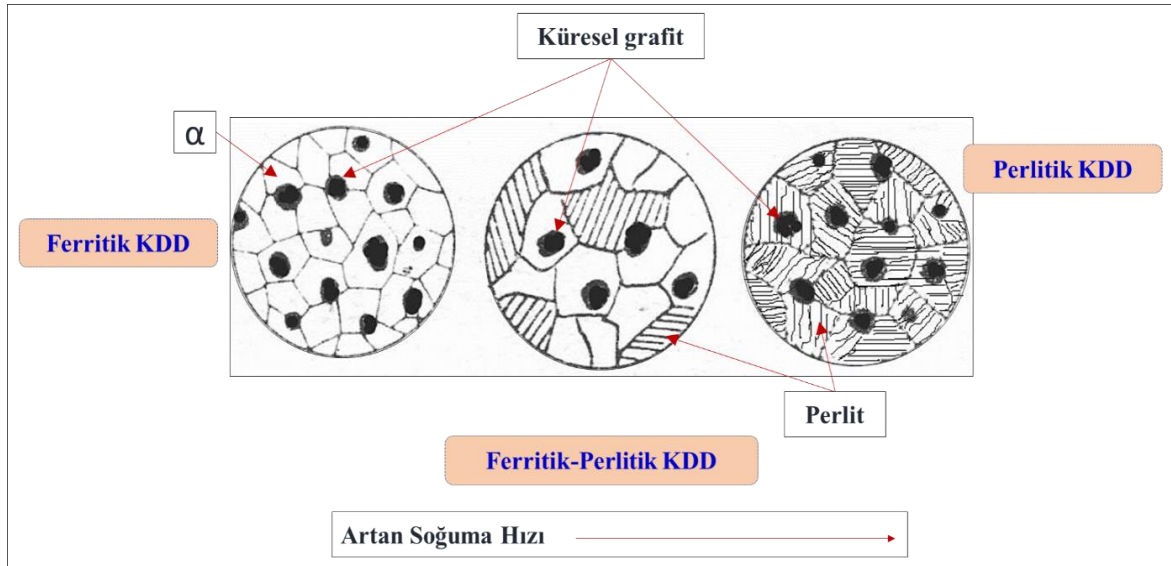
Şekil 16. Dökme demir ısıtım prosesleri ve sıcaklık-zaman grafiği [11].

Dökme demirlerde dönüşüm östenitten ferrit ile perlite doğru yönlendirilmektedir. Fakat içyapı oluşumu çelikten farklılık gösterir ki ferrit ile perlit oluşum miktarı difüzyon kontrollü gerçekleşir. Alaşım elementinin miktarı ve türü; sıcaklık, zaman ve soğuma hızı gibi farklılıklar ile difüzyon hızını etkilemektedir. Döküm şartlarında elde edilmesi istenen fakat çeşitli etkenler doğrultusunda elde edilemeyen metalürjik özellikler ısıtım işlemler uygulamaları ile elde edilebilir fakat hem ısıtım hem de soğutma esnasında oluşturulan bu değişimler detaylı olarak incelenmelidir [31].

KGDD'lerde katılaşma esnasında incelenen içyapı yapı östenittir. Bu aşamada, yapı içinde çözünebilen karbon miktarının fazlası grafit olarak ayrışır. Sıcaklığın düşmesiyle

östenitteki karbon çözünürlüğü azalmaktadır. Dolayısıyla östenit fazından ayrılan karbon elementleri difüze olarak grafit şeklini alı ve ayrıldığı bölgeyi karbonsuzlaştırma eğilimi sergiler. Bu durumdan sonra ferrit fazı oluşur. Ferrit fazı perlit fazına göre daha yüksek sıcaklıkta oluşmaktadır, yüksek uzama eğilimi gösterir. Yapı içerisindeki ferrit ve perlitin oranı metale ait kimyasal kompozisyonla soğuma hızından etkilenir. Dolayısıyla bu durum malzemenin içyapı ve mekanik özelliklerine doğrudan etki eder [15].

Soğuma hızındaki değişiklik Şekil 17’de görüldüğü gibi malzeme mikroyapısı tamamen değiştirmektedir [15]. Döküm parçalarına ait içyapılar fırında yavaş soğutma sonucu incelendiğinde soğuma hızının difüzyonun sürekliliğine olanak verdiği görülür. Bu esnada ferrit fazı meydana gelir. Parçaların havada soğutma şartlarında incelendiğinde ise, soğuma hızının difüzyona imkan vermediği görülür. Isıtma esnasında ise oluşan yapı daha az miktarda değişkenlik gösterir. Östenitleme sıcaklığına çıkarılmış malzemenin havada soğuma şartlarındaki soğuma hızı, genellikle kalıp içerisinde oluşan katılaşma sonrasındaki soğuma hızına göre daha yüksek olmaktadır. Ayrıca grafit ile birlikte ana yapı da dönüşmektedir. Bu açıdan incelendiğinde sadece mikroyapı açısından etki göstermekte birlikte malzemenin mekanik özellikleri de tamamen değişmektedir [11, 16, 31].



Şekil 17. Soğuma hızının dökme demirlere etkisi [5, 11].

KGDD'lerde yapı tamamen ferrit ve perrit ya da bu iki fazın birlikte bulunması şeklinde olabilir. Ayrıca martenzit, beynit veya tamamen östenit halinde de olabilmektedir. Bu yapılar ait KGDD'lerde uygulanan başlıca ısıtım işlem uygulamaları aşağıdaki gibidir;

Gerilim giderme; dökme demirlerde döküm sonrası oluşan iç gerilmeleri gidermek ya da azaltmak için uygulanmaktadır. Bu tür ısıtım işlem uygulamaları düşük sıcaklıkta uygulanır.

Tavlama; dökme demirlerde sünek ve tokluğu iyileştirmek, sertlik değerlerini azaltmak ve yapıda oluşan karbürleri gidermek için uygulanan bir ısıtım işlem prosedürüdür. Tavlama ısıtım işlemi uygulanmak istenen döküm parçalar 850–900 °C Daha sonra fırın içerisindeki parçaların sıcaklığı çok yavaş olarak 650 °C'ye kadar düşürülür. Daha sonra fırından çıkarılır ve oda sıcaklığına çıkarılarak kendi halinde soğumaya bırakılır. Bu uygulama sonucunda döküm parçalarının içyapıları incelendiğinde parçaların ferritik bir yapı kazandığı gözlemlenir [30].

Normalleştirme; dökme demirlerde dayanımı arttırmak ve sünekliği iyileştirmek için uygulanmakta olan bir yöntemdir. Döküm parçaları, Daha sonra 800 °C' a kadar düşürülerek fırın içerisinde yavaş soğutulur. Bunun akabinde fırından çıkartılan parçalar oda sıcaklığında çıkarılarak soğumaya bırakılır. Bu uygulama sonunda döküm parçalarına, perlitik bir yapı kazandırılır. Böylece döküm parçalarının mekanik değerleri (çekme ve akma dayanımları) en yüksek seviyelerine çıkarılır [30].

Sertleştirme ve temperleme; dökme demirlerde sertlik ve mukavemeti daha da arttırmak için uygulanmakta olan bir uygulamadır. Temperleme ve sertleştirme işlemleri bir kademede yapılabilir. Döküm parçaları, 850–900 °C sıcaklığına çıkarılarak yaklaşık 1-4 saat bu sıcaklıklarda tutulur. Daha sonra parçalar yağ ya da su ile hızlı soğutulur. Bu hızlı soğutma işleminin ardından döküm parçaları istenilen mekanik özelliklere göre 200–600 °C arasında bir sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir [30].

Östempereleme; döküm parçaları için yüksek mukavemet, süneklik ve iyi bir aşınma direnci kazanmak için uygulanan ısıtım işlem uygulamalarından biridir.

Yüzey sertleştirme; indüksiyonla parçanın bölgesel olarak sertlik kazanmasını sağlamak için uygulanan bir ısıtım işlem uygulamasıdır [7, 30, 32, 33]. Bu işlem, döküm parça yüzeyinin önce çok hızlı ısıtılarak daha sonra çok hızlı soğutulması ile gerçekleştirilir. Alev ya da endüksiyon akımı ile parça yüzeyi hızlıca ısıtılır. Parçaya ait sert yüzey tabakasının kalınlığı; alaşımın cinsine ve soğutma ortamına göre farklılık gösterir.

1.4. Literatür Özeti ve Çalışmanın Amacı

Günümüzde pek çok alanda kullanılan ürünler metal döküm sektörü olmadan üretilmeyeceği için; döküm sektörü hayatımızın her alanında geniş bir yelpazede parça üretimi ile karşımıza çıkmaktadır. Metal döküm sektörü dikkate alındığında dışa bağımlılığı azaltmak amacıyla; sektörde ilerleme ve her dönemde ülke güvenliği ile gelişimine yönelik katkı sağlamak için bu alanda yapılan yatırımlar her zaman stratejik öneme sahip olmuştur. Metallerin sürekli kullanılabilir döngüsü dikkate alındığında döküm sektörünün, sürdürülebilir ekosistemler konusunda en ön sırada yer alan imalat sektörlerinden biridir. Dökme demirler, mukavemet, iyi aşınma ve korozyon direnci, sertlik ve işlenebilirlik, gibi çok iyi mekanik özellikler göstermelerinin yanı sıra ekonomik ve kolay üretilebilir olmalarından dolayı yaygın olarak kullanılan malzeme grupları arasında yer alır. Dökme demirin üretiminde aşılama işleminde başarıya ulaşılması gri dökme demirlerin üretilmesinde ilk gelişme olarak bilinir. Bu gelişmenin ardından magnezyum ilavesi ile küreselleştirme işleminin gerçekleştirilmesi ile GDD'lere göre 2 kat daha mukavemetli olan KGDD'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu gelişim özelliği grafitin küreselleştirilebilmesi ile mümkün olmuştur. Ayrıca teknolojinin gelişimine paralel olarak, KGDD'lerin metalürjik özelliklerinin daha da geliştirmenin yolları aranmıştır. Fakat gerçekleştirilen çalışmalar ve alınan sonuçlar doğrultusunda grafitte küreselden başka bir morfoloji kazandırmanın mümkün olmadığı anlaşılmıştır. Bu durum araştırmacıları döküm parçaları üzerinde mekanik özellikleri iyileştirme ve matrisin modifikasyonu yoluyla geliştirme çalışmalarına yönlendirmiştir.

Endüstriyel uygulamalarda imalat yöntemleri arasında önemli bir yer tutan döküm sektörü, ekonomiklik ve üretim hızı bakımından en yaygın kullanılan yöntemlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Ancak gerçekleştirilen literatür araştırması ve ilgili sektördeki endüstriyel firmalarla gerçekleştirilen görüşmelerde, döküm işleminde kullanılan kalıpların ve döküm yöntemi ile üretilen ürünlerin çeşitli iç ve dış etkenlerin de devreye girmesiyle üretim süresince mikroyapılarında ve mekanik özelliklerinde bozulmalarla karşılaşılabilir. Hatta tüm döküm proses şartları aynı olmasına rağmen farklı soğuma parametrelerine maruz kalan parçalarda bile nihai ürünlerden alınan mikroyapı ve mekanik değerlerde farklılık olacağı bilinmektedir. Ayrıca kullanım alanları bakımından aşınmaya maruz kaldıkları gözlemlenmiş ve geliştirilmeye açık oldukları tespit edilmiştir. Şöyle ki, döküm yöntemi ile üretilen ürünlerin mikroyapılarındaki bozukluklar, mekanik ve tribolojik

özelliklerindeki aksaklıklar, maruz kaldıkları deformasyon ve aşınma, elde edilen ürünün boyutsal ve yapısal özelliğini, ek işçilik maliyetlerini ve firmanın iç-dış piyasadaki ürün kalitesi istikrarını etkilemektedir. Bu maliyetlerin azaltılması ve firmaların iç-dış piyasadaki ürün kalitesi istikrarının artırılması için; teknolojik döküm ürünleri ile üretim aşamalarının geliştirilmesi veya ilettilmesi ana amaç olmakla beraber bu durum her şeyden önce karşılaştırılabilir ürünlere yönelik bilgi ve tecrübe birikimi ile gerçekleştirilebilmektedir. Bu bilgi ve tecrübe birikimi ile teknolojinin de sağladığı olanaklar vasıtasıyla döküm parçalarına ait tasarım ve analizlerin gerçek döküm öncesi bilgisayar ortamında simülasyon programları yardımıyla yapılması sonucu deneme yanılmaya gerek kalmaksızın tek seferde sağlam parça imalatı mümkün hale gelmiştir.

Bu tez çalışmasında döküm yöntemi ile üretilen GGG 40 malzemeli bir aks yuvası parçasının, üretimi, mikroyapısal karakterizasyonu, mekanik özellikleri, kullanım alanlarına göre sürtünme ve aşınma özellikleri incelenmesi ayrıca üretilen ürünlerin geliştirilmesi amaçlanmıştır. Döküm parçasında hata oranının minimize edilmesi ve gelecek çalışmalara yardımcı olabilmesi için; modelleme çalışmalarında, döküm işlemi öncesi ve sonrasındaki hazırlıklarda Magmasoft simülasyon programından yararlanılmak istenmektedir. Simülasyon sonuçları gerçek döküm sonuçları ile karşılaştırılarak döküm sektöründe kullanılan simülasyon programlarının sağladığı olanaklara ve uygulanabilirliklerine değinilmek istenmiştir. Gerçekleştirilen çalışmalarda farklı kalıp bozma süreleri ile üretilen numunelerin yapısal incelemelerinden elde edilen sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, aşınma dayanımı, tane boyutu ve yüzde uzama gibi bulgular karşılaştırılıp standartlara uygun olmayan numunelerin yumuşatma tavlama işlemi ile standartlara uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Mekanik, yapısal ve aşınma deneylerinden elde edilen bulgular değerlendirilerek dökümhanelerde oluşması muhtemel değişken kalıp bozma sürelerine yönelik fire olan döküm parçalarının iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu sayede ihracatta ülke ekonomisinde büyük pay sahibi olan dökümhanelere ön bilgilendirme ve destek sağlanması hedeflenmiştir.

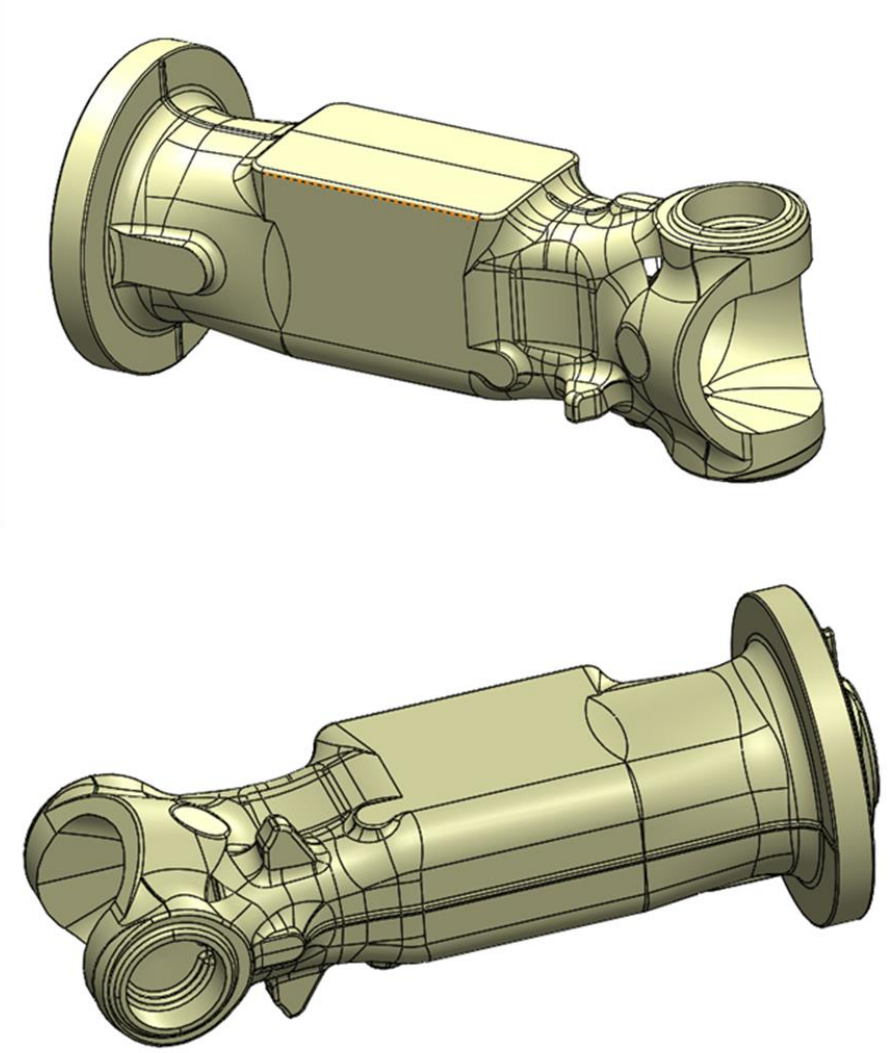
Bu çalışmada, dökümhanelerde seri üretim şartlarında oluşabilecek teknik ve mekanik aksaklıklar sonucu standartlara uymayan yani fire olarak kabul edilen döküm parçalarının standartlara uygun hale getirilmesi için üç farklı grup halinde hazırlanan deney numuneleri üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Test parçaları için malzemeler TS EN 1563:2018 standartlarını karşılayacak şekilde Hekimoğlu Döküm San. Mak. ve Tic. A.Ş.

demir döküm fabrikasında üretilmiştir. Bu çalışma aynı zamanda fabrika için bir ARGE çalışması kapsamında gerçekleşmiştir. Deneysel sürecin temel adımları; test parçasının döküme hazırlanması (model yolluk ve besleyici dizaynı, simülasyon çalışmaları gibi), döküm işlemi, numunelerin hazırlanması, karakterizasyon deneylerinin yapılması ve sonuçların incelenerek değerlendirilmesi şeklindedir.

Deneysel çalışmalarda farklı kalıp bozma süreleri ile üretilen numunelerin yapısal incelemelerinden elde edilen sertlik, çekme dayanımı, akma dayanımı, aşınma dayanımı, tane boyutu ve yüzde uzama gibi bulgular karşılaştırılıp standartlara uygun olmayan numunelerin yumuşatma tavlama işlemi ile standartlara uygun hale getirilmesi amaçlanmıştır. Yapısal, mekanik ve tribolojik deneylerden elde edilen bulgular değerlendirilerek dökümhanelerde oluşması muhtemel değişken kalıp bozma sürelerine yönelik fire olan döküm parçalarının iyileştirme çalışmaları gerçekleştirilecektir. Bu sayede ihracatta ülke ekonomisinde büyük pay sahibi olan dökümhanelere ön bilgilendirme ve destek sağlanması hedeflenmiştir.

2.1. Seçilen Döküm Parça

Bilindiği üzere döküm parçalarına ait katılaşma ve soğuma parametreleri döküm sektöründe parçaların karakteristik özelliklerinin belirlenmesinde önemli bir yer tutar. Test parçası olarak seri üretim şartlarında döküm hat hızının arttırılmasıyla birlikte kum kalıptan erken çıkan parçaların mekanik değerlerinin TS EN 1563:2018 standardı değerleriyle uyuşmamasından dolayı değişken kesit kalınlıklarına sahip bir aks yuvası parçası seçilmiştir. Test parçası olarak seçilen aks yuvası parçasının şematik görünümü Şekil 19'da gösterilmiştir.



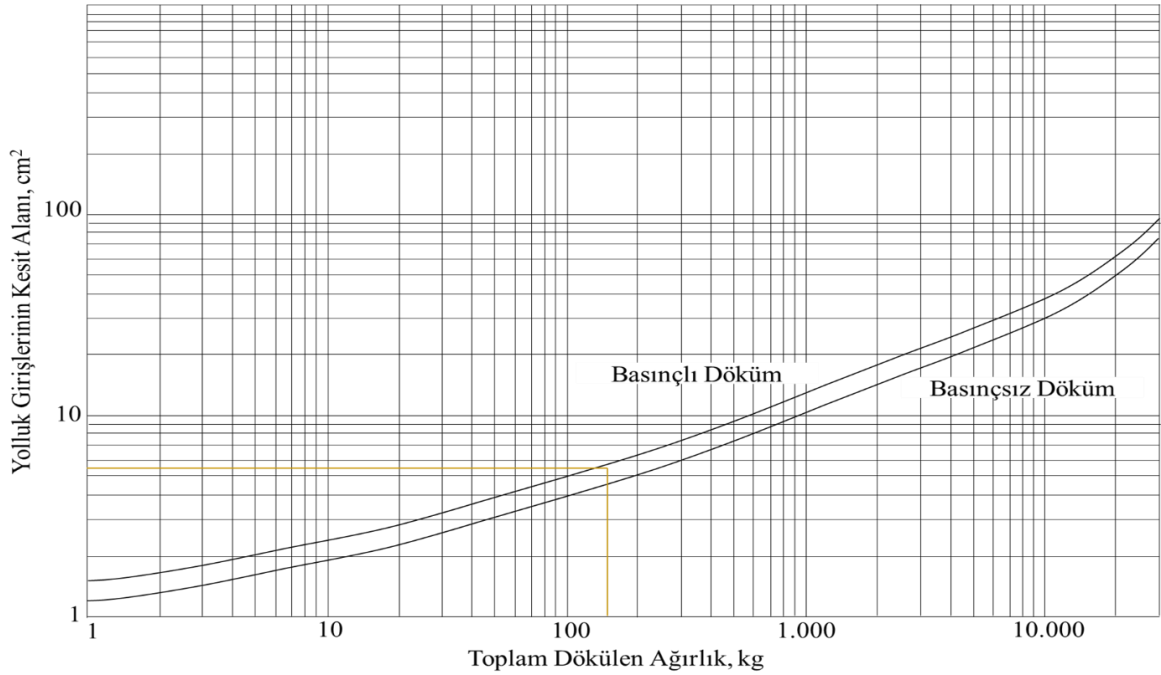
Şekil 19. Deney parçasının şematik görünümü

2.2. Seçilen Döküm Parçasının Yolluk ve Besleyici Dizaynının Hesaplanması

Döküm yöntemi kullanılarak üretimi gerçekleştirilen parçaların; üretim öncesi hazırlanacak olan model dizaynında, yolluk ve besleyicilerin tasarımı önemli ölçüde dikkate alınması gereken bir konudur. Özellikle döküm maliyetlerinin yükseldiği büyük tonajlı sfero dökümlerde yapılan en küçük iyileştirme, büyük finans getirileri ile firmalara katkı sağlamaktadır. Günümüz şartlarında gelişen teknoloji ile birlikte bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarının dökümhanelerde yaygınlaşması döküm tasarımlarının bilgisayar simülasyonlarına dayalı yapılmasına olanak sağlamıştır. Bu teknolojik

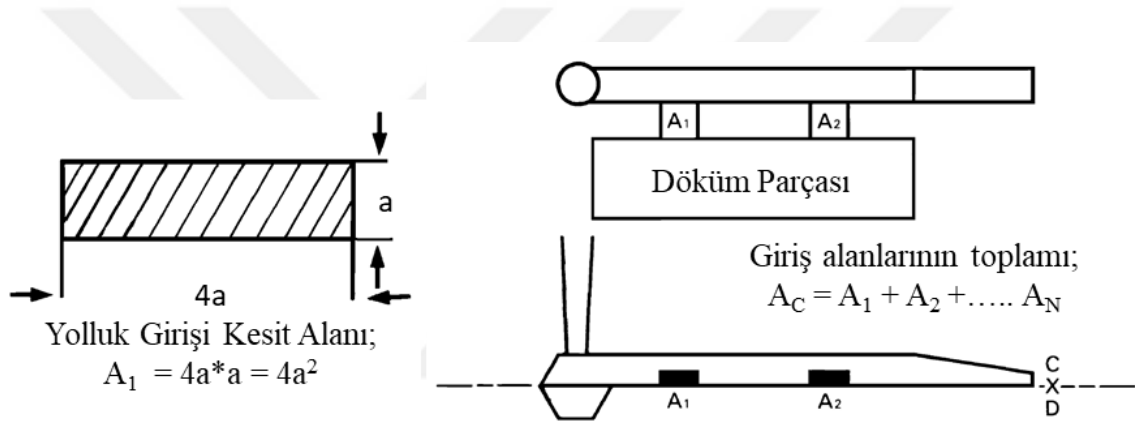
uygulamalar sayesinde döküm tasarımları bilgisayar ortamında optimize edilerek; dökümhane ortamında deneme yanılma pratiklerini en aza indirilir ve deneme maliyetleri azaltılır.

Yolluk ve besleyici dizaynı tasarımında gerek literatür gerekse Magmasoft döküm simülasyon programı çıktılarından yararlanılmıştır. Şekil 20'deki grafikte toplam dökülen sıvı metal ağırlığına karşılık gelen yolluk girişlerinin kesit alanı gösterilmektedir. Seçilen döküm parçasına ait yolluk hesapları yapılırken Şekil 20'deki grafikten yararlanılmıştır. Üstteki siyah çizgi basınçlı döküme karşılık gelen yolluk girişi kesit alanını gösterirken altta kalan siyah çizgi basınçsız döküme karşılık gelen yolluk girişi kesit alanını göstermektedir. Literatürde daha farklı yolluk hesaplamaları ile karşılaşılmaktadır. Fakat burada bilinmesi gereken en önemli konu literatür üzerinden yapılan hesaplamalar ile gerçek dökümün tam anlamıyla birbirini karşılaması imkansızdır. Bu yüzden teknik hesaplamalar ile gerçek döküm arasındaki farkların minimize edilmesi için belirli emniyet katsayılarının yolluk hesaplarına aktarılması gerekmektedir. Dolayısıyla teknik kriterlerin veya hesaplamaların dökümhaneden dökümhaneye farklılık göstermesi muhtemeldir. Yolluk hesapları yapıp model döküme hazır hale getirildikten sonra mutlaka kum kalıba giren sıvı metalin dolum süreleri kontrol edilerek yapılan teknik hesaplar ile karşılaştırılmalıdır.



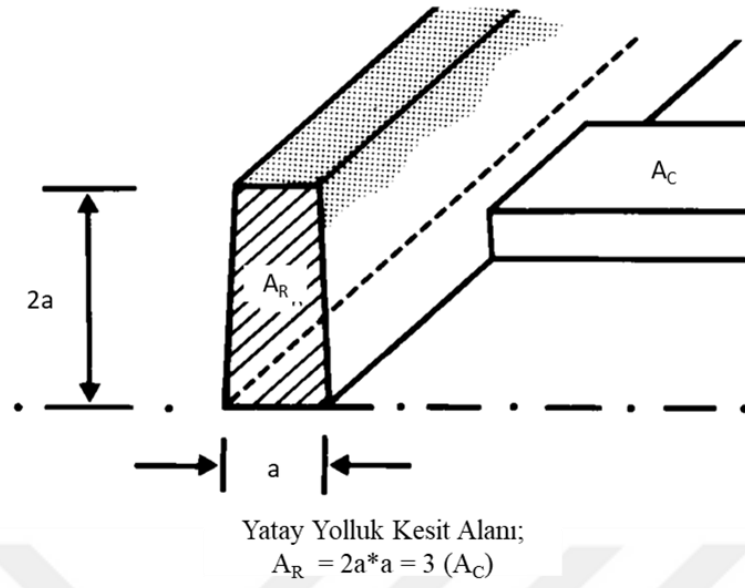
Şekil 20. Toplam dökülen ağırlığa karşılık gelen yolluk girişlerinin kesit alanı grafiği [34].

Seçilen döküm parçasının net ağırlığı 105 kg'dır. Dökümün gerçekleştirildiği firmanın seri üretim şartlarında kalıp verimliliği ortalama % 70 civarında olduğu bilinmektedir. Dolayısıyla seçilen döküm parçasının havşa, besleyici ve yolluklarıyla birlikte toplam ağırlığı 150 kg olarak hesaplanmaktadır. Şekil 20'deki grafik incelendiğinde kum kalıp içerisine girecek olan 150 kg sıvı metale karşılık gelen yolluk girişi kesit alanı 550 mm^2 olduğu görülmektedir. Bu değer şekil 21'de de görüldüğü gibi döküm parçasına temas eden yolluk girişi kesit alanlarının toplamını temsil etmektedir. Grafikten elde edilen değer 1,1 emniyet katsayısı ile çarpılarak parçaya temas eden giriş kesit alanlarının toplamı 600 mm^2 olarak hesaplanmıştır.



