

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL DÖKME DEMİR (ADI) KRANK
MİLLERİNİN ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Hakkı Berke SOYDEMİR

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

HAZİRAN 2024

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

**ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL DÖKME DEMİR (ADI) KRANK
MİLLERİNİN ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR
YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Hakkı Berke SOYDEMİR
(503201309)**

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme ve İmalat Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

HAZİRAN