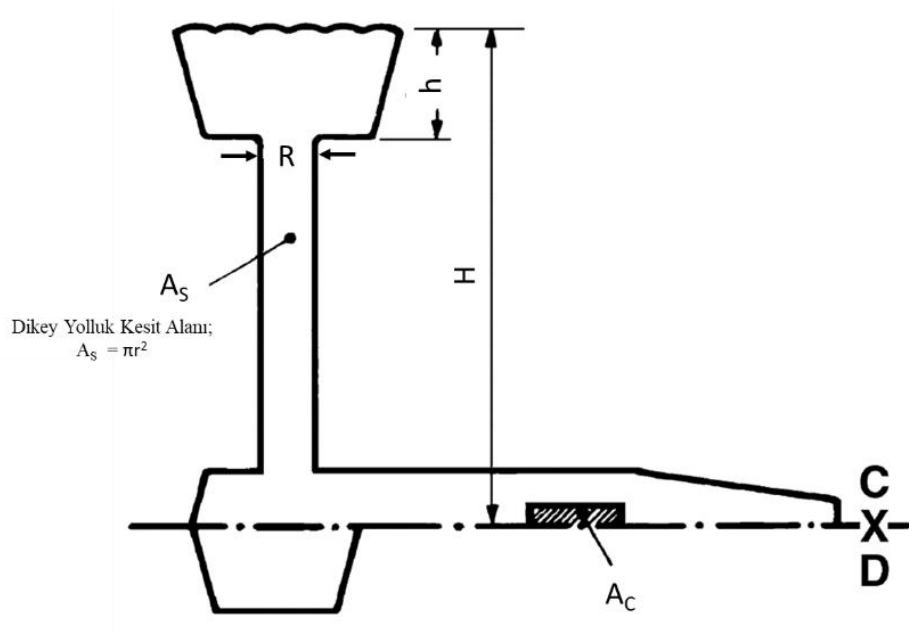
Şekil 21. Deney parçasına temas eden yolluk girişlerinin kesit görüntüsü ve alan hesabı [34].

Seçilen döküm parçasının dökümü esnasında gerek sıvı metalin gerekse parça içerisinde oluşan sıcaklık dağılımının parça üzerine homojen bir şekilde dağılması amaçlanmıştır. Bu nedenle döküm parçasının 3 adet yolluk girişi ile doldurulması planlanmıştır. Dolayısıyla bir adet yolluk giriş alanının 200 mm^2 olması gerekmektedir. Her bir kesit alanı 200 mm^2 olacak şekilde genişliği 40 mm yüksekliği 5 mm hesaplanmıştır. Basıncsız bir döküm için yatay yolluk alanı giriş kesit alanları toplamının 1,2 katı olmalıdır [34]. Dolayısıyla toplam 600 mm^2 giriş kesit alanı için yatay yolluk kesit alanı 720 mm^2 olmalıdır. Şekil 22'de yatay yolluk kesit alanı ve ölçülendirilmesi gösterilmiştir. Şekil 22'de de görüldüğü üzere 720 mm^2 yatay yolluk kesit alanı $2a^2$ 'ye karşılık gelmektedir. Burada a yaklaşık olarak 19 mm olacaktır. Buna karşılık döküm parçasına ait yatay yolluğun genişliği 19 mm yüksekliği ise 38 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 22. Yatay yolluk kesit alanı ve ölçülendirilmesi [34].

Şekil 23'te döküm parçasına ait dikey yolluk ve havşanın şematik görünümü verilmiştir. Burada dikey yolluk çapı 50 mm yüksekliği ise 230 mm'dir. Havşanın en geniş çapı 236 mm yüksekliği ise 120 mm olacak şekilde tasarlanmıştır.



Şekil 23. Deney parçasına ait dikey yolluk ve havşa ölçüleri [34].

Üretim, firmanın seri üretim şartlarında gerçekleştirildiği için dökülen parçaya ait havşa ve dikey yolluk ölçüleri firma standartlarında kullanılan ölçülerdir. Sıcak nokta oluşturma eğilimini azalmak adına yolluk girişlerinin döküm parçasının üst derecede bulunan kısımlarından ve besleyicilere yakın bölgelerinden verilmesi önem arz etmektedir. Sfero dökümlerde kritik tasarım konusu; parça genelinde besleyicilerin ve besleme elemanlarının parçaya uygun tasarlanmasıdır. Besleyici dizaynı, detaylı bilgi ve tecrübeler gerektirmekle birlikte oldukça karmaşık bir konudur. Genel olarak dökümü gerçekleştirilecek bir parça için besleyici tasarımı aşağıdaki kriterler dikkate alınarak yapılmalıdır.

Sıcak nokta kriteri; besleyici dizaynında, parça özelinde besleyici sayısının tespitinde ya da besleyici yerlerinin belirlenmesinde dikkate alınması gereken önemli bir yaklaşımdır. Bu kriterin uygun doğrultuda uygulanması için sıcak noktaların besleyicilerin üzerinde yoğunlaşması yani döküm parçası içerisinde izole olmuş sıcak nokta kalmaması için özen gösterilmelidir [35, 36].

Besleyici dizaynı yapılırken öncelikle döküm kesitleri içerisinde izole olmuş sıcak noktaların tespit edilmesi gerekmektedir. İzole olmuş sıcak nokta, katılma sırasında etrafı katı metal (veya kabuk) ile sarılmış (hiçbir komşu sıvı bölge ile irtibatı olmayan) bir sıvı bölgesi olarak tanımlanabilir. Döküm parçasının farklı kesit kalınlıkları içermesi durumunda döküm içerisinde birden fazla izole olmuş sıcak nokta oluşması muhtemeldir. Bu durumda her bir sıcak noktanın uygulama şartları doğrultusunda soğutucu kullanılarak soğutulması ya da mutlaka besleyici ile beslenmesi gerekmektedir. Tek bir besleyici ile birbirine yakın birden fazla sıcak nokta aynı anda beslenebilir. Model dizaynı yapılırken besleyiciler belirlenen bu sıcak noktalara mümkün olduğunca yakın mesafede yer almalıdır. Bu sayede besleme etkinliğinin en kısa mesafeden gerçekleşmesi sağlanır.

Modül kriteri (katılma zamanı); parça özelinde yeterli beslemenin yapılabilmesi için en önemli konulardan biri katılmanın besleyicilere doğru yönlendirilmesidir. Bu tür katılma zamanı, katılma olarak da adlandırılabilir. Bu tür uygulama doğrultusunda besleyiciler; kalıp içerisinde oluşan sıcak noktalarla ya aynı zamanda ya da daha geç katılması gerekmektedir. Bu durum Chvorinov [37] yaklaşımı ile yani kesitin katılma zamanı o kesitin hacminin yüzey alanına oranıyla bulunur. Bu yaklaşım Denklem 2'de verilmektedir.

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

Denklem (2) incelendiğinde t ; katılaşma süresi, k ; döküme sistemine göre değişkenlik gösteren eşitlik sabiti, V ; hacim, A ; kesit alanıdır. Bu denklem mühendisler tarafından sıkça kullanılmakta ve katılaşma zaman hesabı olarak bilinmektedir. Kalıp içerisinde ergimiş metal ile besleyicinin olduğu ve aynı kalıp içerisinde birlikte soğudukları dikkate alınırsa alındığında, yönlendirilmiş katılaşma koşulu Denklem (3)'teki gibi değerlendirilir.

$$(V/A)_{\text{besleyici}} \geq (V/A)_{\text{döküm}} \quad (3)$$

Denklem (3) incelendiğinde besleyicinin katılaşma süresi kritik kesit alınandaki katılaşma süresinden büyük olmalıdır. Bu eşitlik çoğunlukla sfero dökümlerde Denklem (4)'teki gibi değerlendirilir.

$$M_b = kM_d \quad (4)$$

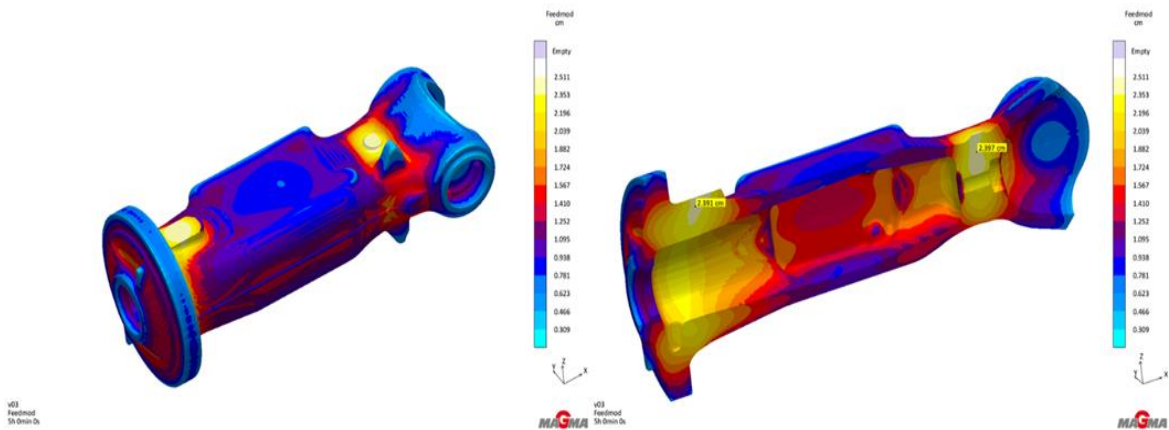
Denklem (4) incelendiğinde M_b ; besleyicinin modülü, M_d ; döküm parçasına ait kritik kesitin modülü ve k ; emniyet katsayısını ifade etmektedir. Bu katsayı genellikle sfero dökme demirlerde 1,2 alınır.

Besleme yolu kriteri; döküm parçasında tespit edilen kritik kesit ile kullanılan besleyici arasında bir besleme yolu bulunması istenmektedir [38]. Katılaşma sırasında besleme yolu kapandığı takdirde besleyiciler etkinliğini kaybeder. Bu yol uygun şartlarda

dizayn edildiğinde besleyiciden kritik kesit bölgesine devam eden bir metal akışı gerçekleştirilmiş olur.

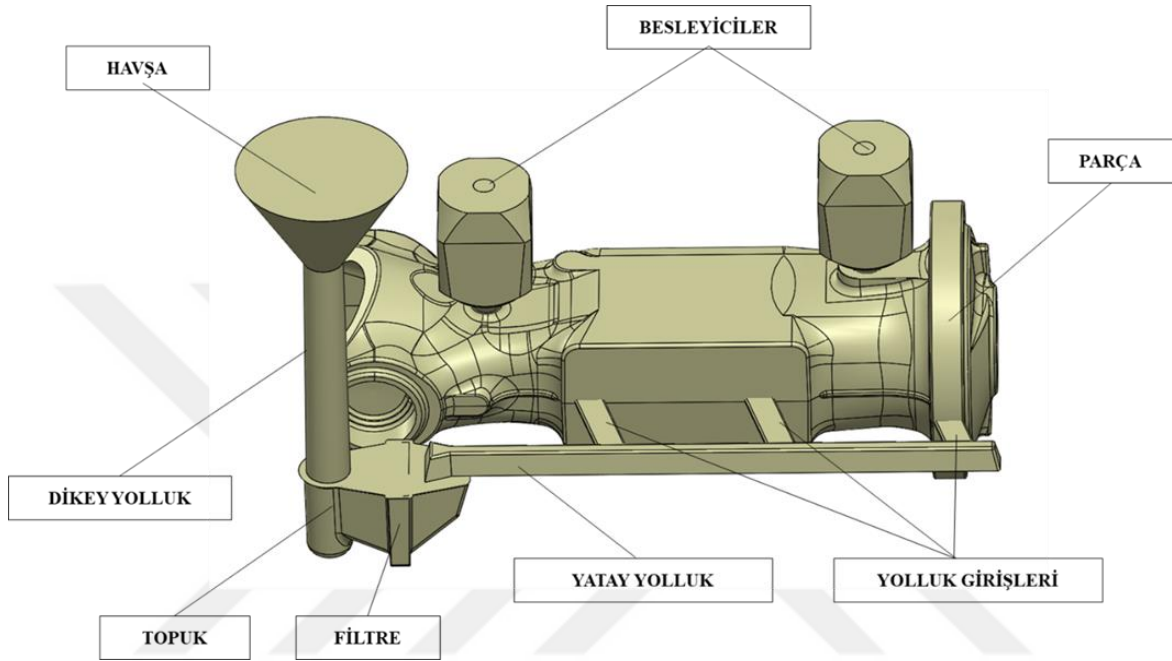
Döküm parçalarında çekinti problemi ile karşılaşmamak için yukarıda belirtilen kriterler dikkate alınarak besleyici dizayn edilmelidir. Dizayn edilmek istenen parça ilk olarak kaç adet besleyiciye gerek duyacağı tespit edilip parça kesitleri incelenmelidir. Birbirinden bağımsız parça kesitleri her biri kendi alanında sıcak bölge oluşturacağından ayrı ayrı dikkate alınmalıdır. Besleyicilerin parçaya uygun boyutlandırılarak elde edilen modül değeri uygun değerde tutulmalıdır. Tüm bu değerler ışığında yönelmiş bir katılaşma gerçekleştirilerek standartlara uygun parçalar üretilebilir.

Test parçasına ait besleyici dizaynında Magmasoft simülasyon programından yararlanılmıştır. Öncelikle test parçası Solidworks programında 3D baskı dosyası formatına (Stl) dönüştürülerek Magmasoft programına aktarılmış ve parça katılaştırılmaya bırakılmıştır. Şekil 24'te test parçasına ait katılaşma görüntüsü ve test parçasının kritik kesitlerinin Magmasoft programında hesaplanan modül değerleri görülmektedir. Burada kritik kesitlerdeki modülün yaklaşık 2,4 cm olduğu görülmektedir. Kritik bölgelerdeki modül değeri 1,2 emniyet katsayısı ile çarpılacak olursa yaklaşık 2,9 cm değeri bulunur. Hesaplanan modül değerleri göz önüne alınarak belirtilen kritik kesitlere modül değerlerini karşılayacak şekilde besleyici yerleştirilerek model dizaynı hazır hale getirilmiştir. Dizaynda Foseco firmasına ait VACK 420L/30 tip besleyici kullanılmıştır. Bu besleyici 3,1 cm modül ve 0,420 dm³ hacim değerine sahiptir.



Şekil 24. Deney parçasının Magmasoft programındaki katılaşma görüntüsü ve kritik kesitlerindeki modül değerleri

Test parçası olarak seçilen değişken kesit kalınlıklarına sahip bir aks yuvası parçasının yolluk ve besleyici dizaynı Şekil 25’te gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere model dizaynı deney parçası, besleyiciler, yatay-dikey yolluk, yolluk girişleri, topuk, filtre ve havşa gibi elemanlardan oluşmaktadır.

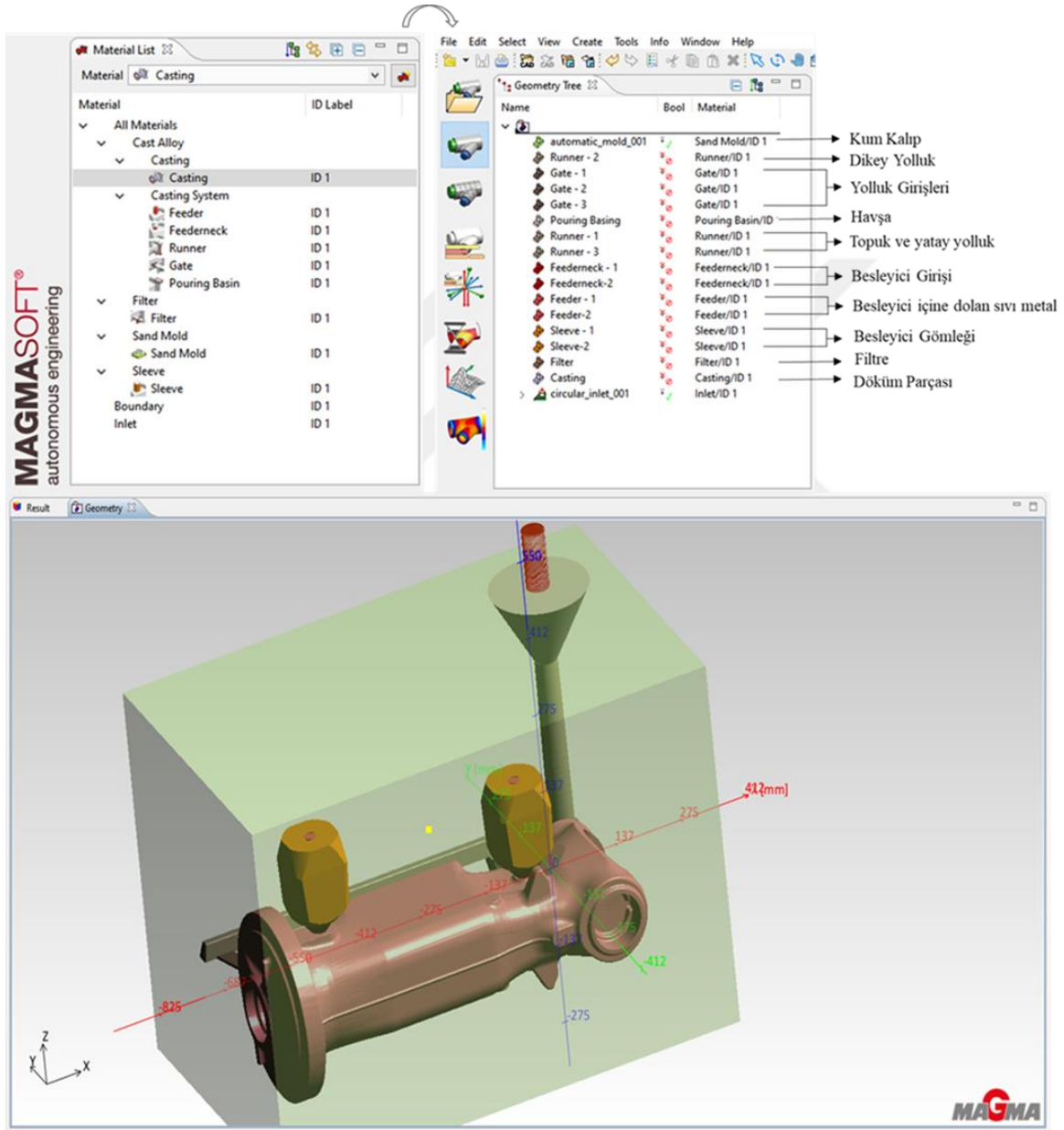


Şekil 25. Deney parçasının yolluk ve besleyici dizaynının şematik gösterimi

2.3. Numune Olarak Seçilen Döküm Parçasının Simülasyon Çalışmaları

Döküm simülasyon uygulamaları ile üretim sürecinin geliştirilmesi ve numune dökümü gerçekleştirilme maliyetleri olmadan uluslararası standartlar uygun döküm parçaları elde edilmektedir. Günümüzde bu programlar sayesinde, döküm parçaları hakkında hazırlık, uygulama ve üretim alanlarında son derece önemli bilgiler alınarak parçalara uygun dizaynlar yapılmaktadır. Simülasyon çalışmaları ile herhangi bir alaşımın çeşitli kalıplara dökümü ve döküm sonrası sıvı metalde gerçekleşen soğuma-katılaşma aşamaları sayısal olarak hesaplanır. Bu sayede, tasarım ve analizler bilgisayar ortamında yapılarak hatalı model-kalıp hazırlama ve gereksiz maliyetler ortadan kaldırılarak tek seferde sağlam parça imalatı mümkün hale gelmiştir. Rekabet ortamının yoğun olduğu dökümhanelerde ekonomik ve kaliteli parça üretme konusunda kolaylıklar sağlaması bu uygulamaların tercih

edilmesindeki en önemli etkenler arasında yer alır. Özellikle talep edilen parça adetlerinin yüksek olduğu otomotiv endüstrisinde de bu yazılımlar başarının anahtarı haline gelmiştir. Bu çalışmada 3D katı model programı olan Solidworks ile uyumlu çalışan Magmasoft döküm simülasyon programı kullanılmıştır.

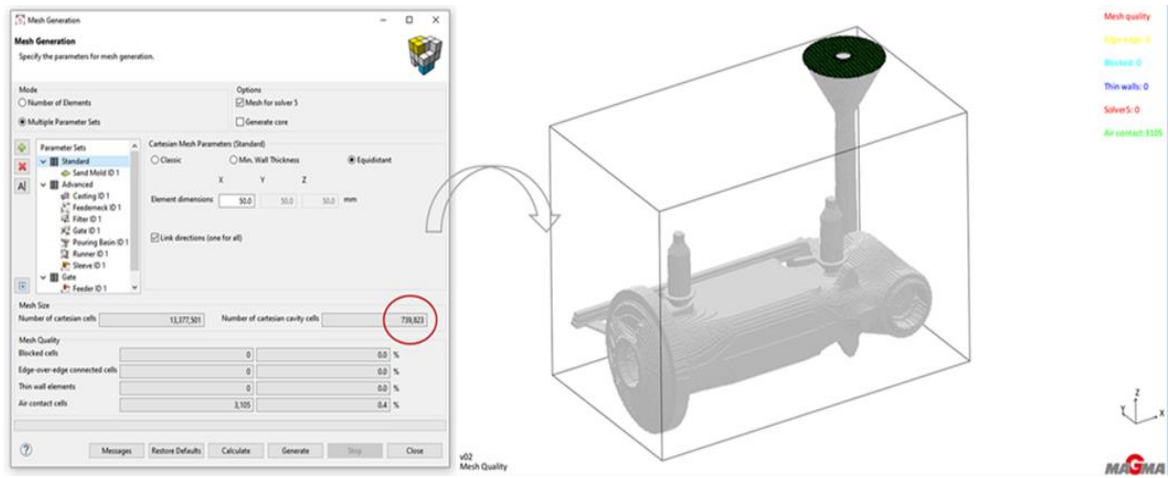


Şekil 26. Stl formatına dönüştürülen her bir döküm elemanının Magmasoft programına tanıtılması

Teze konu olan parçanın Solidworks programında katı model ve kalıp tasarımı oluşturulduktan sonra her bir parça (döküm parçası, yolluklar, besleyiciler vb.) Stl formatına

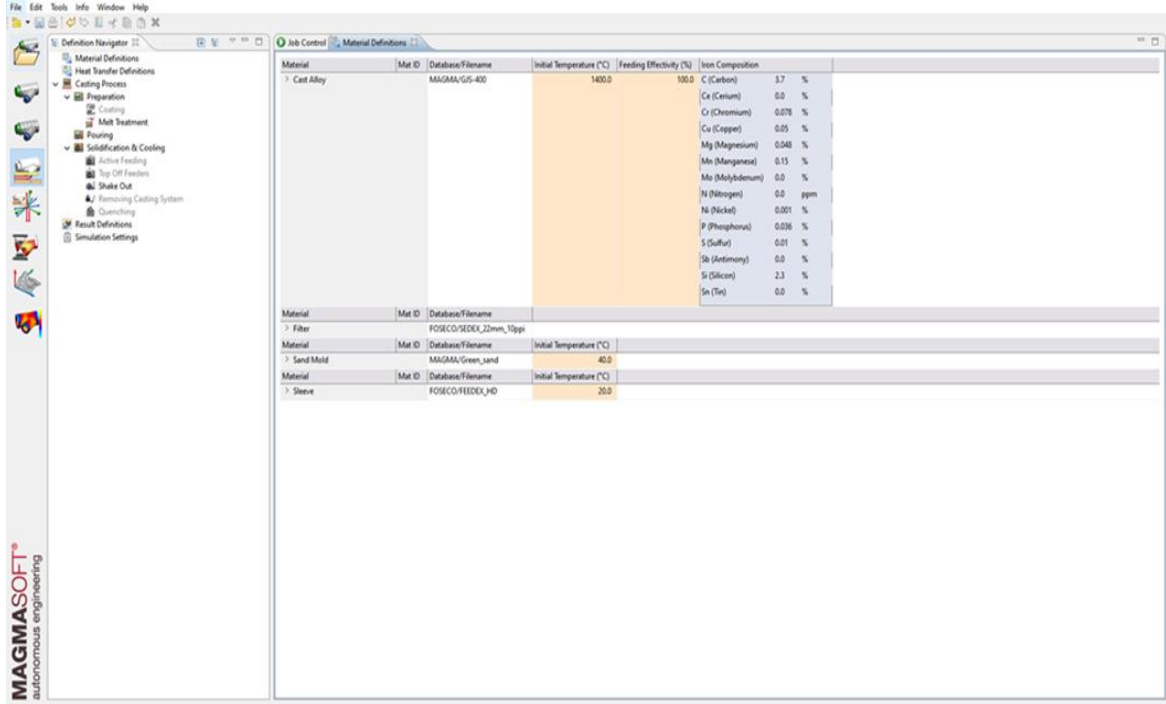
dönüştürülerek Magmasoft döküm simülasyon programına aktarıldı. Magmasoft programına aktarılan her bir parça Şekil 26’da görüldüğü üzere programın veri tabanında sahip olduğu bilgilere tanıtıldı.

Geometri aktarımı tamamlandıktan ve her bir parça programa tanıtıldıktan sonra nihai parça sonlu elemanlar yöntemine göre en küçük hücrelere (Mesh) bölündü. Döküm parçası üretiminin gerçekleştirileceği kalıp derece boyutları programa girilerek parça ve yüzeyinde bulunan kalıpla birlikte tanelere ayrıldı. Şekil 27’de kırmızı çembere alınan bölümde görüldüğü üzere nihai kalıp tasarımı yaklaşık 748 bin hücreye bölünmüş oldu.



Şekil 27. Deney parçası ve diğer yardımcı elemanların sonlu elemanlar yöntemine göre en küçük hücrelere bölünmesi

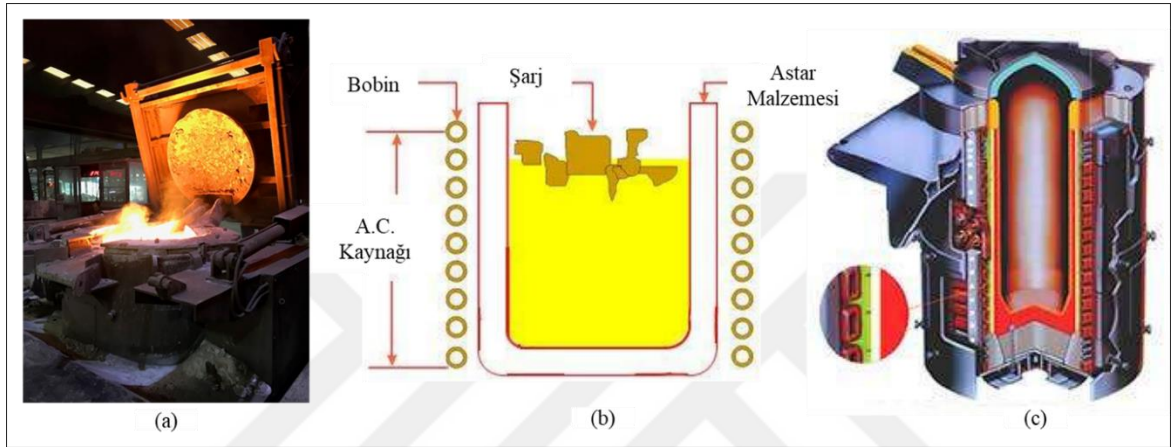
Bu aşamadan sonra Şekil 28’de görülen metal alaşım, kalıp ve kullanılan diğer parametrelere yönelik özelliklerin tanımlanması yapıldı. Magmasoft veri tabanında farklı alaşım özellikleri standart olarak yüklü olmasına rağmen istenildiği durumda manuel olarak da değiştirilebilmektedir. Metal alaşımının termofiziksel değerleri simülasyon programındaki veri tabanında yer alan kayıtlı veriler kullanılarak değil manuel girilerek programa tanıtılmıştır. Bu aşamadan sonra MagmaSoft programına ait malzeme veri tabanına Tablo 9’da verilen son metal kimyasal analiz değerleri girilerek malzeme tanıtıldı.



Şekil 28. Deney parçası döküm alaşımı, kalıp malzemesi ve termofiziksel özelliklerinin Magmasoft simülasyon programına tanıtılması

Test parçası ve alaşıma ait tanımlamalar tamamlandıktan sonra simülasyon programının; firma bünyesinde program kurulum aşamasında yapılan, kalibrasyon değerleri programa girildi. Modelleme çalışması parçaya girilen kimyasal ve termal değerler ışığında gerçek döküm ve dolum sürelerine göre iki farklı şekilde analiz edildi. Birinci analizde kullanılan parçanın kalıp bozma (Shake Out) süresi 80 dk seçilerek parçanın yeterli soğuma koşullarında olmadığı bir durum iken ikinci analizde parçanın kalıp bozma süresi 240 dk ile normal bir soğuma parametresi seçildi (Şekil 29). Böylelikle iki farklı durumda parçaların mekanik özelliklerinde nasıl bir değişim olduğu gözlemlendi.

kimyasal kompozisyon değerleri ve aşılama yöntemi son derece önemlidir. Bu parametrelerin hepsi mekanik özelliklere direkt etki edecektir. Maden ergitme işlemi Şekil 30'da görülen 4000 Kw Inductotherm marka 6 tonluk ergitme kapasitesine sahip indüksiyon ocağında; düşük kükürtlü pik demir (sfero piki), çelik hurda, silisyum karbür kullanarak hazırlanan sıvı metale FeSiMg ferro alaşımıyla kapaklı bir potada sandviç yöntemiyle Mg ilavesi uygulanarak elde edilmiştir.



Şekil 30. (a) Ergitme işleminin gerçekleştirildiği indüksiyon ocağı, (b) İndüksiyon ocağının şematik görüntüsü, (c) İndüksiyon ocağı kesit görüntüsü [38].

2.4.1.1. Ergitme İşleminde Kullanılan Hammaddeler ve Kompozisyonları

Bu işlemde kullanılan şarj malzemeleri dkp (Sıvı halde bulunan çeliğin, sürekli döküm yöntemleri ile soğutma işleminin ardından katılaştırılması sonucu meydana getirilen rulo halinde ya da dikdörtgen kesitli yassı metaller) [39] çelik, sfero piki ve döngü malzemesidir (çevrim sonucunda elde edilen yolluk, çıkıcı veya hatalı döküm parçaları). Bu malzemelerin şarj malzemesi olarak hazırlanan ergimiş metalde kullanım oranları işletme şartları altında dkp çelik % 30, sfero piki % 40, döngü malzemesi % 30 olacak şekilde belirlenmiştir. Ergitme işleminde kullanılan çelik hurdanın kimyasal analizi Tablo 5'te, pikin analizi ise Tablo 6'da gösterilmiştir.

Tablo 5. Kullanılan çelik hurdanın kimyasal analizi

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	W	Sn	Pb
Yüzde (%)	0,005	0,001	0,109	0,011	0,013	0,026	0,031	0,010	0,042	0,058	0,001	0,003	0,015	0,003	0,007

Tablo 6. Kullanılan pikin kimyasal analizi

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Al	Ti	V	W	Sn	Pb
Yüzde (%)	4,63	0,64	0,077	0,059	0,021	0,022	0,001	0,001	0,043	0,002	0,012	0,005	0,005	0,001	0,003

2.4.1.2. Karbon Verici Kullanımı

Karbon verici kullanımının, ergitme işlemi aşamasında hazırlanan şarjla birlikte ergitilmiş metaldeki çekirdeklenme özelliklerinin kazandırılmasında büyük etkisi vardır. Bu işlemde amaç karbon yüzdesini doğru ayarlamak ve yapı içerisinde grafit oluşumu sağlamaktır. Ergitme işleminde kullanılan 6 tonluk indüksiyon ocağı ve kimyasal kompozisyon oranları dikkate alındığında ocak başına yaklaşık olarak 45-55 kg arası bir karbon verici kullanılmıştır. Bu değer ergitilen sıvı metalin % 1'ine karşılık gelmektedir. Burada karbonun tamamının sıvı metale karışması için ergitme işlemi başlangıcında ocak tabanına yüklenen katı şarjla malzemesi ile birlikte ocağa yüklenmesidir. Karbon verici olarak yüksek kaliteli ve düşük kükürtlü karbon kullanılmıştır.

2.4.1.3. Ocak Metali Kimyasal Analizi

Elementlerin bulunma oranları kimyasal kompozisyona yani doğrudan malzemenin mekanik değerlerine etki eder. Çalışmaya konu olan parçada istenilen mekanik değerlerinin sağlanabilmesi için C, Mn, S, Si, ve Mn en önemli elementler arasında yer alır. Malzemeye ait % ferrit oranını etkilemesi açısından kimyasal kompozisyonda kullanılan perlit yapıcı element oranlarının bilinmesi son derece önemlidir.

Kimyasal kompozisyonda kullanılan yüksek kaliteli sfero piki sayesinde S, Mn, P ve Ti değerleri uygun aralıkta yer alır. Düşük kükürt değerine sayesinde kullanılan magnezyum miktarı düşecek aynı zamanda etkisi de artacaktır. İşletmede belirlenen proses şartlarında

ocakta ergitilen sıvı metal döküme girmeden önce kimyasal analiz değerlerinin saptanabilmesi için spektral analize tabi tutulur.

Yapılan dökümlerde GGG 40 alaşımları, Hekimoğlu Döküm Sanayi A.Ş.'de seri döküm şartlarında hazırlanan şarjlar kullanılmıştır. Dökülen malzemelerin kimyasal analizleri spektral analiz cihazı ile tespit edilmiştir. Tablo 7'de Hekimoğlu Döküm Sanayi A.Ş.'ye ait şarj verileri ve spektral analiz sonucunda ölçüler değerler verilmektedir.

Tablo 7. Deney parçasının ocak metali kimyasal analiz değerleri

Şarj No	Eş-C	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg	% Cu	% Al	% Ni	% Cr	% Mo	% Ti
060522/S8	4,3	3,75	1,53	0,16	0,038	0,012	0,002	0,053	0,003	0,001	0,087	0,001	0,014

2.4.1.4. Ocak Metali Sıcaklık Değeri

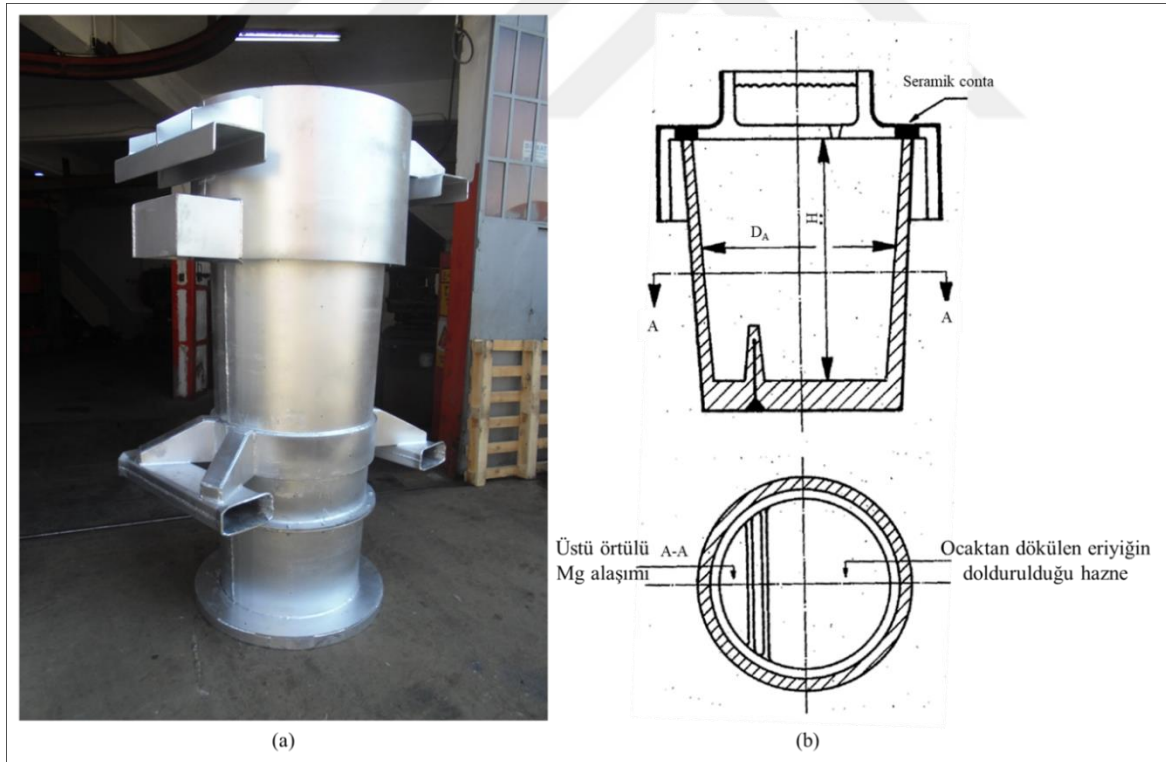
Ocak metali sıcaklık değeri; dökülecek parçanın uygulama şartlarınca belirlenen sıcaklık değerinden döküm robotu potasının sıcaklık durumuna göre min. 60 °C üzerine kadar çıkartılır. Bunun nedeni yapıyı küreselleştirme ve transfer işlemlerinde sıvı metalde soğuma gerçekleşiyor almasıdır. Ergimiş metal sıcaklığı çekirdeklenme özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerden birisidir. Çalışmaya konu olan döküm parçası için işletme şartları altında en düşük sıcaklık değeri 1400–1420 °C olarak belirlenmiştir. Bu sıcaklık değerlerinin üzerine çıkılması malzemenin metalürjik özelliklerinde dezavantajlara sebep olmaktadır. Bu nedenden dolayı ocaktaki sıvı metal 1470-1480 °C'lere kadar çıkartılmıştır.

2.4.2. Sfero Reaksiyon İşlemi

Sfero reaksiyonu işlemi malzemenin kalitesini ve döküm işleminin uygulanabilirliğini tayin eden etkenlerin başında yer almaktadır. Sfero reaksiyon işlemindeki alt işlem aşamalarını reaksiyon potası, kullanılacak örtü malzemesinin cinsi ve kalitesi, magnezyum, döküm potasına transferi, döküm potasına transfer sırasında aşılama yöntemi olmak üzere beş tür başlık altında açıklayabiliriz.

2.4.2.1. Reaksiyon Potası

Çalışmaya konu olan parçanın döküm öncesi sıvı metal transferi tandish tip diye adlandırılan reaksiyon potası ile gerçekleştirilmiştir. Tandish tip reaksiyon potasının şematik ve kesit görünüşü Şekil 31’de görülmektedir. Kullanılan bu reaksiyon potalarında astarlama işlemi; sıvı metal aktarım işleminin kalite ve uygulanışında önemli bir yer tutmaktadır. Reaksiyon potasında yeni bir astarlama işlemi yapılması durumunda; kullanılan astar malzemesinin yapısına ve kalitesine göre ön ısıtma yapılarak nem içermediğinden emin olunmalıdır. Bu tür potalarda, pota astarının ön ısıtma işlemine maruz kalması şarttır. Pota astar sıcaklığını korunabilmesi için her reaksiyon işlemi sonunda pota kapağı kapatılmalıdır. Her Reaksiyon işlem tekrarlarında potasının üst çap bölgesinde bulunan cep bölgesinde oluşacak cüruf temizlenmelidir. İşlem sonrası pota dibinde metal bırakılmamalı ve kullanılan ölçüm ve kalibrasyon aletleri sürekli kontrol edilmelidir.



Şekil 31. (a) Tandish tip reaksiyon potası, (b) Tandish tip reaksiyon potasının kesit görüntüsü [34].

2.4.2.2. Örtü Malzemesinin Türü ve Kalitesi

Bu malzemenin kullanılışındaki ana amaç magnezyumun potaya aktarılan sıvı metal ile magnezyum arasındaki teması olabildiğince geciktirmeye çalışmaktır. Magnezyumun buhar basıncının yüksek, buharlaşma sıcaklığı düşük olmasından dolayı bu reaksiyonun gerçekleşmesi için örtü malzemesi büyük önem arz etmektedir. Üretimin gerçekleştirildiği işletmede örtü malzemesi olarak işleme talaşı kullanılmaktadır.

2.4.2.3. Magnezyum Miktarı

Üretimin gerçekleştirildiği işletme şartlarında kullanılan yüksek kaliteli katı şarj malzemeleri nedeni ile kullanılacak Mg miktarı azalmaktadır. Sfero dökümünde küreselleştirme işlemi için kullanılan magnezyum miktarı, belirtilen şartlar doğrultusunda; çalışmaya konu olan parça üretiminde yaklaşık olarak % 1,2-1,3 civarında bulunmaktadır.

2.4.2.4. Ergitilmiş Metalin Döküm Potasına Transferi

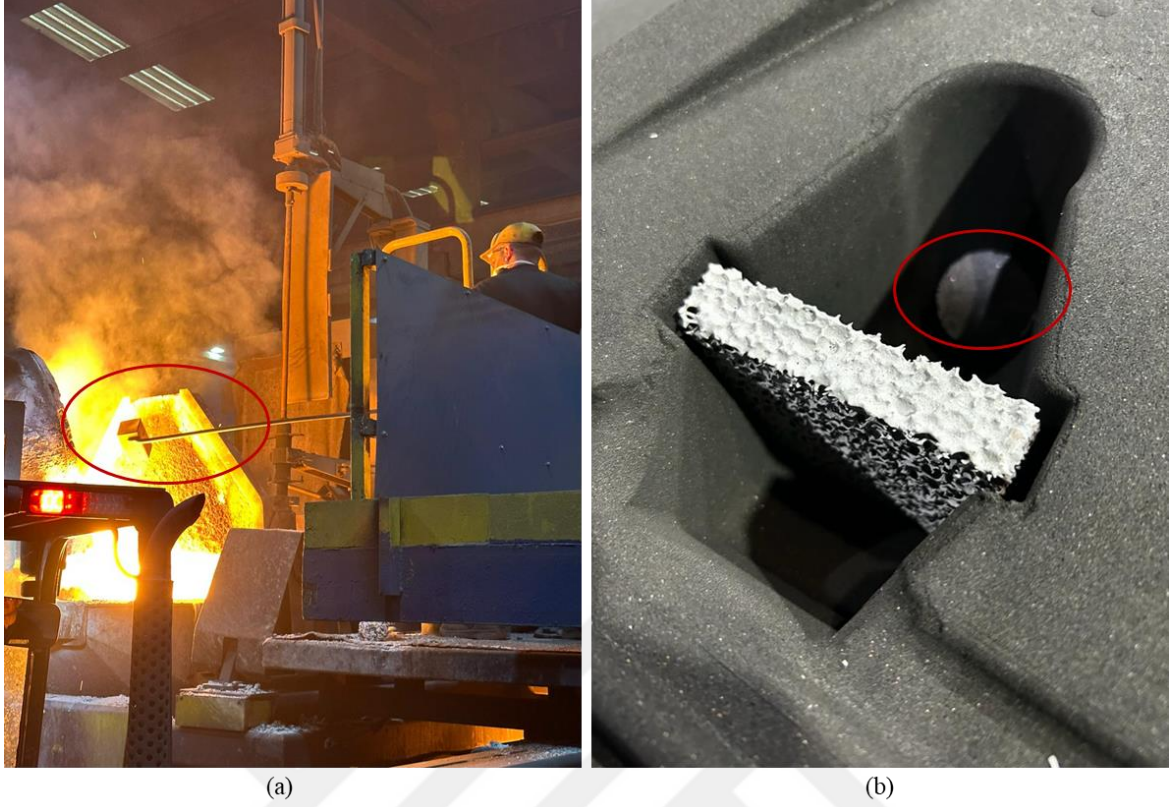
Ergimiş metalde reaksiyon işlemi başlatıldıktan sonra metalin uygun zamanda döküm işleminin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Zaman kaybına olanak vermeden reaksiyon tamamlandıktan sonra pota kapağı açılmalı; işletme şartlarına ve döküm parçasına uygun aşılama yöntemi belirlenerek reaksiyon potasındaki ergimiş metal döküm potasına aktarılmalıdır. Bu transfer işlemi esnasında dökümhanede oluşabilecek teknik duruşlara neden olacak problemler oluşması durumunda sıvı metal mutlaka ocağa geri alınmalıdır. Ayrıca uygun oluşumların gerçekleştirilebilmesi adına işletme şartlarıncı belirlenen döküm sürelerine uyulmalıdır. Deney aşamalarındaki aşamaların kontrolü son dökülen kalıptan alınan küreselleşme numunesi ile yapılmıştır. Şekil 32’de çalışmaya konu olan parçaya ait ergitilmiş metalin döküm öncesi tandish tip pota yardımı ile küreselleştirme işlemi tamamlandıktan sonra döküm robotuna aktarılma görüntüleri görülmektedir.



Şekil 32. Küreselleştirme işlemi tamamlanan sıvı metalin döküm robotuna aktarılması

2.4.2.5. Aşılama İşlemi

Metalin aşılama işlemi reaksiyon potasından döküm potasına alınma sırasında gerçekleştirilir. Uygun mekanik değerlerin elde edilebilmesi için aşılama olmazsa olmaz parametreler arasında yer almaktadır. Çalışmaya konu olan parça için uygun mekanik özelliklerin sağlanabilmesini adına hem kalıp içi hem de akan metale aşılama işlemi yapılmıştır. Bu doğrultuda ergimiş metale % 0,2 oranında pota aşılması ve buna ilave olarak % 0,1 kalıp içi aşılması yapılmıştır. Şekil 33’de deney parçalarına ait aşılama yöntemlerinin görselleri verilmiştir.



Şekil 33. (a) Akan metale verilen aşılama, (b) Kalıp içi aşılama

2.4.3. Döküm İşlemi

Döküm işlemi son metal sıcaklığı, son metal kimyasal kompozisyonları, döküm süresi olarak üç alt başlıkta incelenebilir.

2.4.3.1. Son Metal Sıcaklık Değeri

Son metal sıcaklık değeri ocak metali, reaksiyon potası ve döküm potası astar sıcaklıklarına bağlı olarak farklılık göstermektedir. Uygun şartlar sağlanması durumunda parçanın kesit kalınlıkları da dikkate alınarak döküm robotuna aktarılan sıvı metalin son sıcaklık değeri 1390–1410 °C derece olacak şekilde ölçülmüştür.

2.4.3.2. Son Metal Kimyasal Analizi

Çalışmaya konu olan döküm parçasının döküm öncesi kimyasal analiz değerleri Tablo 8’de gösterilmiştir. Döküm işlemi esnasında alınan numunelerin kimyasal analiz değerleri spektrometre yardımıyla tespit edilmiştir. Çalışmaya konu olan döküm parçasında kullanılan sıvı metale ait karbon eşdeğeri Denklem (5)’deki eşitlik kullanılarak 4,47 olarak hesaplanmıştır.

$$CE = \%C + (\%Si + \%P)/3 \quad (5)$$

Tablo 8. Deney parçasının son metal kimyasal analiz değeri

Şarj No	Eş-C	% C	% Si	% Mn	% P	% S	% Mg	% Cu	% Al	% Ni	% Cr	% Mo	% Ti
060522/S8	4,47	3,70	2,30	0,15	0,036	0,010	0,048	0,050	0,003	0,001	0,078	0,001	0,014

2.4.3.3. Döküm Süresi

Fiziksel şartlar göz önüne alındığında sfero dökümlerde dolum süresi önemli bir etkindir. Çalışmaya konu olan döküm parçasının malzeme özelliklerinin sağlanabilmesi için reaksiyon işleminin bitmesiyle birlikte başlatılan bu süre, kalıbın tamamen dolmasıyla birlikte bitmektedir. Bu süre üretimin gerçekleştirildiği işletme içi şartlar göz önüne alındığında yaklaşık 8,5-9,5 kg/sn dolum hızı ile kalıba aktarılmıştır.

2.4.4. Kalıplama ve Döküm Sonrası Kalıp Bozma Süreleri

Test parçasına ait kalıp kum hazırlama işlemi 150 ton/saat kapasiteli Künkel Wagner marka kum mikseri ile gerçekleştirilmiştir. Kum mikserinin şematik görüntüsü Şekil 34’te gösterilmektedir.



Şekil 34. Kunkel Wagner marka kum mikserinin şematik görünümü

Kalıp kumunda döküm işlemi gerçekleştirildikten sonra genişlemeye bağlı olarak döküm parçasında oluşabilecek küçük boyutlardaki çekinti oluşumunu önleyecek seviyede uygun kalıp sertliği kullanılmıştır. Kalıp kumuna ait teknik özellikleri Tablo 9’da verilmiştir.

Tablo 9. Kalıp kumu mekanik özellikleri değer aralığı

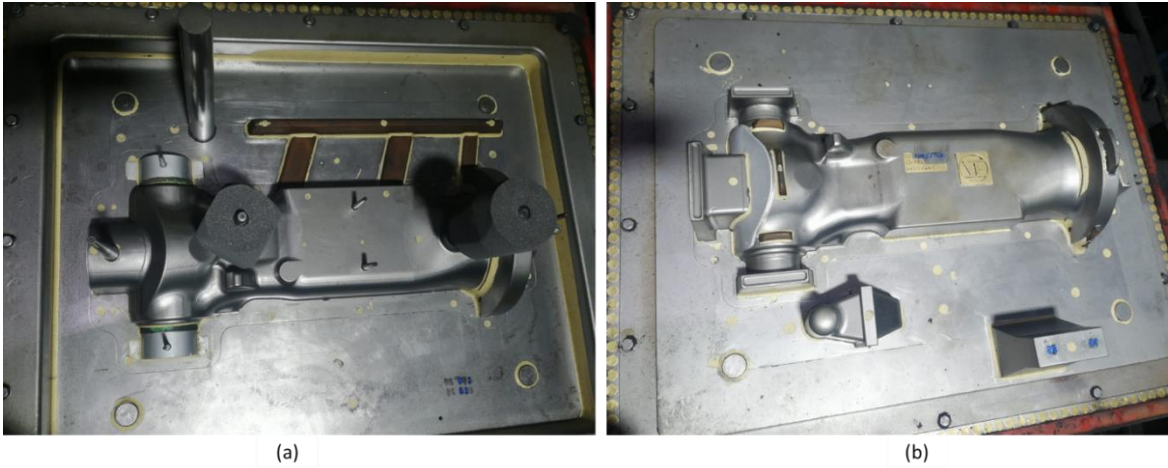
Kalıp Kumu Kontrol Testleri	Sıcaklık (°C)	Nem (%)	Yaş Basma Mukavemeti (N/cm ²)	Yaş Çekme Mukavemeti (N/cm ²)	Çapraz Kesme Mukavemeti (N/cm ²)	Islak Çekme Mukavemeti (N/cm ²)
	min 20 – max 50	3 - 4,5	min 17 – max 25	min 3,5 – max 5	min 5,5 – max 7	min 0,22 – max 0,35
Kalıp Kumu Kontrol Testleri	Sıkıştırılabilirlik (%)	Gaz Geçirgenliği	Toplam Kil (%)	Yanma Kaybı (%)	Aktif Kil (%)	Uçucu Madde (%)
	min 35 – max 43	min 90	11 - 13	3,5 – 5,5	7 - 10	2-3

Test parçasının model plaka yerleşimi firma bünyesine ait 1200x950x350 plaka ölçüleri kapsamında 1 figürlü ve 3 maçalı olarak tasarlanmıştır. Maçaların üretimi 60 litre şutlama kapasitesine sahip Protek 60 markalı maça makinasında gerçekleştirilmiştir. Test parçasına ait maçaların görünümü Şekil 35’te gösterilmektedir.



Şekil 35. Deney parçasına ait maçaların kalıp içindeki görüntüsü

Test parçasına ait model plaka yerleşimi görünümü Şekil 36’da gösterilmektedir.



Şekil 36. Deney parçasına ait model plaka yerleşimi

Kalıplamada literatür ve simülasyon sonuçları doğrultusunda yapılan hazırlıklara yönelik çekintiyi önlemek için hesaplanan modüllerde 2 adet VCK 420L/30 tip besleyici ve 1 adet 100x100x20 boyutlarında köpük filtre kullanılmaktadır. Test parçalarına ait kalıplama görüntüleri Şekil 37’de gösterilmektedir.



Şekil 37. Deney parçasına ait kalıplama görüntüleri

Bu çalışmada test parçaları, seri üretim şartlarında; Heinrich Wagner Sinto (HWS) firması tarafından üretilen yatay kalıplama hattında iki farklı üretim süreciyle dökümü gerçekleştirilerek hazırlanmıştır. Üretimler elde edilen 800-1000 kg arasında sıvı metal ile döküm sıcaklığı 1390-1410 °C ve kalıp/pota oranı 8 olacak şekilde sekizer kalıp seri üretim şartlarında gerçekleşmiştir. Birinci üretim sürecinde dökümü gerçekleştirilen parçalar; 80 dk kum kalıpta bekledikten sonra kalıp bozmaya gönderilmiştir. İkinci üretim sürecinde ise dökümü gerçekleştirilen parçalar; 240 dk kum kalıpta bekledikten sonra kalıp bozmaya gönderilmiştir. Kalıp bozma sonrası döküm parçaları 8 türbinli 15 ton/saat kapasiteli askılı kumlama makinesine girerek yüzey üzerindeki kumlardan arındırılmıştır. Kumlama sonrasında parçalar yolluk ve besleyicilerinden ayrılıp taşlama işlemleriyle yüzeyleri temizlenerek karakteristik incelemelere hazır hale getirilmiştir.

2.4.5. Kalıp Bozma ve Uygulanan Yumuşatma Tavlaması

Üretimi gerçekleştirilen ve 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan test parçalarının ısıtılma işlemi; Hekimoğlu Döküm A.Ş. firmasında bulunan Şekil 38’de şematik görünümü verilmiş olan ısıtılma işlem fırını ile gerçekleştirilmiştir.

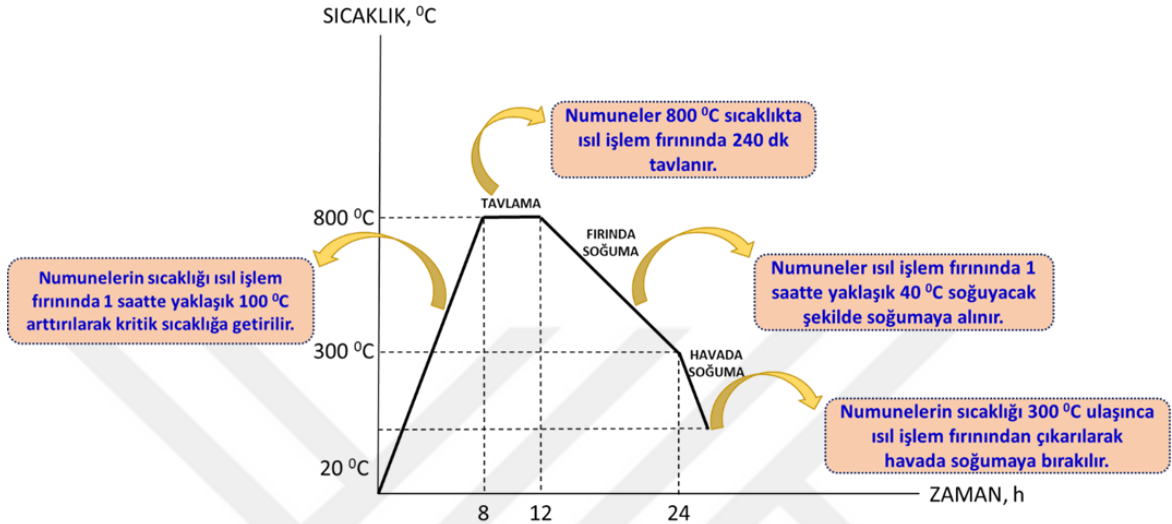


Şekil 38. Deney parçalarının tavlama ısıtılma işlemine tabii tutulduğu fırının görüntüsü

Test parçası olarak seçilen farklı kesit kalınlıklara sahip döküm 100 kg ve üzeri döküm parçaları için katılaşma sonrası 80 dk sonunda kalıp bozma işlemi yeterli kriterlere sahip değildir. Dolayısıyla bu süre döküm parçalarında yapısal, mekanik ve fiziksel bozukluklara yol açabilmektedir. Belirtilen süre içinde kalıp bozma işlemine tabii tutulan test parçalarında istenilen yapısal, mekanik ve fiziksel özellikleri elde etmek, plastik şekil vermeyi ya da talaşlı imalat işlem aşamalarını kolaylaştırmak için; döküm parçalarının belirli sıcaklıklara kadar ısıtılıp bu sıcaklıklarda bekletildikten sonradan yavaşça soğutulması gerekmektedir. Bu işlem literatürde yumuşatma tavlaması olarak bilinir. Burada belirli sıcaklıklara kadar ısıtılıp çıkarılması istenen değer parçanın kesit kalınlıklarına göre farklılık göstermektedir.

80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan döküm parçaları ısıtılma işlem fırınında 1 saate 115 °C arttırılacak şekilde 920 °C sıcaklığa kadar çıkarılıp daha sonra yaklaşık 0,5 saat mevcut sıcaklıkta bekletilmiştir. Parçalar mevcut sıcaklıktan fırında içerisinde 1 saate 35 – 40 °C düşecek şekilde soğumaya bırakılıp 300 °C’ye indirilmiştir. Yumuşatma

tavlama işlemi tamamlandıktan sonra numuneler fırından çıkarılarak havada soğumaya bırakılmıştır. Numunelere uygulanan ısıtma işleminin sıcaklık zaman grafiği Şekil 39’da gösterilmiştir.



Şekil 39. Deney parçalarına uygulanan ısıtma işleminin sıcaklık-zaman grafiği.

2.4.6. Numunelerin Elde Edilmesi

Bu çalışma kapsamında deneysel çalışmalarda deney test parçası malzemesi GGG 40 dökme demirdir. Kullanılan malzemeye ait TS EN 1563:2018 standartları Tablo 4’te gösterilmektedir. Numuneler bu standartlardaki belirlenen değerler dikkate alınarak incelenip değerlendirilmiştir.

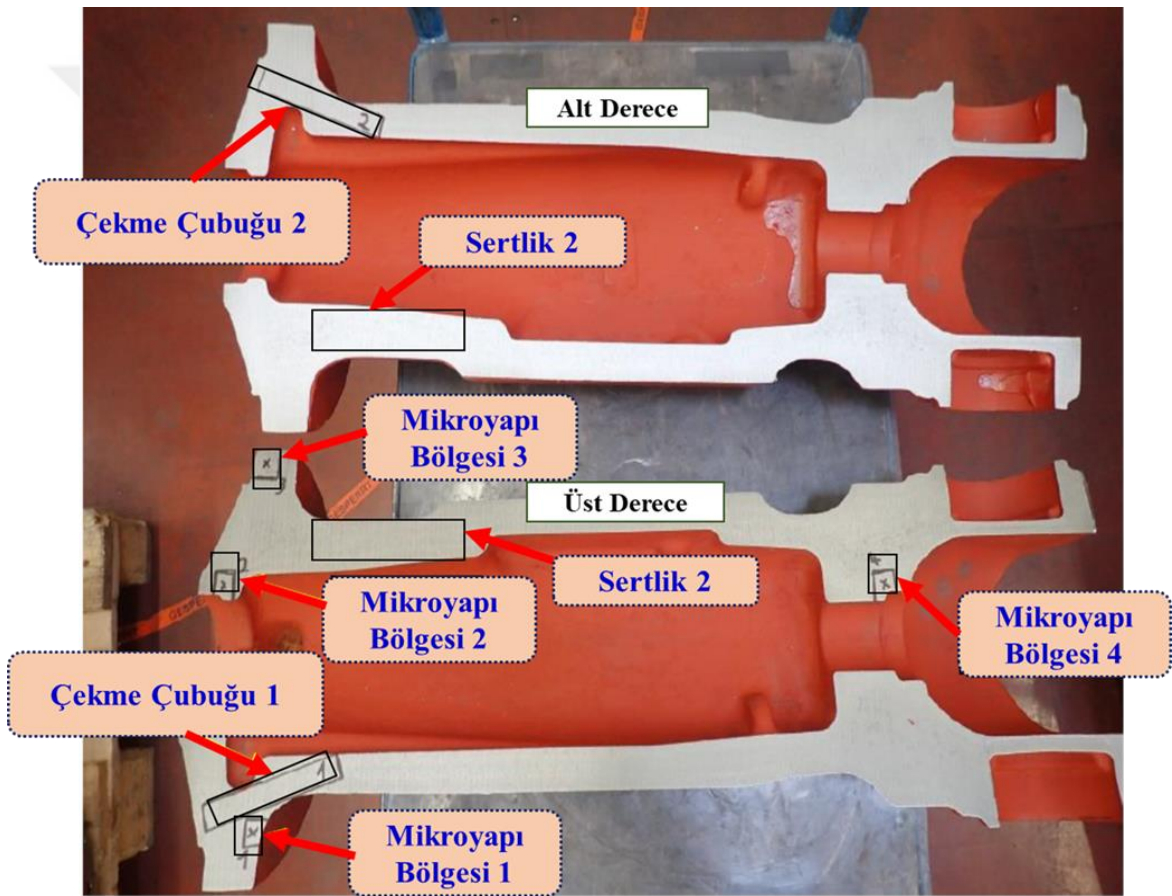
Birinci grup deney numuneleri: Dökümü gerçekleştirilen test parçaları 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulmuştur.

İkinci grup deney numuneleri: Dökümü gerçekleştirilen test parçaları 240 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulmuştur.

Üçüncü grup deney numuneleri: Dökümü gerçekleştirilip 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan test parçalarının yumuşatma tavlama sonucu elde edilmiştir.

2.5. Döküm Parçası Üzerine Yapılan Testler

Test parçalarına ait üretim çalışmaları sonrasında elde edilen döküm parçaları üzerinde mikroyapı, sertlik, çekme-akma mukavemeti, % uzama-sürtünme ve aşınma testleri yapılmıştır. Bu testler döküm parçası üzerinden alınan numuneler üzerinde uygulanmıştır. Şekil 40’da dökümü gerçekleştirilen test parçalarına ait kesit görüntüsü ve metalografik test bölgelerinin şematik gösterimi verilmiştir. Belirtilen üç gruba ait döküm parçalarının incelemeleri aynı bölgelerden alınan numuneler üzerinden yapılmıştır.



Şekil 40. Deney parçasının kesit görüntüleri ve test bölgelerinin şematik gösterimi

2.5.1. Mikroyapısal İncelemeler

Tez kapsamında dökümü gerçekleştirilen üç farklı gruba ait numunelerin mikroyapı incelemeleri için parçalar Şekil 40’da görüldüğü gibi testere ile kesilerek belirtilen yerlerden

alınan numuneler üzerinde incelemeler yapılmıştır. Döküm parçaları üzerinden alınan numuneler 60, 120 ve 240 gritlik zımparalarla zımparalanması için bakalite alınmış ve zımparalanmıştır. Daha sonra 3 μ m'luk elmas pasta yardımıyla keçe üzerinde parlatılmıştır.

Parlatma işleminin akabinde numunelerin mikroyapı incelemeleri Nikon marka Epiphot 200 model optik mikroskopta incelenmiştir. Böylece her bir numuneye ait sferoloşıma, küre şekilli grafitlerin kapladığı alan yüzdesi, faz oranları tespit edilmiştir.

2.5.2. Penetran Sıvı Testi

Tez çalışması kapsamında dökümü gerçekleştirilen üç farklı gruba ait parçaların belirlenen kritik kesitlerinde porozite kontrolü yapılmak için bu test yöntemi kullanılmıştır. Test yönteminde kullanılan testere ve işlem aşamaları Şekil 41'de gösterilmektedir. Döküm parçaları şekilde görülen testere ile kesilerek parçalara ayrılmıştır. Penetran sıvı testi yapılmak istenen kesit yüzeyleri iyice temizlenip kurutulduktan sonra, penetran sıvısı malzeme yüzeyine püskürtülerek uygulanmıştır. Daha sonra penetran sıvısının üzerine yüzey temizleyici sıvı püskürtülerek yüzeyler kurutulmaya bırakılmıştır. Bu işlem sırasında yüzey kurutulduktan sonra üzerine ince bir tabaka halinde pudra tozu serpilmiştir. Kurutulan yüzey ile gözle görülemeyecek kadar küçük olan mikro çekinti içine sızabilecek penetran sıvısında yüzeye doğru kusmaların olup olmadığı gözlemlenmiştir.



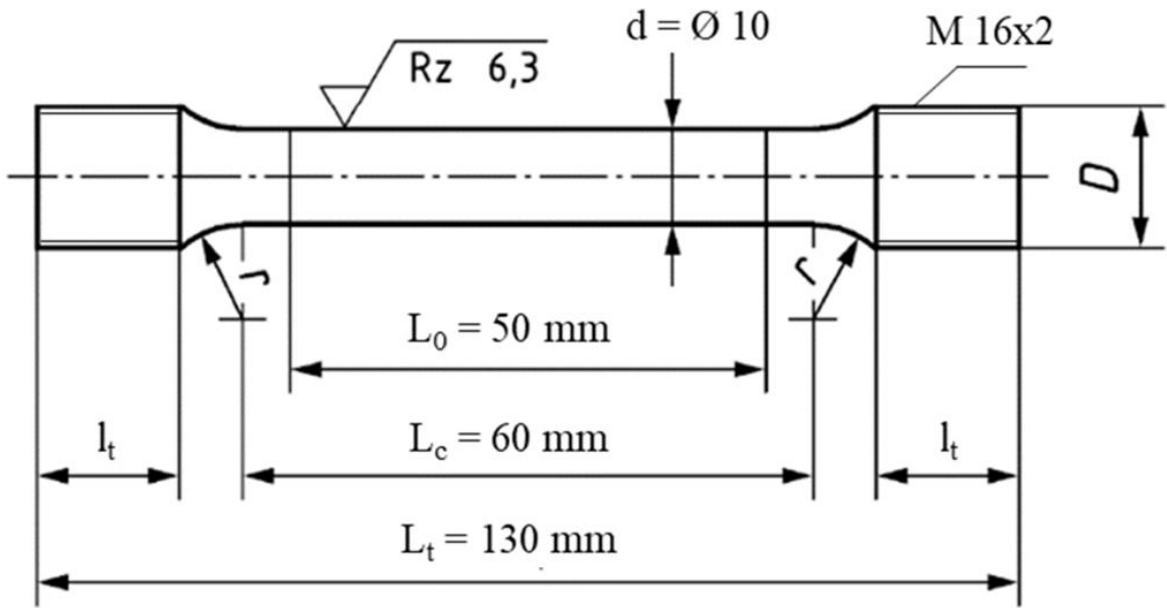
Şekil 41. Penetran sıvı testinde deney parçalarının kesildiği testere ve işlem aşamaları

2.5.3. Mekanik Özelliklerin İncelenmesi

2.5.3.1. Çekme Testi

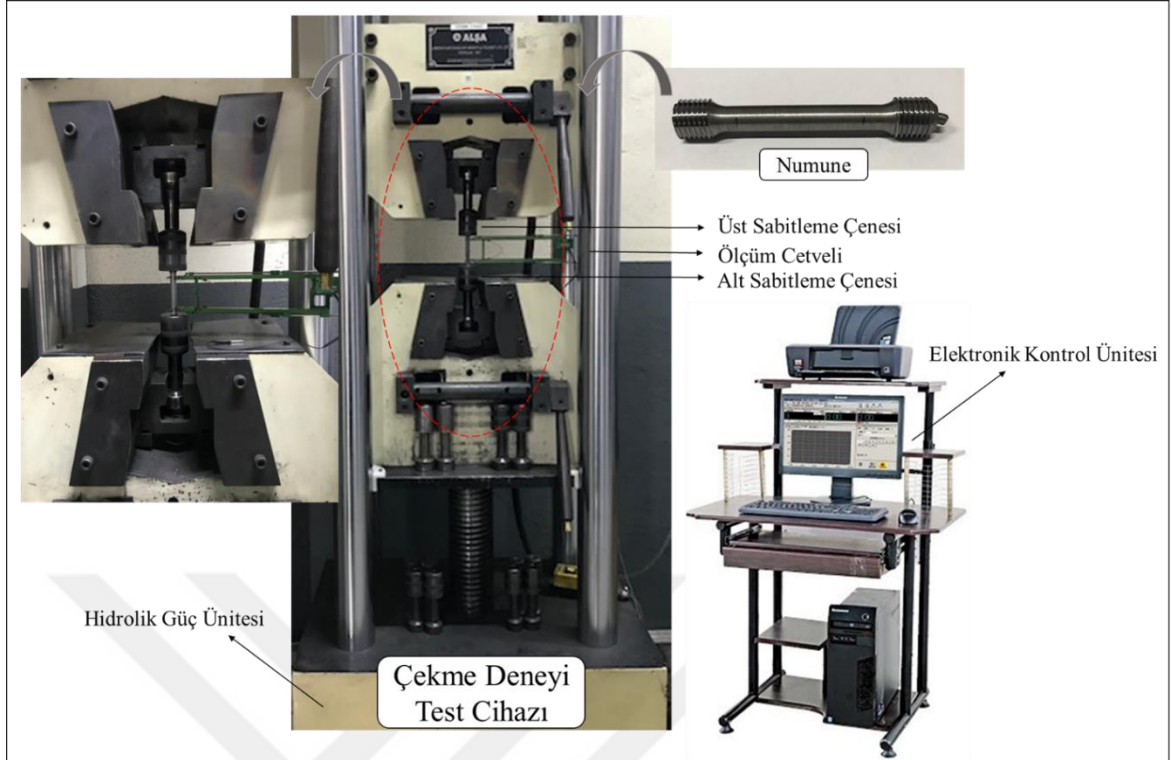
Tez kapsamında dökümü gerçekleştirilen üç farklı gruba ait parçalardan, çapı 18 mm, boyu 150 mm olan çubuklardan, tornada talaşlı işleme ile TS EN 1563:2018 standartlarına uygun şekilde çekme testi numuneleri alınmıştır. Numuneler her bir grup için Şekil 40’da gösterilen çekme çubuğu bölgelerinden alınmıştır.

Çekme testi için standartlara uygun hazırlanan numune ölçüleri Şekil 42’de gösterilmiştir. Burada d , ölçü uzunluğu boyunca numune parçasının çapıdır; L_0 , orijinal ölçü uzunluğudur ve $L_0 = 5 \times d$ denklemi ile hesaplanır. L_c paralel uzunluktur ve daima L_0 ’dan büyük olmak zorundadır. L_t ise L_c ’ye bağlı olan numune parçasının toplam uzunluğudur; r , çaplar arası verilen dairesel kıvrım ve en az 4 mm olması gerekmektedir. Şekilde gösterilen R_z ise maksimum yüzey pürüzlülüğünü temsil eder.



Şekil 42. TS EN 1563:2018 çekme deneyi standartlarına uygun numune ölçüleri

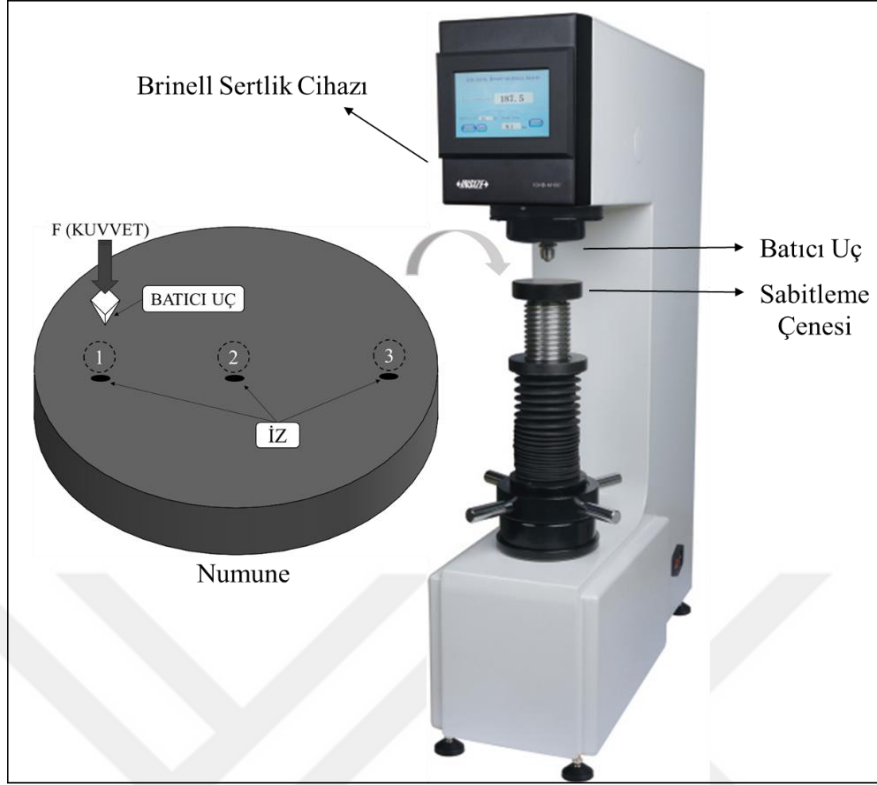
Çekme deneyleri universal bir çekme test cihazı ile numuneler alt üst çenelere yerleştirilerek, bilgisayar kontrolünde gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyinin yapıldığı test cihazının görünümü Şekil 43’te gösterilmiştir.



Şekil 43. Deneylerin gerçekleştirildiği çekme test cihazı

2.5.3.2. Sertlik Testi

Tez kapsamında dökümü gerçekleştirilen üç farklı gruba ait parçalardan sertlik testlerinin yapılması için Şekil 40’da belirtilmiş sertlik kontrol bölgelerinden (döküm parçalarının alt ve üst derecelerinden) çapları 25 mm, kalınlığı 10 mm olan numuneler alınmıştır. Döküm parçaları üzerinden alınan numunelere ait sertlik incelemeleri için her bir numunenin alt ve üst derece yüzeyleri 80 gritlik zımpara ile zımparalanmış daha sonra parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemlerin sonunda sertlik değerleri, her bir numune yüzeyi üzerindeki 3 farklı noktadan 10 sn süre ile 750 kg yük altında elde edilmiştir. Numune yüzeyinden elden edilen 3 farklı noktadaki sertlik değerlerinin ortalaması alınarak incelenmiştir. Sertlik değerlerinin ölçümlerinde kullanılan cihaz ve numune yüzeylerindeki 3 farklı noktada oluşan izlerin görüntüsü Şekil 44’te verilmektedir.



Şekil 44. Deney parçalarından alınan sertlik ölçüm numunelerinin ve deney cihazının görünümü

Hesaplanan bu değerler vasıtasıyla, numunelerden alınan sertlik değerlerinin hata oranı azaltılmak istenmiştir. Numunelerin sertlik ölçümleri Brinell Sertlik test cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

2.5.4. Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi

2.5.4.1. Sürtünme ve Aşınma Testi

Tez kapsamında dökümü gerçekleştirilen üç farklı gruba ait döküm parçalarından alınan numunelerin aşınma davranışları; yük taşıma araçları ya da büyük iş makinelerinde kullanılıyor olmasından dolayı, çalışma şartlarını temsil edecek şekilde Şekil 45'te verilen dairesel hareket esaslı aşınma test cihazı kullanılarak belirlenmiştir. Bir araca montajı yapılmış aks yuvası parçasının çalışma şartları dikkate alındığında, hareket esnasında oluşan dairesel darbe kuvvetleri ve kayma etkisi bu test düzeneği incelenmek istenmiştir.



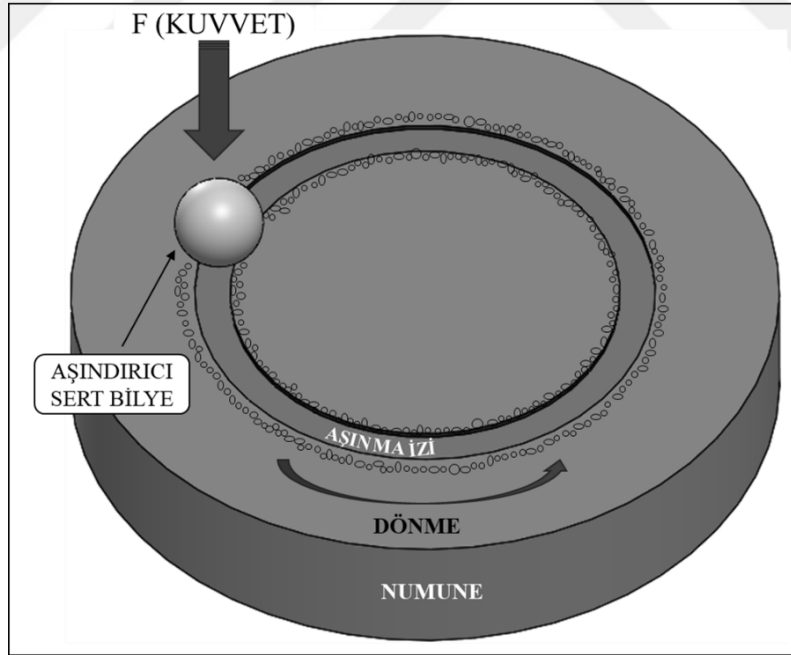
Şekil 45. Dairesel hareket esasına dayanan aşınma deney cihazının şematik görünümü

Tez çalışması kapsamında üç farklı gruba ait parçaların üzerinden alınan 40x40x5 mm boyutlarındaki numunelere uygulanan rotative (döner) aşınma test parametreleri Tablo 10'da verilmektedir.

Tablo 10. Dairesel-kayma aşınma deneyinin uygulama parametreleri

SABİT PARAMETRELER	ÖZELLİK / DEĞER
Uygulanan Kuvvet	40 N
Aşındırıcı Bilye Özelliği	Al ₂ O ₃
Aşındırıcı Bilye Çapı	6 mm
Kayma Çapı	12 mm
Kayma Hızı	200,967 mm/s
Deney Uygulama Süresi	66,33 dk
Dönme Hızı	320 rpm
Mesafe	800 m
Test Ortamı	Atmosfer Ortamı
Ortam Sıcaklığı	18-22 °C
Bağıl Nem	% 50-60

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda döküm parçası üzerinden alınan numune yüzeylerinde dairesel yönlü aşınma testi gerçekleştirilmiştir. Uygulama sırasında ortam sıcaklığı ve nemi gibi; deneysel çalışma sonuçlarını etkileyecek veriler parametre olarak verilmiştir. Aynı zamanda deney esnasında aşınma karakterini belirleyici nitelikte olan aşındırıcı bilye özellikleri, numunelere uygulanan yük değeri, deney süresi, çevrim esnasında alınan mesafe ve hız birer parametre olarak belirlenmiştir. Bu parametreler ışığında gerçekleştirilen Pin-On-Disk (Döner) aşınma testlerinde, sistemde yer alan loadcell (yük hücresi) vasıtasıyla uygulanan dairesel yük değeri tespit edilmektedir. Dairesel aşınma testlerinde yukarıda verilen test parametreleri doğrultusunda numune yüzeylerinde Şekil 46'da verilen aşınma izleri elde edilmiştir. Tablo 10'da da görüldüğü üzere pin-on-disk test cihazında aşınma deneyleri esnasında numune yüzeylerine uygulanan dairesel yük 40 N'dir. Deney numunelerinin yüzeyi üzerine eşit miktarda dairesel yük uygulanmıştır. Her bir numune üzerinde oluşturulan aşınma izleri 800 m yol alınarak belirlenmiştir. Bu parametreler ışığında uygulama süresi ortalama 66,33 dk'dır.



Şekil 46. Deney numune yüzeylerinde elde edilen dairesel-kayma aşınma izi

Deneylerde aşındırıcı yüzey olarak 6 mm çapındaki Al_2O_3 sert bilye kullanılmıştır. Dairesel aşınma deneyi sırasında bilyenin numune yüzeyi ile temas noktası her bir numune

döngüsünde eşit mesafede yol alacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Deneyler atmosfer şartlarında, ortam sıcaklığı 18-22 °C ve bağıl nem % 50-60 arasında değerlerinde gerçekleştirilmiştir. Her bir numunenin deney başlangıç öncesi ve deney bitiş sonrası ağırlıkları tartılarak not edilmiştir. Bu sayede deney sonraki her bir numune için ağırlık kayıp oranları tespit edilmiştir.

Dairesel-kayma etkisi altında elde edilen sonuçlar aşınma izleri ile kıyaslanarak değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda 3 farklı gruptan alınan numunelere yönelik uygulanan dairese-kayma deneyi doğrultusunda malzemelerin aşınma dayanımlarının göreceli olarak belirlenmesi amaçlanmıştır. Aynı zamanda bu çalışma, aynı malzeme yapısına sahip numuneler üzerinde literatürde daha önce gerçekleştirilmiş ya da daha sonra gerçekleştirilecek aşınma deneylerinden elde edilen karakterizasyonlar ile dairese yükler altında çalışan parçalardan elde edilen aşınma dayanımlarının karşılıklı kıyaslanma imkânı sağlanacaktır. Bu sayede endüstride dairese-kayma etkisi altında çalışan aks yuvası parçalarının yüzeylerinde aşınma kaynaklı etkinin belirlenmesi, çalışma koşullarına göre değişkenlik gösterebilecek aşınma dayanımının incelenmesi ve geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

3. BULGULAR VE İRDELEME

3.1. Simülasyon Sonuçları

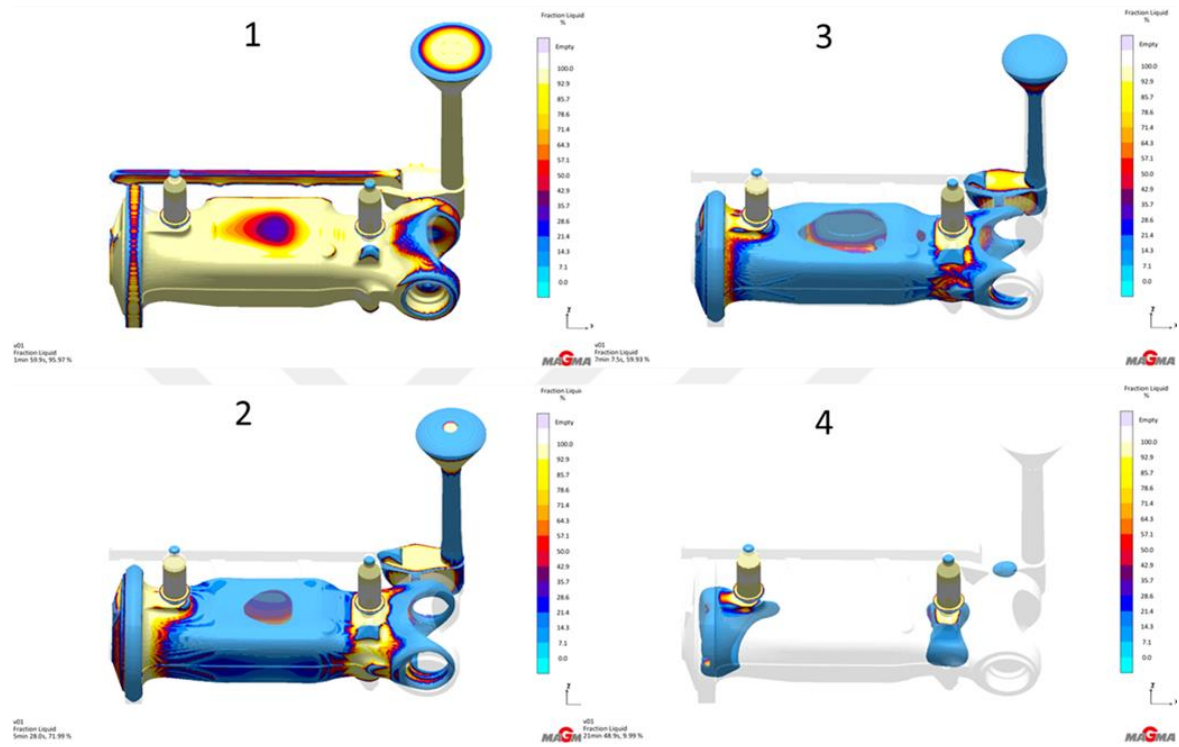
Örnek test parçasına TS EN 1563:2018(DIN 50125) malzeme standartları optimizasyonunda 2 farklı simülasyon gerçekleştirilmiştir. Test parçası birinci simülasyonda 240 dakika, ikinci simülasyonda ise 80 dakika sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulmuştur. İlgili simülasyon sonuçlarına yönelik çalışmalar aşağıda irdelenmiştir.

Şekil 47’de test parçasına ait katılma sonuçları gösterilmektedir. Magmasoft simülasyon programında ilgili katılma morfolojisi, bir malzeme özelliği olan besleme etkinliği değeri ile dikkate alınır. Katılma süresi kriteri, dökümün başlangıcından sıcaklığın katılma sıcaklığının altına düştüğü zamana kadar geçen süreyi gösterir. Şekil 47 incelendiğinde sağ tarafta bulunan renklendirilmiş skala dolumu gerçekleştirilmiş parça içerisinde bulunan sıvı metal oranını göstermektedir. Buradaki mevcut katılma süresi 50 dk 35,4 sn’dir. Bu katılma süresi her iki simülasyon sonucu için aynı değerdedir. Tam dökümün % 100’ü sıvıdır. Şekillerin sağ tarafında gösterilen skala değerleri dikkate alınırsa, katılma sürecinde lokal olarak azalan makroskopik besleme kabiliyeti görülmektedir. Bu ayarlarla skala, % 0 ile % 100 sıvı faz arasındaki alana sabitlenir. Bu nedenle, % 100’ün altına düşen tüm alanlar sadece şeffaf olarak gösterilir. Katılma yüzeyinin ilerlemesini belirgin bir şekilde takip edebilmek için alt X-Ray limiti %100’dür. Buradaki kritik değer altına düşen besleme etkinliği nedeniyle hangi alanların izole edildiğini kontrol edilebilmektedir.

Programda bulunan likidüs ve solidüs kriteri, dökümün ayrı bölgelerinin likidüsten solidüs sıcaklığına soğuması gereken sürenin görüntülenmesini sağlar. Katılma simülasyonunun başlangıcında sıvı sıcaklığının altına düşmüş olan veya katılma simülasyonunun sonunda henüz katılma sıcaklığının altına düşmeyen bölgeler gri olarak gösterilir. Bu sonuçlar, renk skalasının renk yapısı yardımıyla, belirli bir zamanda katılma sırasında sıvı eriyiğin yerel fraksiyonunu göstermektedir. Bu, azalan sıvı yüzdesi yardımıyla parça içinde ilerleyen katılma cephesini veya viskoz eriyik malzemenin izlenmesini sağlar.

İki tamamlayıcı kesir sıvısı ve katı kesir sonucunun değerleri her zaman % 100’e ulaşır. Ölçek değeri 2,19 olan bir kesir sıvısı dolayısıyla 97,8’e sahip bir kesir katı sonucuna karşılık gelir. Bu iki sonucun yardımıyla, açık besleme yolları veya olası sıcak noktalar ile ilgili ola-

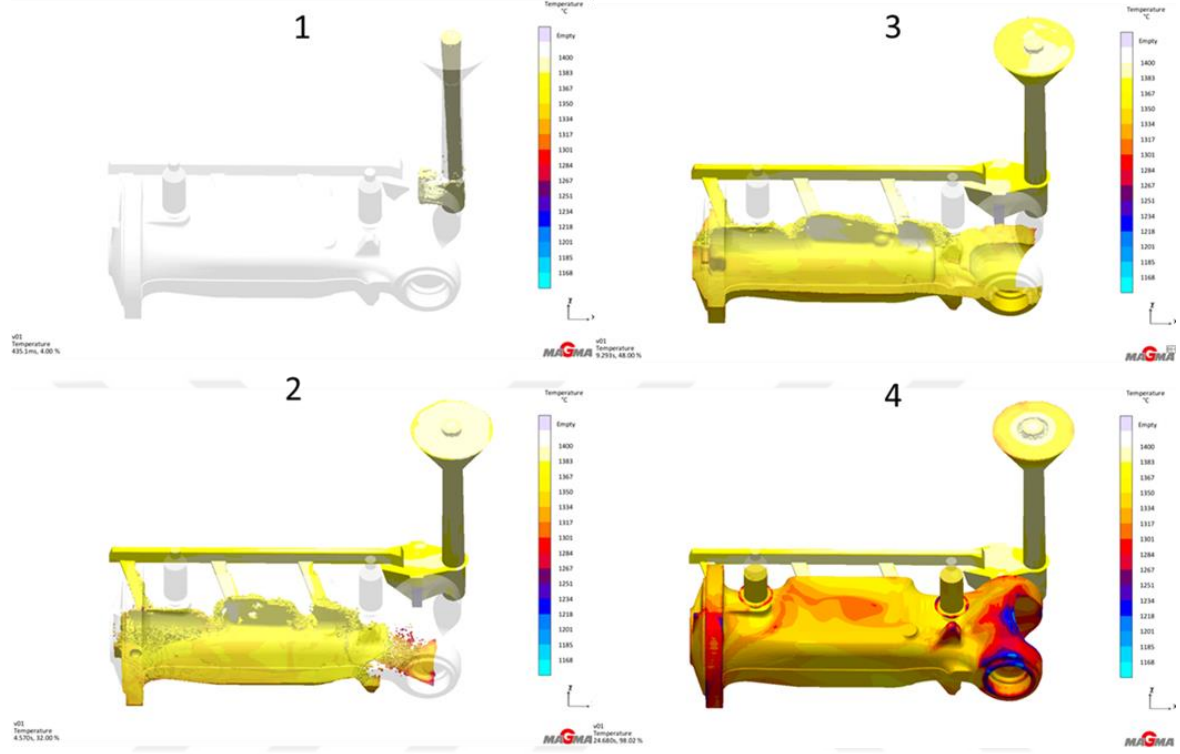
rak katılaşmayı, sadece sıcaklık dağılımına bakmadan gözlemleyebiliriz. Test parçasının katılaşma sonuçları incelendiğinde katılaşma yönünün parça üzerinde bulunan besleyicilere doğru olduğu görülmektedir. Bu sonuçlar doğrultusunda kullanılan besleyicilerin ve yönlendirilmiş katılaşmanın uygun olduğu görülmektedir.



Şekil 47. Deney parçasına ait sıvı metal katılaşma oranlarının simülasyon sonuçları

Şekil 48 tasarımı yapılmış döküm parçasının dolum başlangıcından itibaren soğuma geçişine kadar geçen süre içerisinde parça yüzeyinde veya kesitinde gerçekleşen sıcaklık değişim değerlerini göstermektedir. Burada asıl amaç mevcut parçanın dolumu esnasında ve sonrasında parça kesitlerindeki sıcaklık değerleri arasında belirgin farklar yaşanmasını engelleyerek olası döküm hatalarının önüne geçebilmektir. Ayrıca bu sonuçlar parça için tasarlanmış yolluk dizaynının parça dolumu esnasında kum kalıp içerisinde yaşanabilecek olası türbülansın (döküm parçası yüzeyinde kum ve yüzey hatalarına yol açabilir) ön görülmesi ve değerlendirilmesi için önemlidir. Şekil 48’de de görüldüğü üzere mevcut parçanın dolum başlangıcından sonuna kadar ki geçen sürede parça yüzeyinde veya kesitinde belirgin sıcaklık farkları görülmemekte ve türbülansa sebebiyet verecek bir dolum

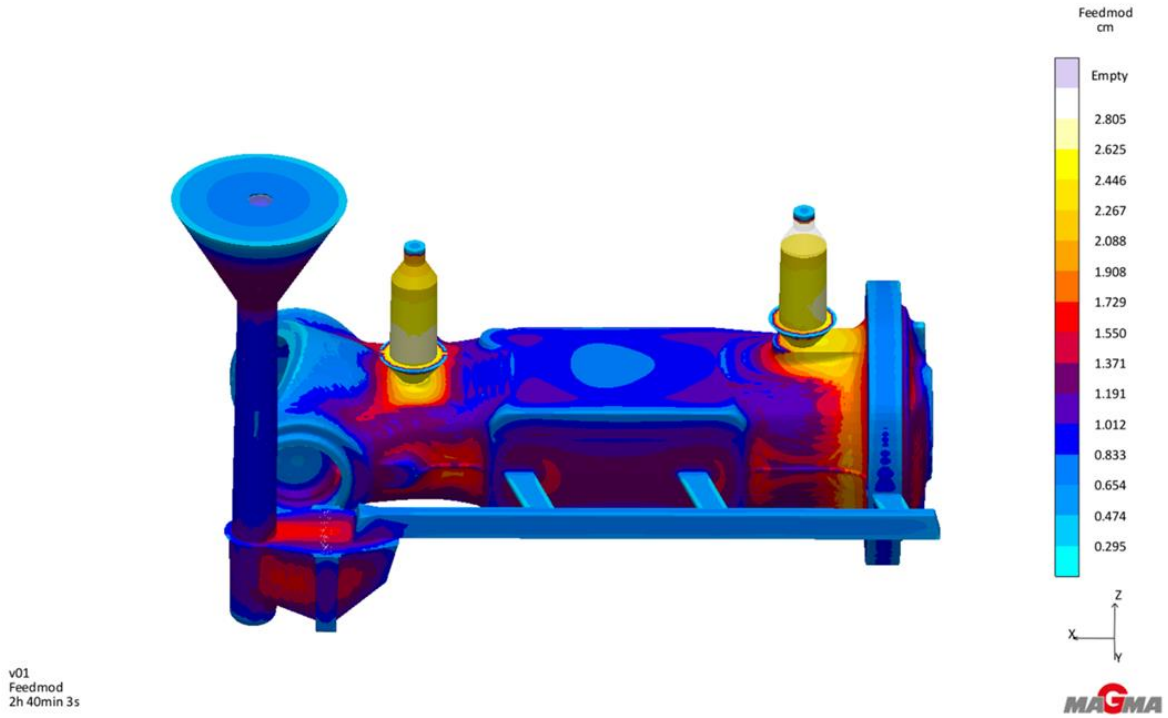
gerçekleşmemektedir. Parçanın yolluk girişlerinde döküm şartlarına uygun parça kesitlerinde ise seviyeli bir dolun gerçekleştirildiği bariz bir şekilde gözlemlenmiştir.



Şekil 48. Deney parçasına ait sıcaklığa bağlı dolunu gösteren simülasyon sonuçları

Şekil 49’da tasarımı yapılan test parçasına ait Feedmod (Besleme etkinliği) sonuçları görülmektedir. Feedmod döküm içindeki termal koşulların anlaşılmasına ve modül hesabı ile uygun besleyicilerin seçilmesine yardımcı olan bir simülasyon sonucudur. Bu kriter özellikle kum kalıba döküm işlemleri için tasarlanmıştır. Aynı zamanda dökümü gerçekleştirilecek olan parçanın kesit kalınlığına ve soğuma süresine göre katılaşma sırasında yaşanan çekintiyi engelleyebilmek için kullanılması gereken besleyici tipinin veya kullanılan besleyici etkinliğinin belirlenmesinde kullanılır. Besleyicinin parça kesitinden daha geç soğuması gerektiğinden döküm parçasının tespit edilen kritik kesitteki modül değeri belirli bir emniyet kat sayı ile çarpılıp kullanılacak olan besleyici modülü bulunur ve besleyici dizayna adapte edilir. Burada dolunu gerçekleştirilen test parçasına ait katılaşmanın parça üzerinde bulunan besleyicilere doğru yönlendirilmesi istenmektedir. Şekil 49 incelendiğinde sıvı metalin kullanılan besleyicilere doğru yönlü katılaşma elde edildiği görülmektedir. Uygun sonuçlara ulaşılabilmesi için en yüksek değerler

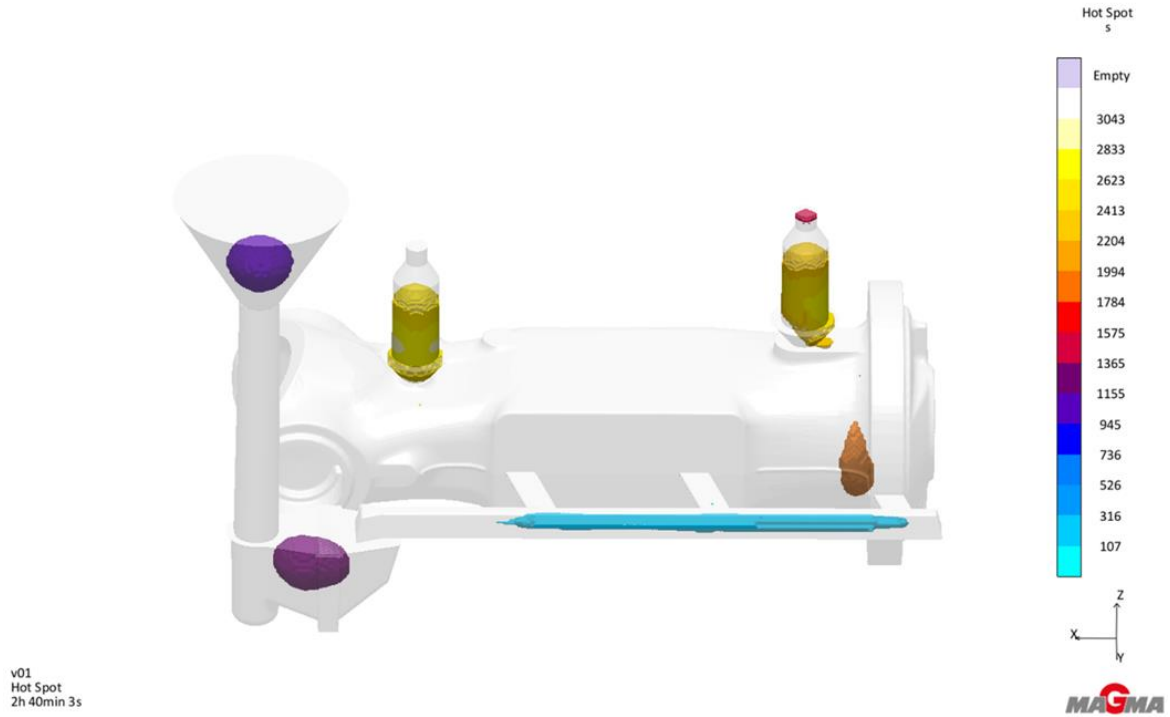
besleyicilerde görünmeli ve döküm içinde kademeli olarak küçülmelidir. Tipik olarak kullanılan besleyici modülünü, dökümdeki en yüksek Feedmod değeriyle karşılaştırıldığında besleyici modülünün uygun değerlerde olduğu ve besleme için yeterli olduğu görülmektedir. Elbette termal ve geometrik modül arasında bir fark vardır. Geometrik modül ile karşılaştırıldığında, termal modül kum kenarı etkilerini ve soğumayı hesaba katar, bu da soğutma için mevcut olan etkili döküm yüzeylerinde bir azalmaya veya artışa ve dolayısıyla farklı katılma sürelerine yol açar. Bu nedenle, termal modül ile geometrik modül birlikte göz önüne alınmalıdır. Bu şartlar altında Şekil 49'daki test parçasına ait termal modül incelendiğinde parça kesitlerinde belirgin sıcaklık farklarının olmadığı görülmektedir.



Şekil 49. Deney parçasına ait Feedmod (Besleme etkinliği) simülasyon görüntüsü

Şekil 50'de tasarımı yapılan test parçasına ait Hot Spot (Sıcak nokta) sonuçları gösterilmektedir. Sıcak nokta kriteri, parça özelinde katılma süreleri ve çevrelerinden önemli ölçüde farklı olan alanları göstermektedir. Böylece eriyiğin nerede tamamen daha soğuk malzeme ile çevrili olduğu belirlenebilir. Bu alanlar beslemeden kesilen bölgelerdir ve bu alanlarda büzülme deliği ve gözenek oluşum riski muhtemeldir. Ayrıca, bu sonuçlarda yönlü katılma da kontrol edilebilir ve potansiyel olarak sorunlu bölgeler de tespit edilebilir.

Bu sonucun hesaplanması, katılma süresi sonucu ile belirtilen yerel maksimuma dayanmaktadır. Gösterilen her bir sıcak nokta hacmi, en uzun katılma süresi olan merkezden başlayarak daha önceki zaman değerleriyle dışa doğru belirli bir zaman aralığını kapsamaktadır.

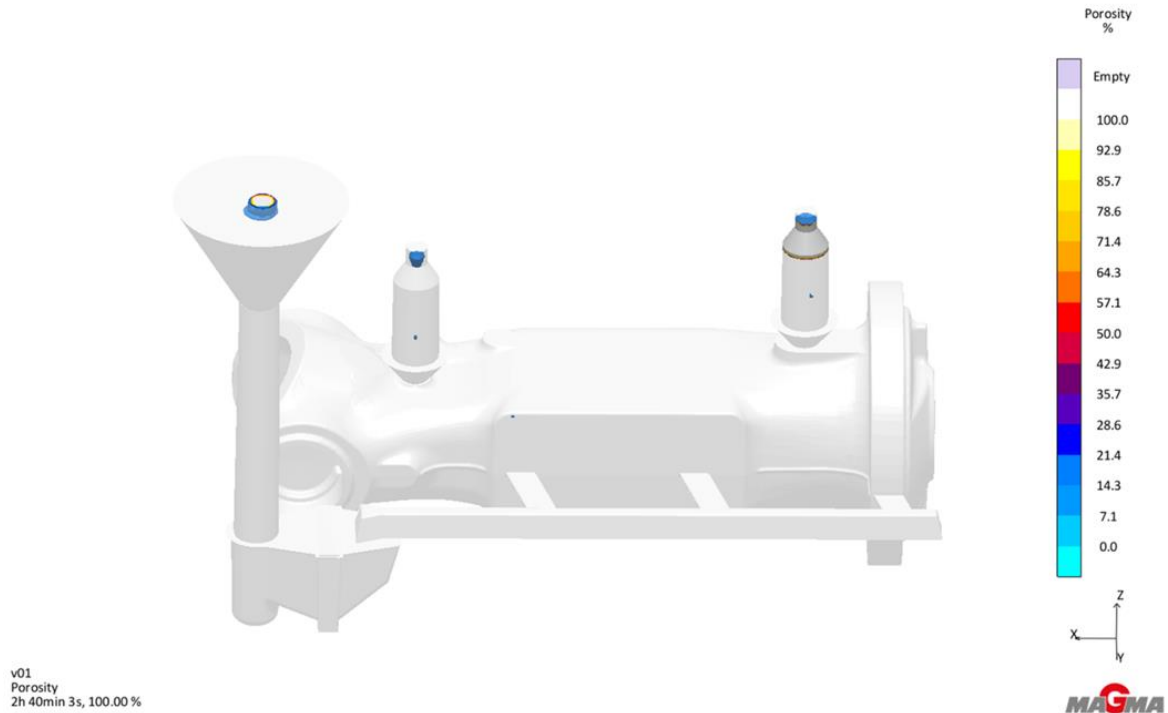


Şekil 50. Deney parçasına ait Hotspot (Sıcak nokta) simülasyon görüntüsü

Genel olarak, sıcak noktaların dökümün kendisinde değil, besleyicilerde ve döküm sisteminde olduğundan emin olunmalıdır. Sıcak nokta kriteri, katılma süresini analiz etmek için ek bir araçtır ve bu nedenle, belirli alanlar uzun katılma süreleri gösterebilir bile kritik olmayabilirler. Bu da buradan elde edilen sonuçların döküm parçasına ait katılma sonuçlarıyla da karşılaştırılması gerektiğini belirtmektedir. Bu özellikle demir dökümleri için geçerlidir. Farklı alanların farklı renkleri, belirli zamanlarda katılma sırasında sıcak noktaların nerede oluştuğunu gösterir. Aynı zamanda katılma sırasında parçada çekintiyi (fiziksel büzülme) engellemek için katılma süresinin en yüksek olan bölgenin de ekstra sıvı metal ihtiyacının karşılanması için besleyici adı verilen döküm elemanlarının doğru bir şekilde kullanılmasında önemli rol oynamaktadır. Şekil 50 incelendiğinde en son katılma bölgelerinin farklı renklerde olduğu görülmektedir. Bu renkler şeklin sağ tarafında bulunan skala da saniye cinsinden verilmektedir. Sonuçlar incelendiğinde tasarımı yapılan test

parçası üzerinde sağ alt kısımda risk teşkil edebilecek bir bölge vardır. Fakat skala incelendiğinde risk oluşturabilecek bölgenin parça alt derecesinde olduğu ve üst kısmında bulunan besleyiciden daha erken katılaştığı görülmektedir. Bu durum da besleme etkinliği devreye girmekte ve diğer simülasyon sonuçları da göz önüne alınarak bu bölgenin risk teşkil etmediği ön görülmektedir.

Şekil 51’de tasarımı yapılan test parçasına ait porozite (boşluk, çekinti) sonuçları gösterilmektedir. Porozite sonucu, programın hesapladığı en çarpıcı sonuçlardan biridir. Ancak, parça yapısını veya döküm sürecini değerlendirmek için tek kriter olarak seçmek doğru değildir. Dökümlerdeki gözeneklerin birçok nedeni olabilir. Eriyik gaz içeriği, alaşımın katılaşma büzülmesi, doldurma nedeniyle gaz ve hava sıkışmaları veya bunların kombinasyonu gibi birçok neden parçada gözeneklerin oluşmasına neden olan sorunlardan bazılarıdır. Bu nedenle, bir dökümdeki hacim kusurlarını değerlendirebilmek için her zaman birkaç farklı sonuca başvurulmalıdır.

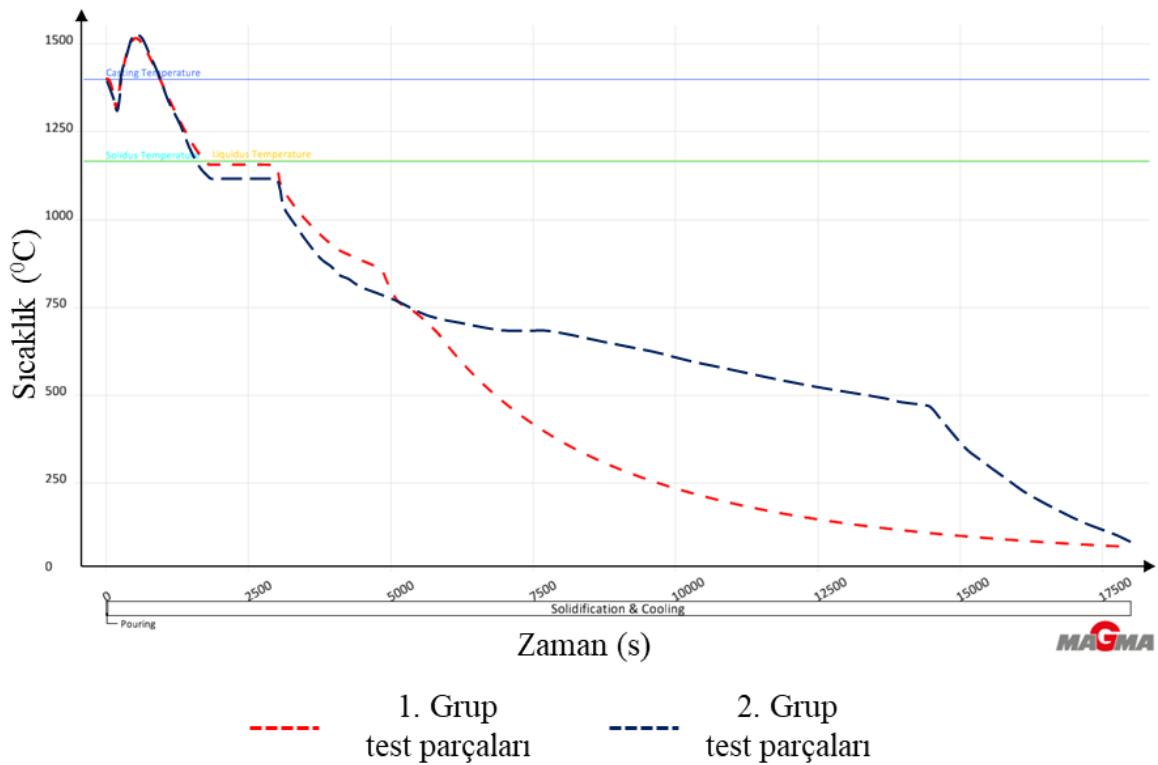


Şekil 51. Deney parçasına ait çekinti simülasyon görüntüsü

Porozite sonucu, katılaşma koşulları nedeniyle hacim küçülmesini telafi etmek için potansiyel olarak eriyikle yeterince beslenmeyen alanları gösterir. Bu hesaplama için önemli bir parametre, bir malzeme özelliği olan besleme etkinliğidir. Kavisli, ince duvar

alanlarındaki katılaşma büzülmesinin hesaplanması, gerçekte daha dağınık olduğu ortaya çıkabilen yerel olarak birikmiş görüntülerle sonuçlanabilir. Simülasyon sonuçları belirlenen skala aralığında parçada bulunan gözenek boşluklarını farklı renk ile bariz bir şekilde göstermektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere deneyi gerçekleştiren parçanın yolluk ve besleyici tasarımı parçada oluşabilecek herhangi bir gözenek boşluğunu engelleyecek şekilde dizayn edilmiştir. Döküm parçası incelendiğinde mavi renkte görülen boşlukların parça içerisinde değil besleyicilerde toplandığı gözlenmektedir. Bu gözlemler dikkate alındığında mevcut tasarımın döküm kusuru sayılan porozite açısından uygun olduğu ve üretildiği takdirde sağlam parça imalatının gerçekleşeceği anlaşılmaktadır.

Şekil 52’de verilen grafiklerde, iki farklı kalıp bozma süreli simülasyon gerçekleştirilmiş test parçasına ait dolum esnasında kum kalıp içerisinde ve sonrasında zamana bağlı en yüksek sıcaklık değişimi gösterilmektedir.

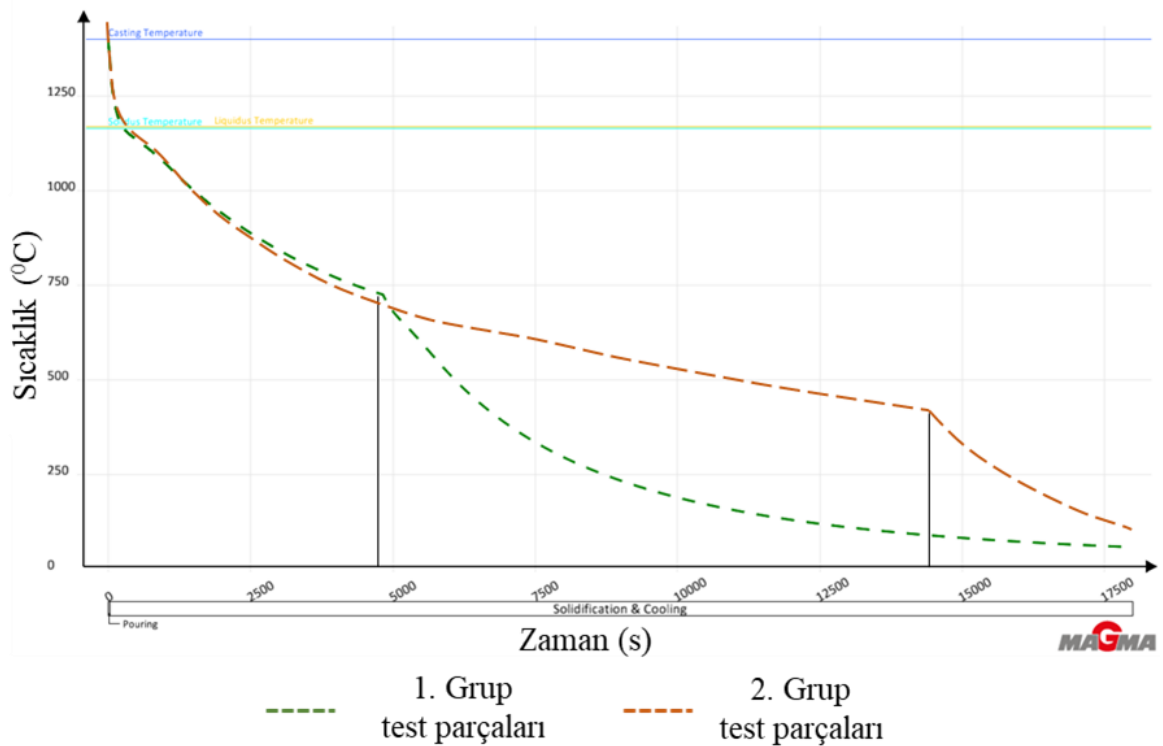


Şekil 52. Birinci ve ikinci grup deney parçalarının kalıp içi en yüksek sıcaklık-zaman grafiği

Grafiklerden de anlaşılacağı üzere sıvı metalin kum kalıba girdikten sonra döküm parçası üzerinde bulunan besleyiciler ile reaksiyona girmesiyle sıcaklık maksimuma ulaşır

ve daha sonra soğumaya başlar. Şekilde kırmızı kesik çizgilerle gösterilen birinci grup test parçaları 80 dk, mavi kesik çizgilerle gösterilen ikinci grup test parçaları 240 dk sonunda kum kalıptan ayrılan döküm parçalarının kum kalıp içi ve sonrası en yüksek sıcaklık-zaman grafiğini temsil etmektedir.

Şekil 53'te verilen grafikte, iki farklı kalıp bozma süreli simülasyon gerçekleştirilmiş test parçasına ait kum kalıba giren sıvı metalin saniye cinsinden sıcaklık değişimi gösterilmektedir.



Şekil 53. Birinci ve ikinci grup deney parçalarının kalıp içi ortalama sıcaklık-zaman grafiği

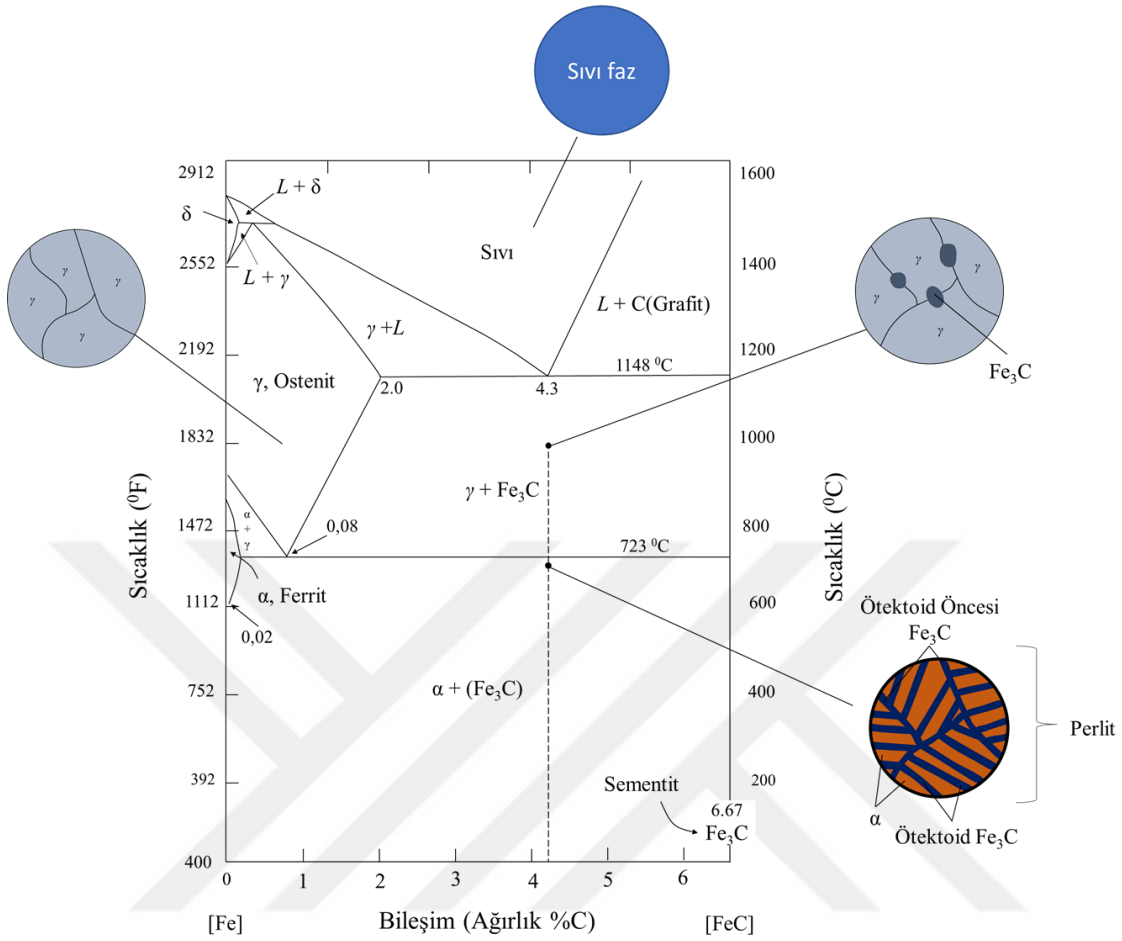
Her iki eğriden görüleceği gibi katılaşma 1165 °C gerçekleşmiştir. Fakat katılaşma sonundaki nihai parçada yapılan simülasyonlarda soğuma parametreleri kum kalıp bozma sürelerine göre değişiklik göstermektedir. Her iki denemede de aynı ürün kullanılmasına rağmen bu değişkenliğin ana nedeni döküm parçasının kesit kalınlığına göre soğuma farklılıklarıdır.

Parçanın cidar (et kalınlığı) soğumada önemli bir faktördür. Turuncu kesik çizgi ile gösterilen eğride kum kalıp içinde soğumanın (240 dk) daha dengeli olduğu ve kalıp bozma sıcaklığının da 450-500 °C aralığında nihai faz dönüşümünü tamamlamış şekilde kalıptan

ayrıldığı görülmektedir. Yeşil kesik çizgi ile gösterilen eğride kum kalıp içinde soğumanın(80 dk) olduğu ve kalıp bozma sıcaklığı 750 °C civarında tespit edildiği ve bu sıcaklıkta faz dönüşümlerinin devam ettiği ve direk oda sıcaklığı atmosferinde (10-25 °C) hızlı bir soğumaya maruz kaldığı ve malzeme yapısındaki perlit fazlarının yüksek olduğu yukarıdaki araştırmalarda yüzdesel olarak ifade edilmiştir. Bu bağlamda tüm bu süreci destekleyici yapılan mekanik testlerde mukavemet değerinin yüksek çıktığı yüzde uzmanın istenilen standart değerlerinin altında olduğu gözlemlenmiştir.

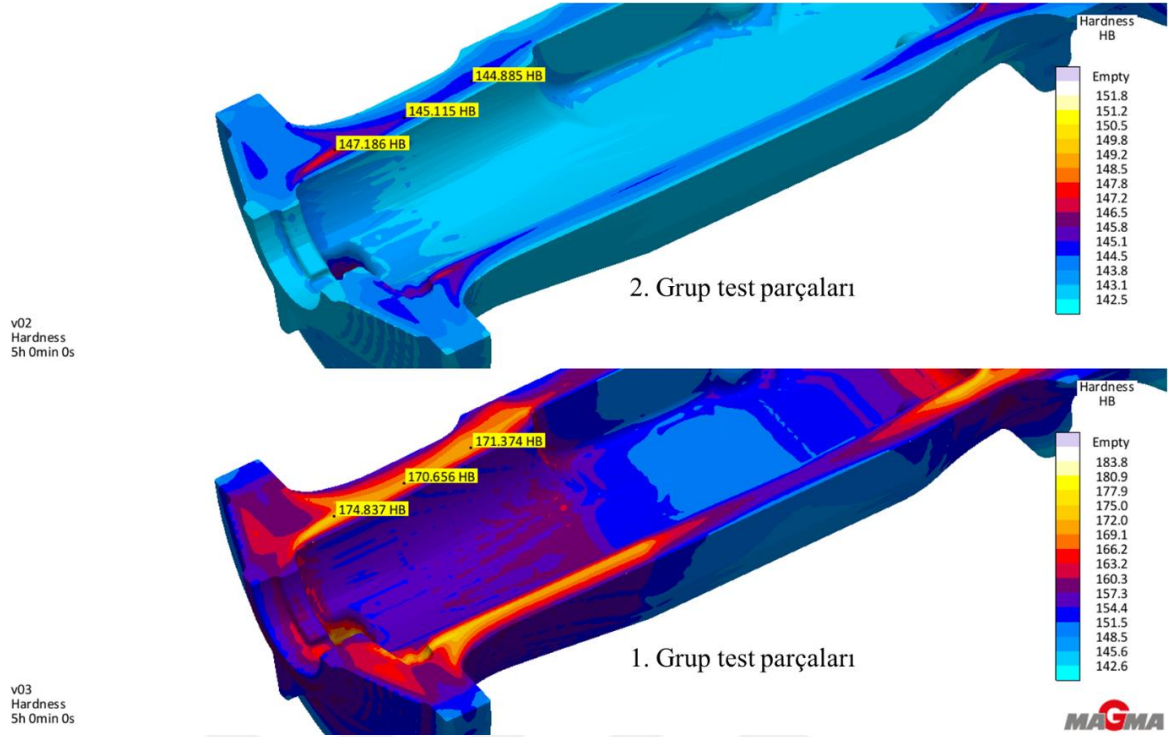
İki farklı kalıp bozma süresi ile elde edilen simülasyon sonuçlarının yorumlanabilmesi için ötektoid üstü faz dönüşümlerinin bilinmesi gerekmektedir. Yaygın olarak görülen ötektoid faz dönüşümleri, ötektik dönüşüm ile benzerlik göstermektedir. Fakat ötektoid faz dönüşümlerinde sıvı faz içerisinde herhangi bir dönüşüm gerçekleşmez. Bu dönüşüm, kristal allotropisi vasıtasıyla ortaya çıkan bir katı hal faz dönüşümüdür ve üç farklı katı faz içermektedir. Burada mevcut katı faz; östenit (γ), ayrı iki katı faza; ferlit (α) ve sementite (Fe_3C) dönüşür. Ötektoid dönüşümün gerçekleştiği sıcaklığa ötektik dönüşüm sıcaklığı da denilmektedir. Bu değer sistemdeki en düşük katılaşma sıcaklığıdır [40]. Şekil 53 incelendiğinde test parçalarına ait katılaşma sıcaklığının 750 °C civarında olduğu görülmektedir.

Faz dönüşümlerine ait grafik Şekil 54'te gösterilmektedir. Şekil 54'ten de görüldüğü üzere test parçalarına ait katılaşma sonrası faz dönüşümü ötektoid üstü bir dönüşümdür. Ötektoid alaşımların yapısı, sıcaklığın yüksek olmasından dolayı, difüzyon ile gerçekleşir. Katı ayrışmasında difüzyon hızının yüksek olmaması, sıvı fazda gerçekleşen ayrışmanın katı fazda gerçekleşen ayrışmaya göre çok daha hızlı gerçekleşmesine neden olmaktadır. Ötektoid alaşımlarda denge dışı dönüşümlerdir. Bu alaşımlar incelendiğinde; yüksek sıcaklık fazı olarak da isimlendirilen sıvı fazı, ferrit ve sementit fazına dönüşerek lamelli bir yapı sergiler. Bu yapının tamamı da perlit olarak isimlendirilir. Oluşan bu perlit yapısı ötektik alaşımlarda olduğu gibi oldukça ince bir yapıdan oluşmaktadır. Başka bir deyişle, mikroskop altındaki görüntüleri incelendiğinde ötektik ve ötektoid alaşımlar aynı görünüme sahiptir. Fakat ötektik bileşimlerin katılaşması sırasında lameller katılaşma yönünde uzar. Ötektoid bileşime sahip alaşımlarda ise lameller eşit boy ve genişliğe sahiptir. Bu durum aralarındaki tek fark olarak açıklanır. Bu bilgiler doğrultusundan da anlaşılabileceği üzere farklı kalıp bozma sürelerinde üretimi gerçekleştirilen döküm parçalarının karakteristik özelliklerinin farklılık göstermesi muhtemeldir.



Şekil 54. Ötektoid üstü bileşimdeki (Ağırlıkça % 4,3 C içeren) bir demir karbon alaşımının ötektoid sıcaklığının altındaki ve üstündeki mikroyapıların şematik gösterilişi [40]

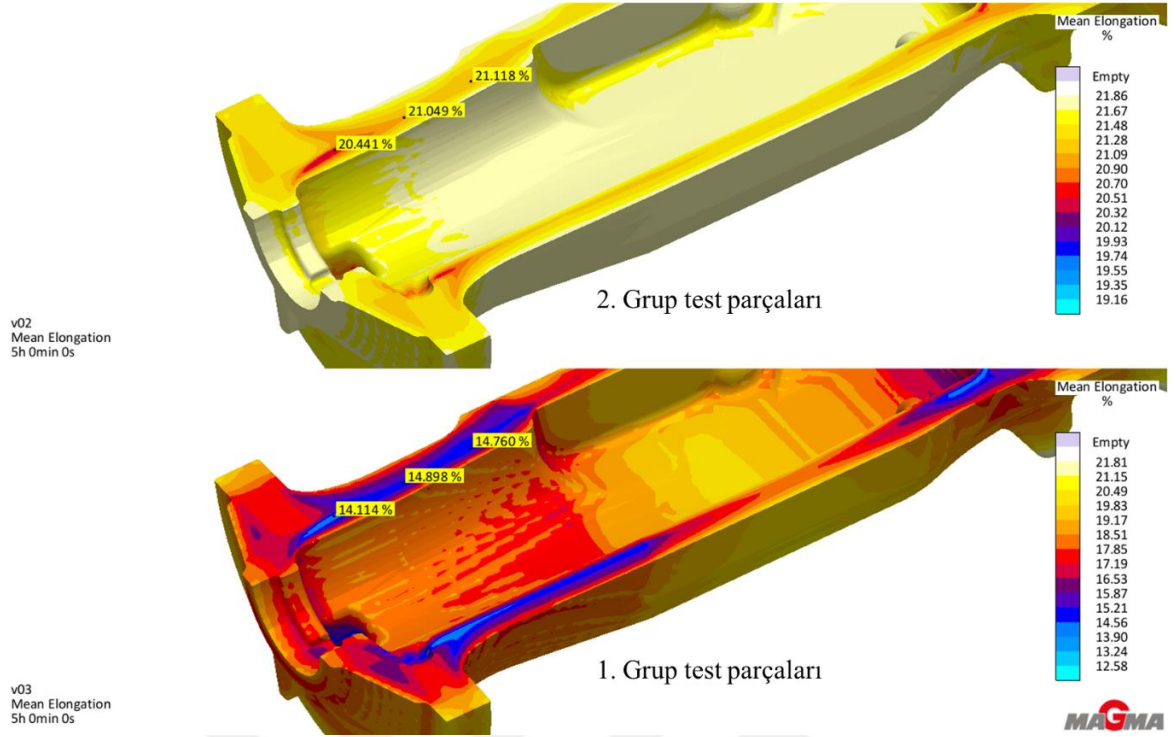
Programda iki farklı kalıp bozma sürelerine yönelik simülasyonu yapılmış test parçasının belirtilen bölgelerden kesitleri alınarak döküm sonuçlarına göre parça yüzeyinde sertlik değerleri verilmektedir. Bu kesit görüntüleri ve sertlik değerleri Şekil 55'te görülmektedir. Şekil incelendiğinde 240 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 2. grup döküm parçalarının sertlik değerleri 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 1. grup döküm parçalarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Dolayısıyla kum kalıptan erken çıkarılan parçaların sertlik değerleri, hızlı soğumaya maruz bırakıldığı için dengeli soğuma koşullarına göre artış göstermiştir. Ayrıca değişken kesit kalınlıklarına sahip aks yuvası parçası kendi proses şartlarında incelendiğinde, ince cidar kalınlıklarına sahip olan bölgelerin kalın cidar kalınlığına sahip bölgelerine göre daha yüksek sertlik değerlerine sahip olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 55. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki sertlik değerleri

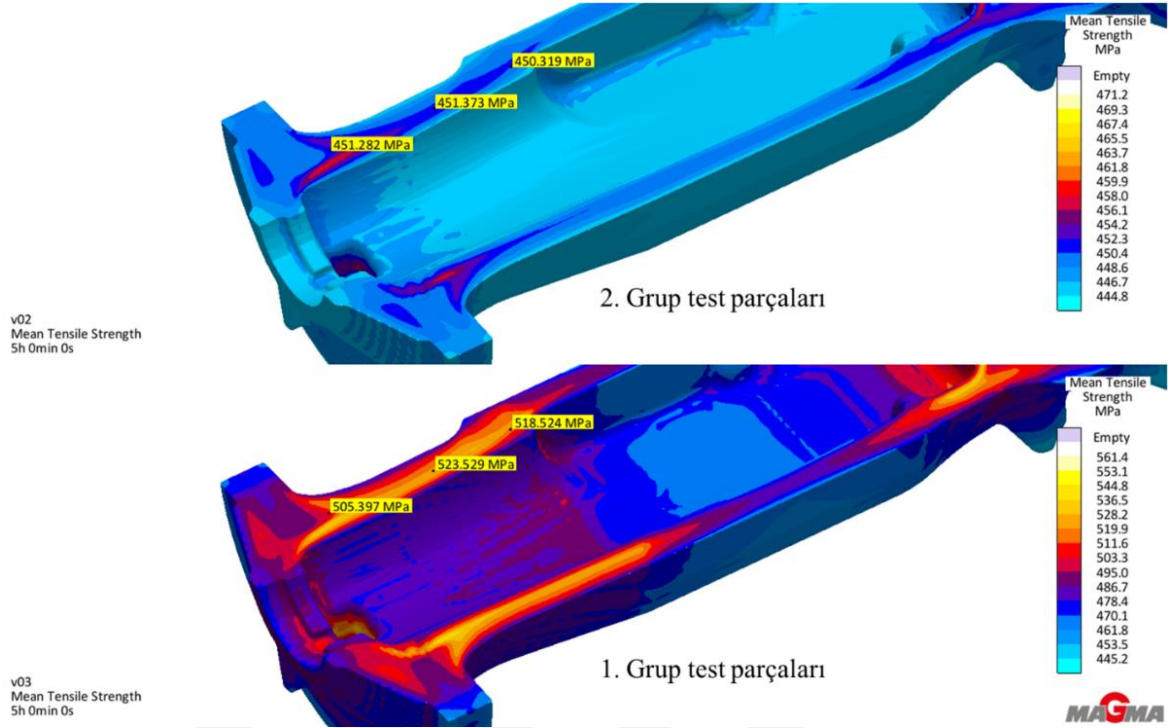
Magmasoft programında dökümü gerçekleştirilen parçanın istenilen bölgeye ait kısımlarından minimum, ortalama, maksimum; çekme dayanımı, akma dayanımı ve yüzde uzama değerleri görülebilmektedir. Dökümhaneler özelinde kullanılan döküm ve aşılama sistemine göre yapılan ön çalışmalar ile programdan alınan mekanik değerler maksimum, minimum veya ortalama değerlerinden biri olarak seçilir. Döküm firmasında yapılan ön çalışmalar sonucunda bu değere en uygun sonucunun ortalama değeri olduğu gözlemlenmiş ve program bu değerlere göre kalibre edilmiştir.

Şekil 56'da tasarımı yapılan test parçasına ait belirlenen kesitlerdeki yüzde uzama değerleri verilmektedir. Bu değerler incelendiğinde 240 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 2. grup döküm parçalarının yüzde uzama değerleri 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 1. grup döküm parçalarına göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Parçaların yüzde uzama değerleri sertlik değerleri ile karşılaştırıldığında; yüksek sertlik değerlerine sahip olan test parçaları, düşük sertlik değerlerine sahip olan test parçalarına göre daha düşük oranda uzama eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir. Dolayısıyla artış gösteren sertlik değerleri, uzama değerleri ile zıt bir ilişki halinde olduğu tespit edilmiştir.



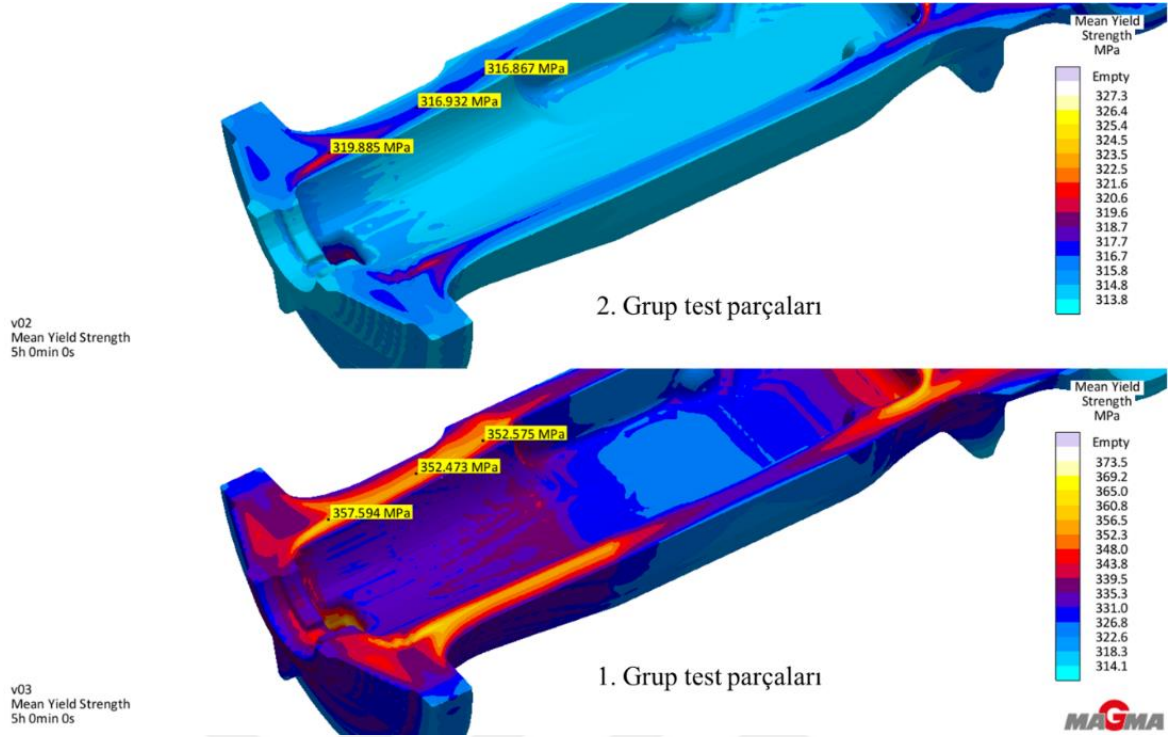
Şekil 56. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki yüzde uzama değerleri

Şekil 57’de tasarımı yapılan test parçasına ait belirlenen kesitlerdeki çekme mukavemeti değerleri verilmektedir. Bu değerler incelendiğinde 240 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 2. grup döküm parçalarının çekme mukavemeti değerleri 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 1. grup döküm parçalarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Çekme dayanımı malzemenin taşıyabileceği maksimum yük altında dayanımını temsil etmektedir. Dolayısıyla iki grup kıyaslandığında birinci gruba ait deney parçaları, ikinci gruba ait deney parçalarına göre daha yüksek dayanım özelliği sergilemektedir. Fakat bu özelliğin tek başına değerlendirilmesi doğru değildir. KGDD standartları doğrultusunda parçaların kullanım yerleri ve amaçları bakımından optimum düzeyde özellik oranları belirlenmiştir. Üretimi gerçekleştirilmiş ya da gerçekleştirilecek olan parçaların belirlenen mekanik özelliklerin standartları karşılaması ve optimum düzeyde tutulması gerekmektedir. Dolayısıyla uluslararası kuruluşlarca belirlenmiş olan standartlar göz önüne alınarak malzeme dayanımları, sertlik ve yüzde uzama değerleri birlikte göz önüne alınarak değerlendirilmesi en doğru yaklaşımdır.



Şekil 57. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki çekme mukavemeti değerleri

Şekil 58’de tasarımı yapılan test parçasına ait belirlenen kesitlerdeki akma mukavemeti değerleri verilmektedir. Bu değerler incelendiğinde 240 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 2. grup döküm parçalarının çekme mukavemeti değerleri 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan 1. grup döküm parçalarına göre daha düşük olduğu görülmektedir. Deney parçalarına ait malzeme dayanımı değerleri incelendiğinde, çekme ve akma dayanımı değerlerinde oransal bir değişim olduğu görülmektedir. Ayrıca parçada artış gösteren sertlik değerleri, malzeme dayanımına olumlu yönde etki ederken yüzde uzama değerlerinde olumsuz yönde bir etki ettiği görülmektedir.



Şekil 58. Birinci ve ikinci gruba ait deney parçalarının belirlenen kritik kesitindeki akma mukavemeti değerleri

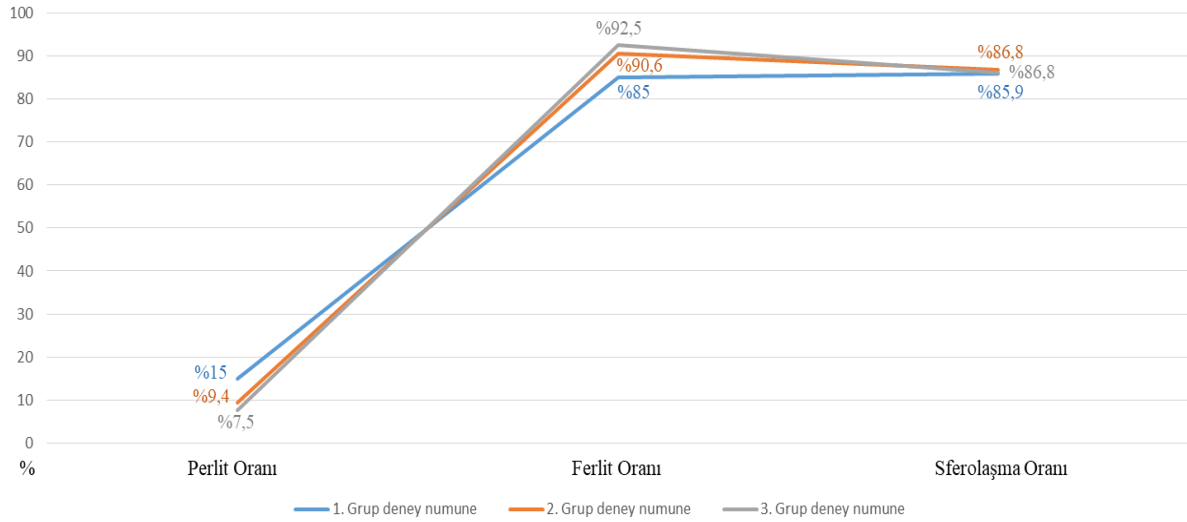
3.2. Mikroyapı Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan, aynı bileşim farklı kalıp bozma süreleri ile dökümü gerçekleştirilen ve daha sonra yumuşatma tavlaması işlemine tabii tutularak üç farklı grup halinde hazırlanan numunelerinin Tablo 11’de sferolaşma ve faz oranları gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere belirtilen üç farklı gruba ait deney numunelerinin sferolaşma oranları aynıdır. Bunun nedeni sferolaşmanın döküm esnasında kimyasal bileşim ve magnezyum tretmanında oluşan bir faktör oluşudur. Deneyde dökümü gerçekleştirilmiş olan parçalardaki farklı soğuma hızı veya parçalara uygulanan yumuşatma tavlaması sferolaşma oranında değişikliğe yol açmaz. Fakat mikroyapılarda tane sınırındaki gerilmeler ve fazlar soğuma parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Tablo 11’de belirtilen üç farklı gruba ait dört farklı bölgeden alınan numunelerinin sferolaşma, perlit ve ferrit yüzdelik oranları Şekil 59’daki grafikte gösterilmektedir.

Tablo 11. Üç farklı gruba ait deney parçalarındaki 4 farklı bölgeden alınan numunelerin sferolaşma ve perlit oranı değerleri

NUMUNE	BÖLGE	% SFEROLAŞMA	% PERLİT
1. Grup	1-Bölge Çubuk – Üst Derece	85,5	15
	2-Bölge Çubuk – Alt Derece	86,7	20
	3-Bölge Çubuk – Üst Derece	86,3	15
	4-Bölge Çubuk – Alt Derece	85,2	10
	ORTALAMA	85,9	15
2. Grup	1-Bölge Çubuk – Üst Derece	85,6	8,1
	2-Bölge Çubuk – Alt Derece	89,4	8,8
	3-Bölge Çubuk – Üst Derece	85,9	10
	4-Bölge Çubuk – Alt Derece	86,6	8,6
	ORTALAMA	86,8	9,4
3. Grup	1-Bölge Çubuk – Üst Derece	85,9	5
	2-Bölge Çubuk – Alt Derece	85,8	5
	3-Bölge Çubuk – Üst Derece	87,5	10
	4-Bölge Çubuk – Alt Derece	86,3	10
	ORTALAMA	86,2	7,5



Şekil 59. Üç farklı gruba ait deney parçalarının 4 farklı bölgeden alınan numunelerinin ortalama perlit, ferrit ve sferolaşma yüzdelерinin şematik gösterimi

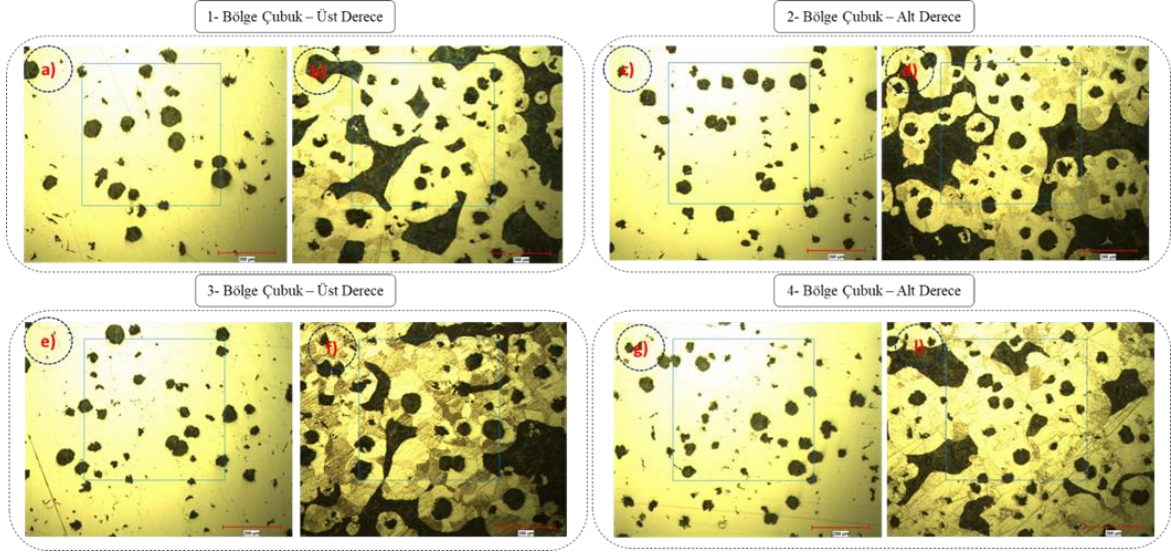
Deneysel çalışmalar içerisinde belirtilmiş (üç farklı gruptan oluşan değişken kesit kalınlıklarına sahip deney parçaları) her bir gruba ait deney parçalarının Şekil 40'da belirtilen dört farklı mikroyapı bölgelerinden alınan numunelerin mikroyapı resimleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Gerçekleştirilen mikroyapı incelemelerinde parçanın kesit kalınlığına bağlı olarak lamel kalınlıklarının değiştiği gözlenmiştir. Kalın kesitli bölgelerde grafit yapısı büyümek için zaman bulmuş yani katılaşma daha geç tamamlanmıştır, dolayısıyla daha kaba yapılar oluşmuştur. Tespit edilen bu durum simülasyon programından alınan katılaşma zamanı verileri ile eşleşmektedir.

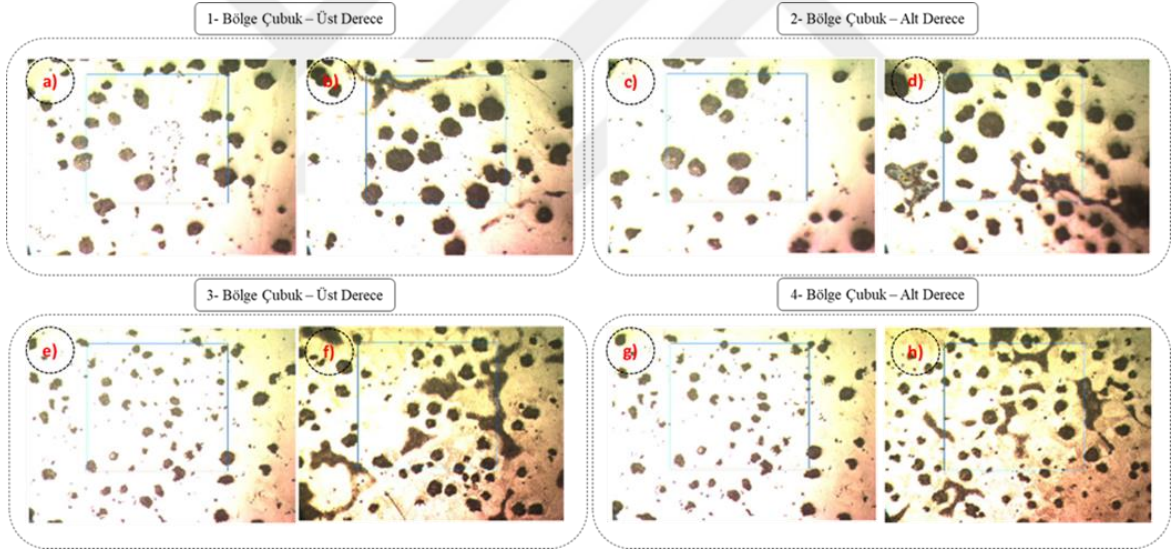
Genel olarak numunelere ait mikroyapılarda grafit etrafında ferrit olduğu görülmektedir. Bu ferrit halkalarının yanı sıra koyu renkle gözüken kısımlarda perlit oluşmuştur.

Sonuçlar incelendiğinde birinci gruba ait 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan test parçaları, ikinci gruba ait yani 240 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan test parçalarına göre perlit oranlarında bir artış gözlemlenmiştir. Üçüncü grup numunelerinin; 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan deney parçalarının yumuşatma tavlama işlemi sonrası elde edildiği yukarıda belirtilmiştir. Bu gruba ait deney numuneleri incelendiğinde ise birinci grup deney numunelerine göre perlit oranlarında ortalama % 7,5 oranında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. İkinci ve üçüncü grup deney numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında üçüncü grup deney numunelerinin ikinci grup deney numunelerine göre perlit oranına göre ortalama % 5,6'lık bir oranda azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu perlit oranlarındaki değişiklik mekanik değerler üzerinde farklılıklara yol açacağı barizdir. Üçüncü grup deney numunelerinin uygulanan ısıtma işlemi kaynaklı mikroyapılarında tane sınırlarındaki gerilmeler ve fazlar ve diğer fazlar olan perlit fazı parçalandığından tane sınırındaki gerilmeler düşmüştür ve dolayısıyla yüzde perlit oranı azalmıştır.

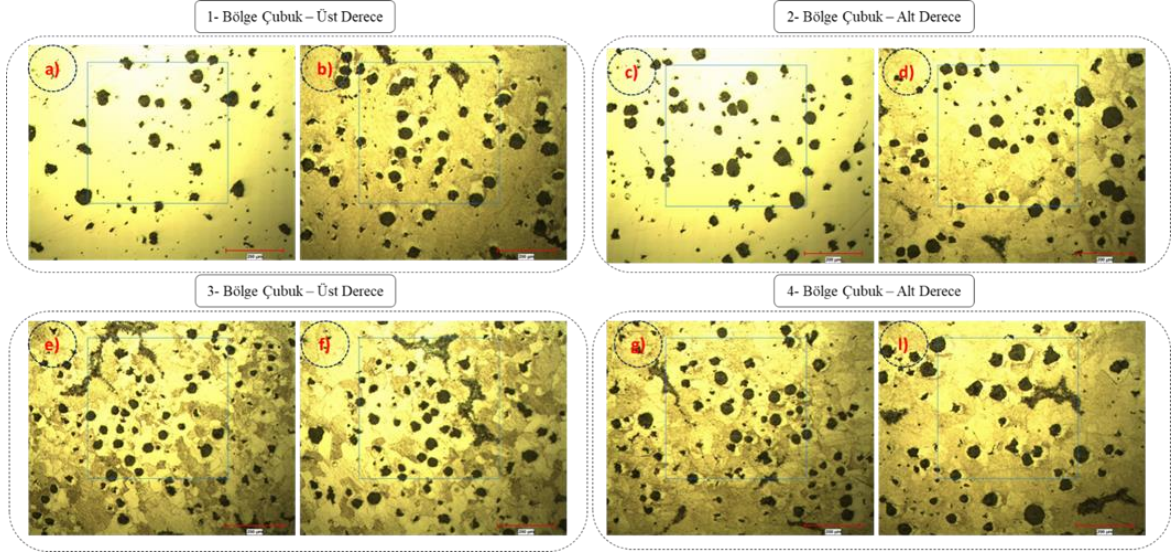
Aşağıdaki şekillerde üç farklı grup dört farklı bölgeden alınan numunelere ait incelemelerde 100X büyütmede çekilmiş mikroyapı fotoğrafları verilmiştir. Her bir mikroyapı bölgesinin sağ tarafında bulunan resimler dağlanmış mikroyapı görüntülerini göstermektedir.



Şekil 60. Birinci grup deney parçalarına ait dört farklı bölgeden alınan numunelerin mikroyapı görüntüleri



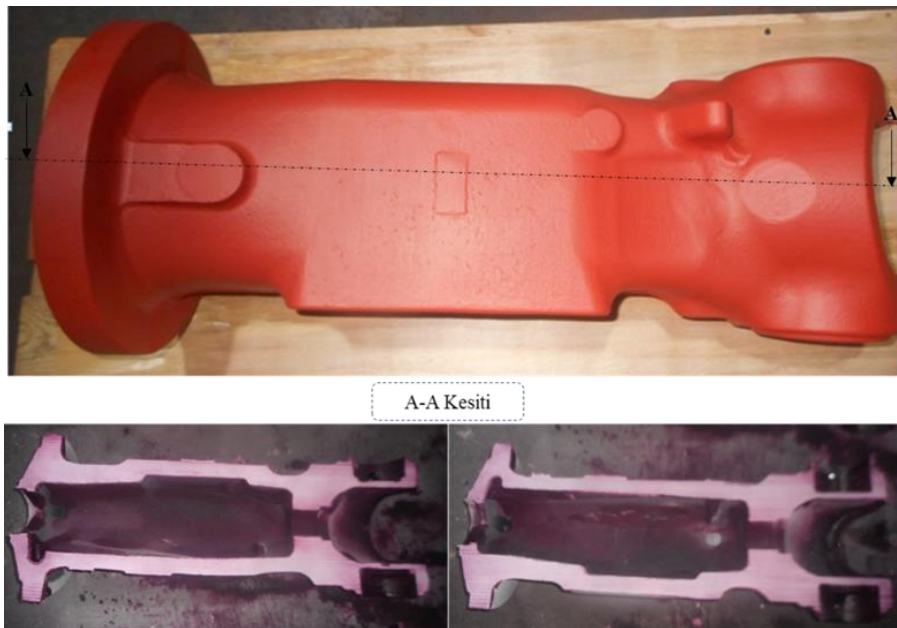
Şekil 61. İkinci grup deney parçalarına ait dört farklı bölgeden alınan numunelerin mikroyapı görüntüleri



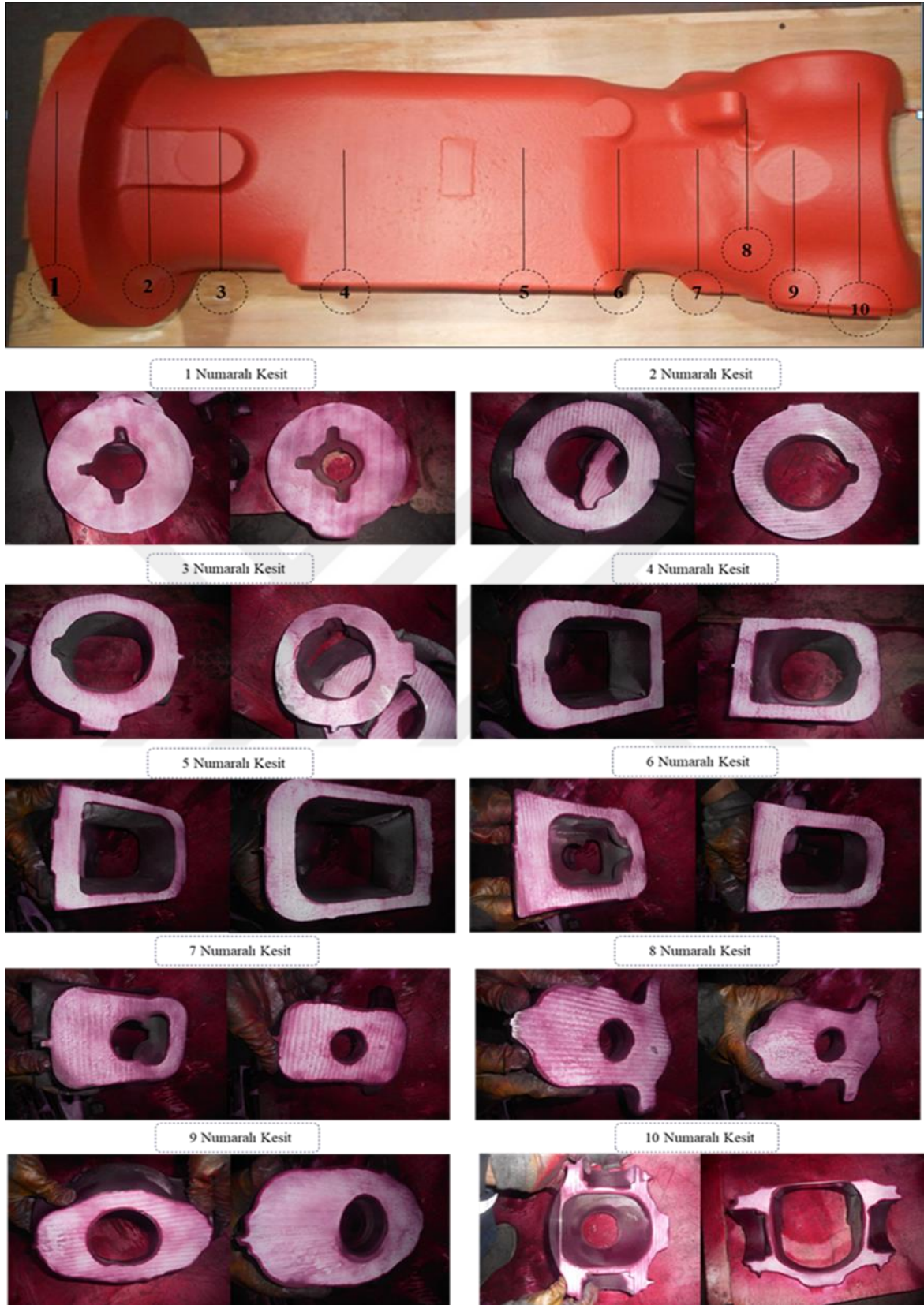
Şekil 62. Üçüncü grup deney parçalarına ait dört farklı bölgeden alınan numunelerin mikroyapı görüntüleri

3.3. Penetran Testi Sonuçları

Şekil 63 ve 64'te deney parçası üzerinde yapılan penetran testi sonuçları görülmektedir. Şekilden de görüldüğü üzere deney parçasına ait belirlenen kritik kesitlerde herhangi bir çekinti riskiyle karşılaşılmamıştır.



Şekil 63. Deney parçasına ait belirtilen A-A kesiti ve penetran testi yüzey kontrollerinin görüntüsü



Şekil 64. Deney parçasına ait belirtilen 10 bölgeye ait kesitler ve penetran testi yüzey kontrollerinin görüntüsü

3.4. Çekme Testi Sonuçları

Bu çalışmada kullanılan, aynı bileşim farklı kalıp bozma süreleri ile dökümü gerçekleştirilen ve daha sonra yumuşatma tavlaması işlemine tabii tutularak üç farklı grup halinde hazırlanan numunelerin çekme testi ile çekme-akma mukavemeti ve % uzama değerleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalar içerisinde belirtilen (üç farklı gruptan oluşan değişken kesit kalınlıklarına sahip deney parçaları) her bir gruba ait deney parçalarının Şekil 40'da belirtilen iki farklı çekme çubuğu bölgesinden (alt derece ve üst derece) alınan numunelerin çekme deneyi sonucunda elde edilen grafikler ve değerleri aşağıdaki şekillerde verilmektedir.

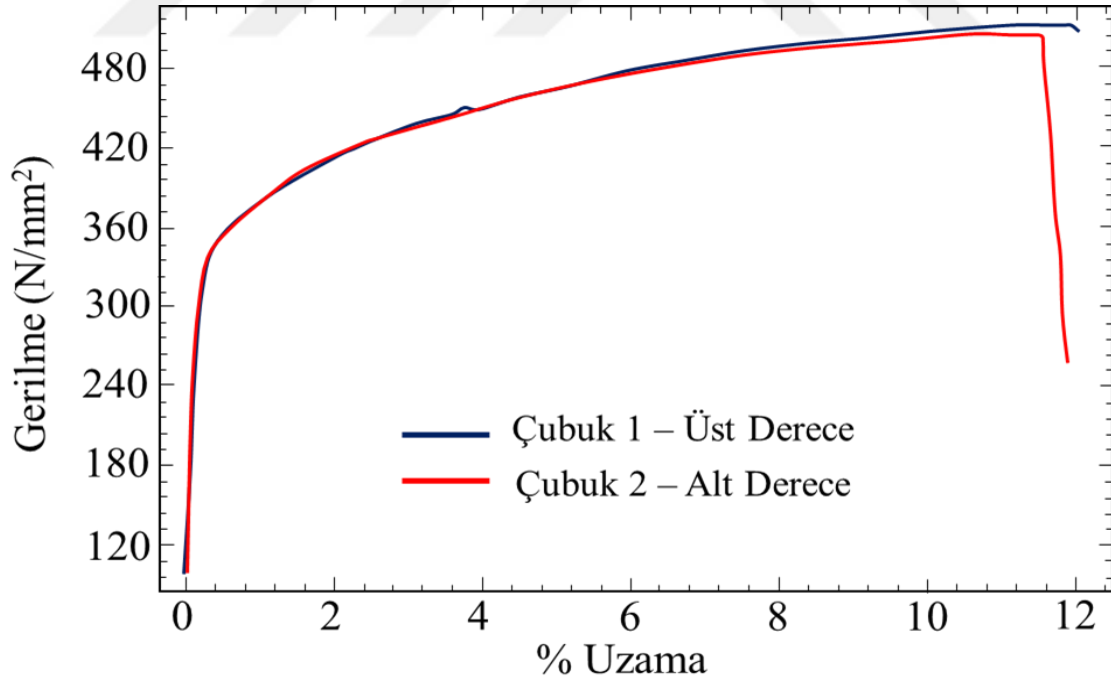
Çekme deneyi sonuçları incelendiğinde birinci gruba ait 80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan deney parçalarının, ikinci gruba ait yani 240 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan deney parçalarına göre çekme mukavemeti değerlerinde bir artış gözlemlenmiştir. En düşük çekme mukavemeti değerlerinin üçüncü grup numunelerinde (80 dk sonunda kalıp bozma işlemine tabii tutulan deney parçalarının yumuşatma tavlaması işlemi sonrası) olduğu gözlemlenmiştir. Birinci grup deney numunelerinin akma mukavemeti değerleri, ikinci ve üçüncü grup deney numunelerinin akma mukavemeti değerlerine göre daha yüksektir. İkinci ve üçüncü grup deney numunelerinin akma mukavemeti değerleri ise neredeyse aynıdır.

Deney parçalarına ait çekme çubuğu numunelerinin alındığı bölgenin duvar kalınlığı 40 mm'dir. Tablo 4'te verilen TS EN 1563:2018 standartları incelendiğinde 30 ile 60 mm kesit kalınlığı arasında kalan GGG 40 malzemeli döküm parçalarının en küçük çekme dayanımının 390 MPa, akma dayanımının 250 MPa ve yüzde uzama değerlerinin % 14 olduğu görülmektedir. Bu standart değerleri dikkate alındığında ikinci ve üçüncü grup numunelerden alınan mekanik değerlerin standartlar içerisinde olduğu görülmektedir. Birinci grup numunelerinde ise çekme ve akma mukavemeti değerleri standartları karşılıyor olmasına rağmen yüzde uzama değerleri standart değerlerin altında kalmaktadır. Tüm denemelerde aynı ürün kullanılmasına rağmen bu değişkenliğin ana nedeni döküm parçasının kesit kalınlığına göre soğuma farklılığıdır. İkinci grup deney parçalarda birinci grup deney parçalarına göre daha dengeli bir soğuma gerçekleştirilmiştir. Üçüncü deney parçaları ise yumuşatma tavlaması ile belirtilen ısı işlem şartlarında kritik sıcaklıklara çıkartılarak dengeli bir soğuma sonucu elde edilmiştir. Bu bağlamda; birinci grup deney numuneleri için tüm bu süreci destekleyici yapılan mekanik testlerde mukavemet değerlerinin

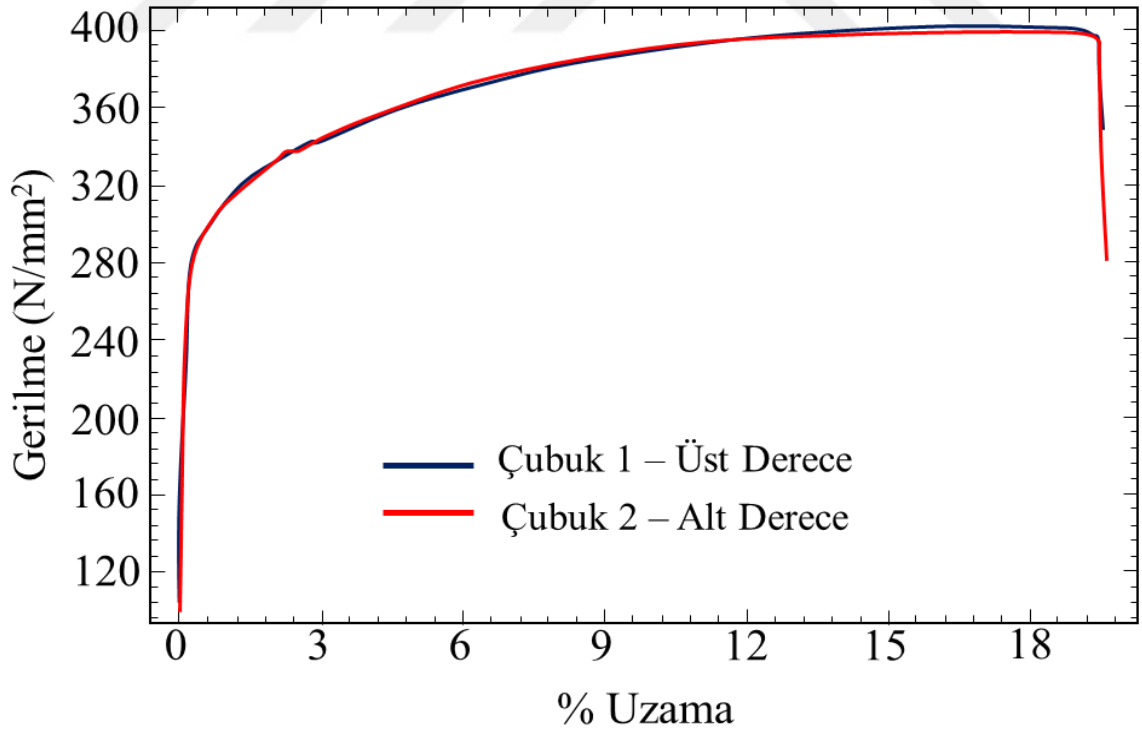
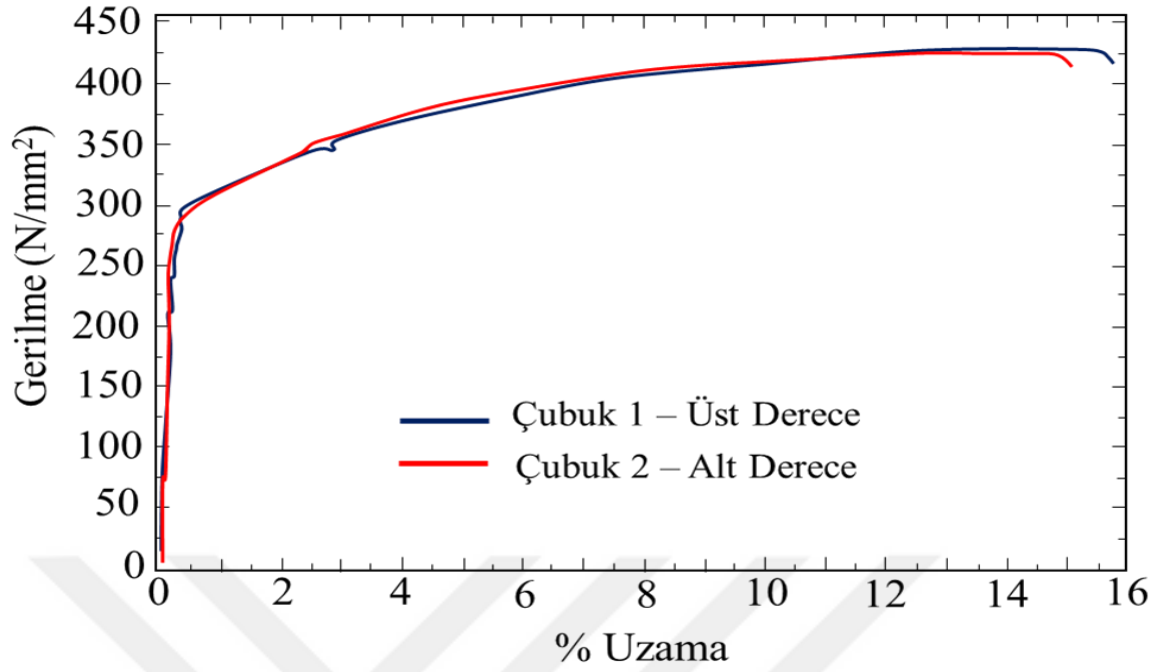
istenilen spekt değerlerine uygun olduğu yüzde uzmanın ise istenilen spekt değerlerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Tüm bu değerler simülasyon programından alınan mekanik değer verileri ile uyumludur. Gerçekleştirilen test sonuçları ile elde edilen çekme-akma dayanımı ve % uzama değerleri Tablo 12’de gösterilmektedir.

Tablo 12. Magmasoft simülasyon programındaki ve üç farklı gruba ait deney parçalarındaki 2 farklı bölgeden alınan numunelerin çekme-akma dayanımı ve % uzama değerleri

Test Parçaları	Test Bölgesi	Çekme Dayanımı (Mpa)	Akma Dayanımı (Mpa)	Uzama (%)
1. Grup Deney Numune	Üst Derece	512,19	360,62	12
	Alt Derece	516,84	365,31	12,1
2. Grup Deney Numune	Üst Derece	427,18	301,81	15,7
	Alt Derece	435,34	304,09	17,1
3. Grup Deney Numune	Üst Derece	401,88	302,06	19,6
	Alt Derece	403,95	300,25	19,6
1. Grup MagmaSoft Sonuçları	Üst Derece	523,52	352,47	14,1
	Alt Derece	523,52	352,47	14,1
2. Grup MagmaSoft Sonuçları	Üst Derece	451,37	316,93	20,4
	Alt Derece	451,37	316,93	20,4



Şekil 65. Birinci grup deney parçalarının iki farklı bölgesinden alınan numunelerin gerilme-uzama diyagramları



3.5. Sertlik Sonuçları

Numunelerin sertlik değerleri Brinell sertlik metodu ile incelenmiştir. Dökme demirler mekanik özellikleri, grafit morfolojisine ve matris yapılarına bağlıdır. Yapılan incelemelerde matris yapısındaki bulunan perlit oranındaki artışın ve grafit morfolojisindeki düzenli dağılımın sertlik değerlerini arttırdığını görülmüştür.

Döküm parçası üzerinden alınan deney numune yüzeylerinde, 3 farklı noktada Brinell sertlik deneyi yapılmıştır. Sertlik değerleri 10'ar mm aralıklarla iki kenar ve orta noktadan alınmıştır. Brinell sertlik değeri (BSD) ile elde edilen sertlik sonuçları olarak Tablo 13'te verilmiştir.

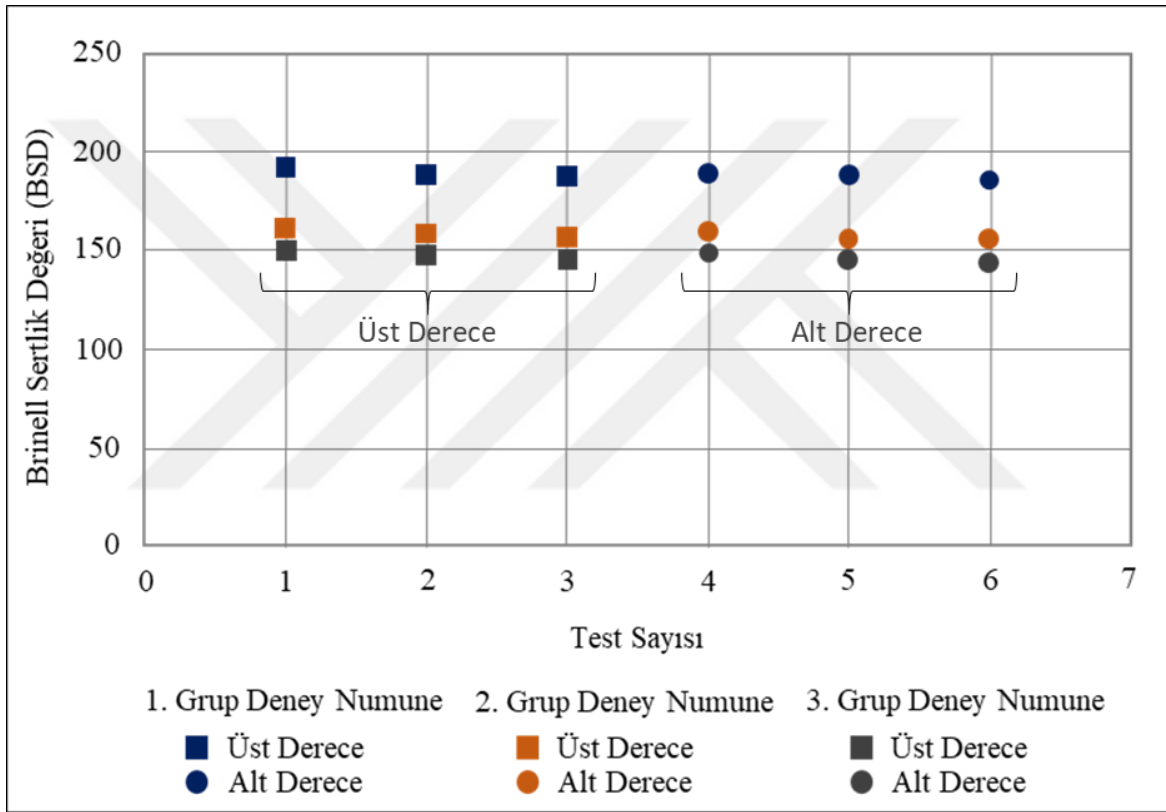
Tablo 13. Magmasoft simülasyon programındaki ve üç farklı gruba ait deney parçalarındaki 2 farklı bölgeden alınan numunelerin üç farklı noktadaki BSD olarak sertlik değerleri

Test Parçaları	Test Bölgesi	1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
1. Grup Deney Numune	Üst Derece	191	189	187	189
	Alt Derece	189	188	184	187
2. Grup Deney Numune	Üst Derece	161	158	155	158
	Alt Derece	160	156	155	157
3. Grup Deney Numune	Üst Derece	150	148	146	148
	Alt Derece	148	144	143	145
1. Grup MagmaSoft Sonuçları	Üst Derece	174	170	173	172,3
	Alt Derece	174	170	173	172,3
2. Grup MagmaSoft Sonuçları	Üst Derece	147	145	144	145,3
	Alt Derece	147	145	144	145,3

Tablo 13'te verilen sertlik sonuçları incelendiğinde döküm numunelerin alt ve üst yüzeylerinden alınan sertlik değerleri arasında yaklaşık olarak 1 ila 5 (üst derece alt derece farkı) BSD sertlik farkı gözlenmiştir. Bu farkın döküm parçasına yapılan yolluk ve besleyici dizaynı doğrultusunda; yolluk giriş bağlantısının parçanın alt kısmında olmasından ve bu bölgede katılaşma hızının parça üst kısmına nazaran daha yavaş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Üç farklı gruba ait deney parçalarının sertlik değerleri incelendiğinde alt ve üst yüzey aralarında çok bariz farklar gözlenmemiştir. Tüm bu değerler simülasyon programından alınan sertlik değer verileri ile uyumludur.

Sertlik deneylerinden elde edilen sonuçlar Şekil 68'de verilmiştir. En düşük sertlik değeri üçüncü grup deney numuneleri üzerinden alınmıştır. Bu değere en yakın değer ikinci

grup deney numunelerinde görülmektedir. Bu iki numunenin matris yapıları yaklaşık % 90 civarında ferritik olduğu için erken kalıp bozma sonrası dengesiz soğumaya maruz bırakılan deney parçalarından alınan birinci grup deney numunelerine göre sertlikleri daha düşük çıkmıştır. Yapılan çalışmalarda sertlik değeri en fazla üçüncü grup deney numunelerde görülmektedir. Bu numunelerde % 80 civari ferritik yapı görülmektedir. Testlerden de anlaşılacağı üzere mikroyapıda perlit oranının artışı sertliğe pozitif yönde artış sağlamaktadır.



Şekil 68. Üç farklı gruba ait deney parçalarının iki farklı bölgeden alınan numunelerinin ortalama sertlik değeri grafiği

Sertlik değerleri deney parçalarının kullanım yeri ve amacı bakımında işlenebilirliğini olumlu ya da olumsuz yönde etkilemektedir. Sertlik değerleri yüksek olan parçaların işlenebilirliği zorlaşacağından parça işleme maliyetlerinde artışlara yol açacaktır. Bu durum tedarikçi firmalar tarafından istenmeyen ve üzerinde durulan önemli hususlardan bir tanesidir. Birinci grup deney numunelerinden elde edilen sertlik değerlerinin, deney

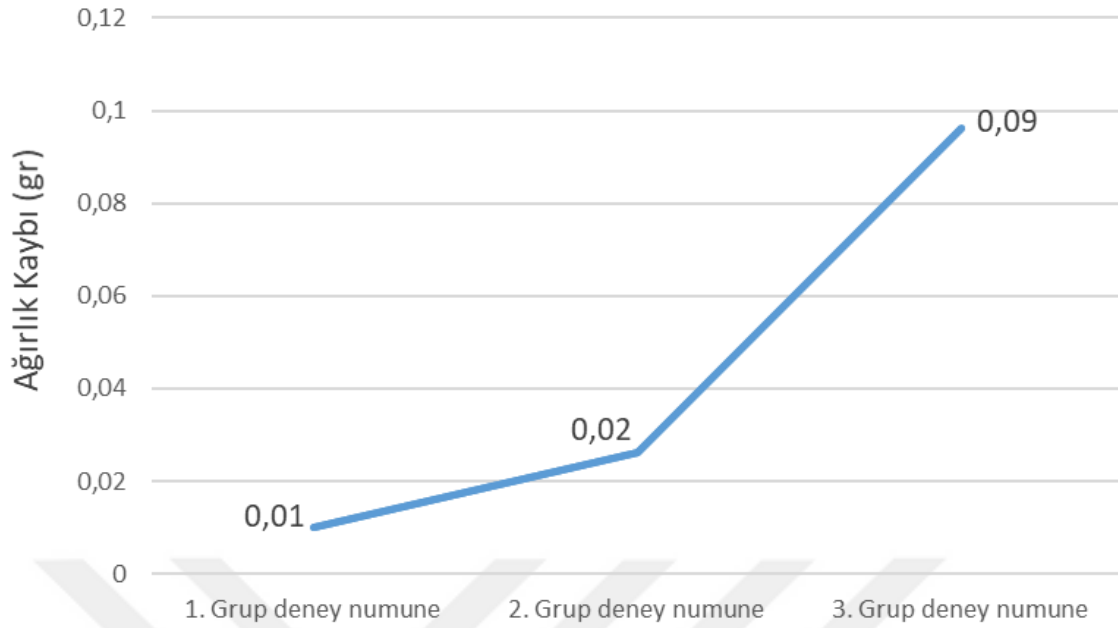
parçasının kullanım yeri ve amacı bakımından tedarikçi firmalar tarafından yeterli bulunmayacağı yani TS EN 1563:2018 standartlarını karşılamadığı gözlemlenmiştir.

3.6. Sürtünme ve Aşınma Testi Sonuçları

Tribolojinin konularından biri olan sürtünme, yüzeyleri değişken yükler altında ve sürekli hareket halinde temas eden iş makinaları parçalarında aşınmaya neden olur. İş makina parçalarında oluşması muhtemel hasarların büyük bir bölümü aşınma kaynaklıdır. Çalışma koşulları gereği kuru sürtünmenin kaçınılmaz olduğu durumlarda makina elemanlarının ömrünün uzun olması için aşınma direnci yüksek malzemeler tercih sebebidir. Diğer yandan sürtünme kaynaklı aşınmaya bağlı bir hasar meydana gelmemesi için söz konusu durumun öngörülebilmesi sonucu üretilen malzemelerde çeşitli önlemler alınarak parça ömürleri uzatılabilir.

Bu çalışma kapsamında hazırlanan numunelerin, dairesel-kayma aşınma testi ile aşınma davranışları incelenmiş ve kuru sürtünmeli aşınma testleri ile sürtünme kuvvetleri tespit edilmiştir. Deney sonuçları doğrultusunda deney malzemesinin aşınma karakteristikleri hakkında yorumlamalar yapılmıştır. Deneyler sırasında sürtünme yolu uzunluğu ve ölçülen sürtünme kuvvetine bağlı ağırlık kaybından hesaplanan aşınma oranı, tek giriş-tek çıkışlı aşınma deneyinin giriş ve çıkış değişkenleri olarak kabul edilmiş ve her bir dairesel-kayma testi için alınan değerler kaydedilmiştir. Elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

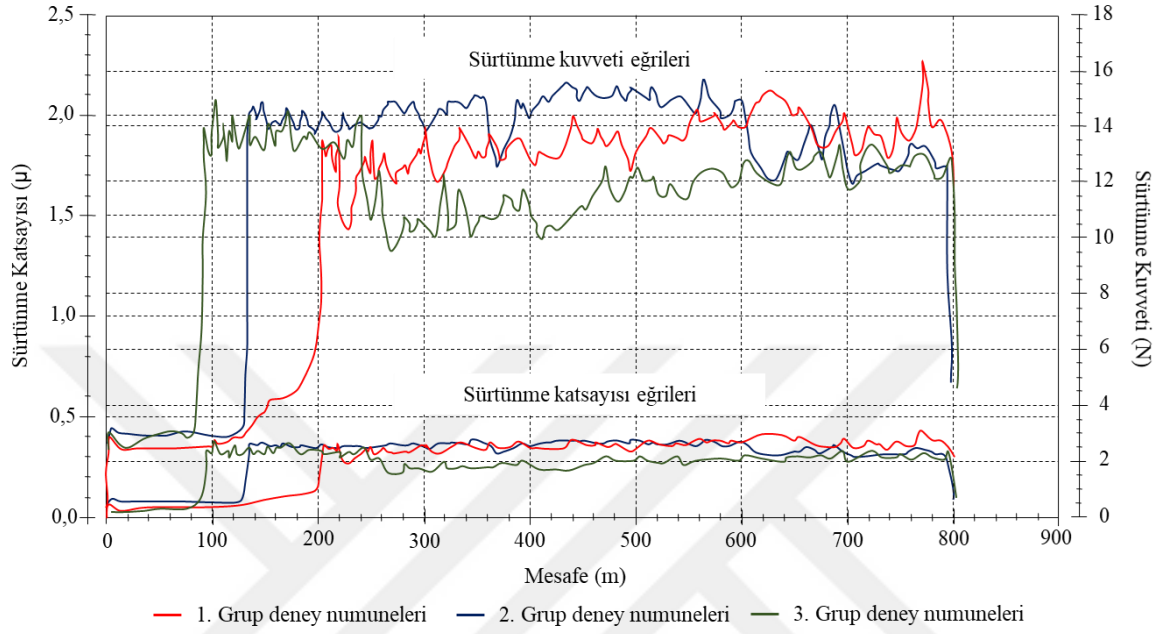
Üç farklı gruba ait döküm durumundaki deney parçalarından alınan numunelerin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ağırlıkları Şekil 69'da gösterilmiştir. Birinci gruba ait numunede deney başlangıç ağırlığı 34,9065 gr iken 0,01 gr ağırlık kaybına uğrayarak 34,8965 gr ölçülmüştür. İkinci gruba ait numunede deney başlangıç ağırlığı 34,5202 gr iken deney sonunda 0,0263 gr ağırlık kaybına uğrayarak 34,4939 gr ölçülmüştür. Üçüncü gruba ait numunede ise deney başlangıç ağırlığı 34,1870 gr iken 0,0962 gr ağırlık kaybına uğrayarak 34,0908 gr ölçülmüştür. Sonuçlar incelendiğinde en fazla ağırlık kaybına uğrayan numunenin üçüncü gruba ait deney parçalarından, en az ağırlık kaybına uğrayan numunenin birinci gruba ait deney parçalarından alınan numunelerden elde edildiği tespit edilmiştir. Bu sonuçlar sertlik değerleriyle karşılaştırıldığında sertlik değeri yüksek olan deney parçalarında aşınma kaynaklı ağırlık kaybının düşük olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 69. Üç farklı gruba ait deney parçalarından alınan numunelerin aşınma deneyi öncesi ve sonrası ölçülen ağırlık kaybı grafiği

Deney verilerinden elde edilen sonuçlardan çizilen grafiklerde sürtünme katsayısı mesafe grafiğinden üç gruba ait numunelerin 40 N yük altında 800 m mesafede sürtünme katsayı değerleri birbirlerine çok yakındır. Deney sonuçlarından en yüksek, düşük ve ortalama sürtünme katsayısı değerleri elde edilmektedir. Ortalama sürtünme katsayısı değerleri dikkate alındığında 0,39 μ ile en yüksek değer birinci gruba ait numuneden ölçülmüştür. En düşük değer 0,33 μ olan ikinci grup numunesinden alınmıştır. Üçüncü grup numunesinden elde edilen ortalama sürtünme katsayısı değeri ise 0,35 μ olarak tespit edilmiştir. Üç gruba ait deneylerde ölçülen en yüksek sıcaklık değeri 326,5 °C'dır. Bu sonuçlar sertlik değerleriyle karşılaştırıldığında sertlik değeri yüksek olan deney parçalarında sürtünme katsayısının da yüksek olması beklenmektedir. Fakat gerçekleştirilen deney belirli bir mesafe aralığında gerçekleştirildiğinden ve bu mesafe aralığında elde edilen değerlerin ortalaması alındığından dolayı üçüncü gruba ait deney numunelerinden alınan sürtünme katsayısı değeri ikinci gruba ait deney numunelerinden alınan sürtünme katsayısı değerinden yüksek çıkmıştır. Sonuçlar genel olarak karşılaştırıldığında değerlerin birbirlerine çok yakın olduğu tespit edilmiş, yüzey pürüzlülüğü kaynaklı belirli noktalarda artma/azalma yönünde eğilim sergiledikleri gözlemlenmiştir. Deney sonuçlarında elde

edilen sürtünme katsayısı-mesafe ve sürtünme kuvveti-mesafe grafikleri Şekil 70’de gösterilmektedir.



Şekil 70. Üç farklı gruba ait deney parçalarından alınan numunelerin sürtünme katsayısı-mesafe ve sürtünme kuvveti-mesafe grafiği

4. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmanın belirlenen amacı doğrultusunda dökümü gerçekleştirilen bir aks yuvası parçasının Magmasoft simülasyon programından elde edilen verilerin ve üç farklı grup halinde hazırlanan numunelerin mikroyapı, sertlik, yüzde uzama, akma-çekme mukavemetleri ve dairesel aşınma davranışlarının incelenmesinden elde edilen genel sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. Üretimin gerçekleştirildiği dökümhane şartları ile kalibrasyonu yapılmış Magmasoft simülasyon programından elde edilen sonuçların gerçek döküm numunelerinden alınan sonuçlarla karşılaştırıldığında değerlerin uyumlu olduğu görülmektedir.
2. Magmasoft simülasyon programında yapılan ön çalışmalar ile hesaplanan ve elde edilen modelleme çalışmaları sonucu dökümü gerçekleştirilen deney parçasına ait belirlenen kritik kesitlerde herhangi bir çekinti (boşluk) riskiyle karşılaşılmadığı gösterilmiştir.
3. Dökümü gerçekleştirilen parçalarda tüm şartlar aynı olmasına rağmen soğuma parametrelerindeki değişkenlik nihai parçalarda mekanik bozukluklara yol açmaktadır.
4. Döküm sonrası kalıp bozma sıcaklığının 450-500 °C aralığında nihai faz dönüşümünü tamamlamış şekilde kalıptan ayrılan parçaların mekanik değerlerinin standartlar uygun olduğu, kalıp bozma sıcaklığı 750 °C civarında nihai faz dönüşümlerinin devam ettiği ve direk oda sıcaklığı atmosferinde (10-25 °C) hızlı bir soğumaya maruz kalan parçaların mekanik değerlerinin standartlara uygun olmadığı tespit edilmiştir.
5. Dökümü gerçekleştirilip dengesiz soğuma şartlarında üretilen ve dolayısıyla mekanik değerlerinin standart değerleri karşılamayacağı parçalar yumuşatma tavlaması ile standartlara uygun hale getirilebilmektedir.
6. Deneyde dökümü gerçekleştirilmiş olan parçalardaki farklı soğuma hızı veya parçalara uygulanan yumuşatma tavlaması sferolaşma oranında değişikliğe yol açmaz. Fakat mikroyapılarda tane sınırındaki gerilmeler ve fazlar soğuma parametrelerine bağlı olarak değişkenlik gösterir.
7. Gerçekleştirilen mikroyapı incelemelerinde parçanın değişken kesit kalınlığına bağlı olarak lamel kalınlıklarında farklılık gözlenmiştir. Kesiti kalın bölgelerde katılaşma daha geç tamamlandığından grafit yapısı büyümüş ve daha kaba yapılar oluşmuştur.

8. Mikroyapı sonuçları incelendiğinde birinci gruba ait numunelerin, ikinci gruba ait numunelere göre perlit oranlarında bir artış gözlemlenmiştir. Üçüncü grup numuneler incelendiğinde ise birinci grup deneylerine göre perlit oranlarında ortalama % 7,5 oranında bir azalma olduğu gözlemlenmiştir. İkinci ve üçüncü grup deney numuneleri kendi aralarında kıyaslandığında üçüncü grup deney numunelerinin ikinci grup deney numunelerine göre perlit oranına göre ortalama % 5,6'lık bir oranda azalma olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu perlit oranlarındaki değişiklik mekanik değerler üzerinde farklılıklara yol açmıştır.
9. Üçüncü grup deney numunelerinin uygulanan ısı işlem kaynaklı mikroyapılarında tane sınırlarındaki gerilmeler ve fazlar ve diğer fazlar olan perlit fazı parçalandığından tane sınırlarındaki gerilmeler düşmüştür ve dolayısıyla yüzde perlit oranı azalmıştır.
10. Birinci gruba ait numunelerin, ikinci gruba ait numunelere göre çekme mukavemeti değerleri daha yüksektir. En düşük çekme mukavemeti değerlerinin üçüncü grup numunelerinde olduğu gözlemlenmiştir.
11. Birinci gruba ait numunelerin, ikinci gruba ait numunelere göre akma mukavemeti değerleri daha yüksektir. İkinci ve üçüncü grup deney numunelerinin akma mukavemeti değerleri ise neredeyse aynıdır.
12. Malzemeye ait grafit morfolojisindeki dağılımın düzenli olması ve matris yapısındaki perlit oranının artışı parçalardaki sertlik değerlerinde artışlara yol açmıştır. En düşük sertlik değeri üçüncü grup deney numuneleri üzerinden alınmıştır. Bu değere en yakın değer ikinci grup deney numunelerinde tespit edilmiştir. Bu iki numunenin matris yapıları incelendiğinde yaklaşık % 90 civarında ferritik yapı sergiledikleri görülmektedir. Sertlik değeri en fazla birinci grup deney numunelerde görülmektedir. Bu numunelerde % 80 civari ferritik yapı görülmektedir. Deney sonuçlarından anlaşılabileceği üzere mikroyapıda perlit oranının artışı sertliğe pozitif yönde artış sağlamaktadır.
13. Döküm parçalarının alt ve üst derece yüzeylerinden alınan numunelerin sertlik değerleri arasında yaklaşık olarak 1 ila 5 (üst derece alt derece farkı) BSD sertlik farkı gözlenmiştir. Bu farkın; döküm parçası için tasarlanan yolluk dizaynındaki girişlerin alt kısımda olmasından dolayı, katılma hızının parçanın alt bölgesinde üst bölgeye göre daha yavaş olması sonucu olduğu tespit edilmiştir.
14. Aşınma deneyi sonuçları incelendiğinde en fazla ağırlık kaybına uğrayan numunenin üçüncü gruba ait deney parçasından, en az ağırlık kaybına uğrayan numunenin birinci gruba ait deney parçasından alınan numunelerden elde edildiği tespit edilmiştir. Bu

sonuçlar sertlik değerleriyle karşılaştırıldığında sertlik değeri yüksek olan deney parçalarında aşınma kaynaklı ağırlık kaybının düşük olduğu gözlemlenmiştir.

15. Numunelere ait sürtünme katsayısı değerleri incelendiğinde, 0,39 μ ile en yüksek değer birinci gruba ait numuneden llmřtir. En düşük değer 0,33 μ olan ikinci grup numunesinden alınmıştır. nc grup numunesinden elde edilen sürtünme katsayısı değeri ise 0,35 μ olarak tespit edilmiştir. Dolayısıyla parçalarda tespit edilen sertlik değerindeki artış sürtünme katsayısına pozitif yönde etki etmektedir.



5. ÖNERİLER

1. Farklı döküm parçaları ile değişken soğuma parametrelerine maruz kalarak üretilen numunelerin mikroyapısal karakterizasyonu ile mekanik ve tribolojik özellikleri incelenebilir.
2. Numunelerin dairesel aşınma testleri, farklı çalışma ortamlarında uygulanabilir.
3. Belirtilen şartlarda üretimi gerçekleştirilen numunelerin daha farklı değişkenliklerle üretimi gerçekleştirilebilir.
4. Aynı şartlar altında üretilen döküm parçalarına farklı tavlama ısı işlemi uygulanabilir.
5. Yumuşatma tavlama ısı işlemine tabii tutulan numunelerin yorulma, korozyon, darbe veya basma dayanımları incelenebilir.
6. Farklı simülasyon programları kullanılarak elde edilen değerler kıyaslanabilir.
7. Fire olarak kabul edilen nihai ürünün yumuşatma tavlama ısı işlemi ile iyileştirilmesi sonucu oluşan maliyet analizleri kıyaslanabilir.

6. KAYNAKLAR

1. <https://www.tudoksad.org.tr/genel-bakis-ve-onemi.html>, Döküm Sektörü Genel Bakış ve Önemi, Tarih: 20:31, 17 Ocak 2022.
2. Koçhisar, B. Bir Döküm Fabrikasında Fiziksel ve Kimyasal Ortam Faktörlerinin İş Sağlığı ve Güvenliğine Göre İncelenmesi-Kaynak, Ortam Ve Alıcıdaki Önlemler, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 2010.
3. Şahin, O., Özay, M., E., Uçan, R., Dökümhane Maça Üretimi Çalışmalarında İş Sağlığı ve Güvenliği, Birinci Baskı, (2021) 1-15, İstanbul.
4. Çelik, Ö., Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2001.
5. Karaman, S., Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (GGG 40, GGG 50, GGG 60, GGG 70) Üretim Sürecinin Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne, 2011.
6. Öztürk, E., Östemperleme Sıcaklığının Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, Konya Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2019.
7. Gökmeşe, H., Karadağ, H., B., Bülbül, Ş., Farklı Sıcaklıklarda Uygulanan Normalizasyon Isıl İşlem Şartlarının Küresel Grafitli Dökme Demir Mikro Yapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi, İkinci Baskı, International Journal of Engineering Research and Development, Türkiye, 2018.
8. Aytaçoğlu, L., C., Dökme Demirlerde Termal Analiz ve Matematiksel Yaklaşım, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2012.
9. Sağlam, D., Dökme Demirlerin Aşınma Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
10. Labrecque, C. ve Gagne, M., Ductile Iron: Fifty years of continuous development, Canadian Metallurgical Quarterly, 37 (1998) 343-378.
11. Sevgi, E., Çulha, O., Isıl İşlem Şartlarının Küresel Grafitli Dökme Demirlere Etkisi, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi 23 (2021) 1033-1048.
12. G.N.J., G., An Introduction to the mechanical Properties of Nodular Cast Iron, Retrieved from BCIRA, 2003.
13. Akın, U., Kobilerde ve Mikro İşletmelerde Demir Döküm Sanayi Sektör Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2014.

14. Varinoğlu, S., Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Üretimi, Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Sakarya, 2004.
15. Çavuşoğlu, E.N., Döküm Teknolojisi, 1. İstanbul: İTÜ Ofset Atölyesi, 1992.
16. Öztürk, B., Fittings Üretiminde Kullanılan Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Soğuma Hızının Etkisiyle Kesit Kalınlığına Bağlı Mikroyapı ve Sertlik Değişimlerinin İncelenmesi, Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 2013.
17. Çelik, O., N., Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Cu, Ni ve Mo Alaşım Elementlerinin Östemperleme Sonucu Beynit Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi ve Sinirsel Ağ Modeli ile Değerlendirilmesi, Doktora Tezi, Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 1996.
18. Kuş, H., Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışı, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 2007.
19. Kılınç, B., GGG 50 Sınıfı Dökme Demire Bakır İlavesinin Mekanik Özelliklere Etkisi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2009.
20. Albayrak, Ö., Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Porozite Oluşumunun Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Mersin Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mersin, 2001.
21. Kırçalı, K., Farklı Matrik Yapılarda Sahip Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Mekanik ve İşlenebilirlik Özelliklerinin Araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, 2006.
22. Akça, C., Östemperlenmiş Küresel grafitli Dökme Demirelerde Alaşım Elementlerinin Östenit–Martenzit Dönüşümüne Etkisi, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2005.
23. Yazıcı, A., Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bortemperlemesi, Yüksek Lisans Tezi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Afyon, 2006.
24. Trudel, A., Gagne, M., Effect of composition and heat tretment parameters on the characteristics of austempered ductile irons. Canadion Metallurgical Quarterly, 36 (1997) 289-298.
25. Öztürk, S., Dökme Demirler Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 2017.
26. <http://www.belgeler.com/blg /lidb/19>, Küresel Grafitli Dökme Demir, Erişim Tarihi: 14:37, 7 Şubat 2022.
27. Ekinci, E., Düktil Demirlerde Aşıl原因ının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2022.
28. Rundman, K., B., Lacoviello, F., 2016. Cast Irons, Friction, 1, 3, 1-19.
29. <http://yilkondokum.com/kuresel-grafitli-dokme-demirin-tanitilmasi.html>, Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Tanıtılması, Tarih: 12.40, 21 Nisan 2022.

30. Aran, A., Lamel ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Isıl İşlemleri, Döküm Teknolojisi Seminer Notları, Makine Mühendisleri Odası, İstanbul, 1991.
31. Koç, Ş., Küresel Grafitli Dökme Demirlerde GGG 50 Mekanik Özelliklerinin Isıl İşlem ile Sağlanması, TMMOB Metalurjik Mühendisleri Odası Metalurji Dergisi, Cilt. 151, 20-27, İzmir, 2008.
32. Elliot, R., Cast Iron Technology: Butterworth-Heinemann, 1988.
33. Walton, C., J., A., I., Introduction to Heat Treating of Cast Irons, ASM Handbook 4 (1991) 667-669.
34. Iron, R., T., Titanium, 2000. Ductile Iron The Essentials of Gating and Riser Design, Üçüncü Baskı, 1-15, Canada.
35. Wlodower, R., Directional Solidification of Steel Casting, Pergamon Press, Oxford, 7 (1996) 235-242.
36. Franssman, H., Hızlı ve Doğru Yolluk ve Besleyici Dizaynı için Döküm Simülasyon Programlarının Pratik Kullanımı, Metal Dünyası, 164 (2007) 30-31.
37. Chvorinov, N., Theory of Solidification of Castings, Giesserei, 27 (1940) 177- 225.
38. Guleyupoglu, S., Casting Process Design Guidelines, AFS Transactions, 83 (1997) 869-876.
39. Brown J.R., Foseco Ferrous Foundryman's Handbook, Butterworth Heinemann Yayını, 16 (2000) 70-84.
40. <https://www.karacametal.com/dkp-sac-nedir>, Dkp Saç Çeliği, Tarih:19:13, 17 Aralık 2022.
41. Öztürk, S., Faz Diyagramları Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 2016.
42. Pürçek, G., Döküm Ders Notları, Karadeniz Teknik Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, 2008.

ÖZGEÇMİŞ

İlk, orta ve lise eğitimlerini Eskişehir’de tamamladı. 2013 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümünü kazanarak 2018 yılında Makine Mühendisi unvanı ile lisans öğrenimini tamamladı. Aynı yıl Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda yüksek lisans öğrenimine başladı. Yüksek lisans öğrenimi boyunca “GGG 40 Sfero Dökme Demirden Üretilen Bir Parçanın Döküm Simülasyonu, Mikroyapısal Karakterizasyonu ile Mekanik ve Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi” başlıklı Sanayi-Kamu İşbirliği içeren uygulamalı çalışmada araştırmacı ve tasarımcı olarak görev aldı. 2021-2023 yılları arasında Trabzon’da Hekimoğlu Döküm San. Nak. ve Tic. A.Ş. firmasında, Mühendislik departmanında, Proje Mühendisi olarak görev yaptı.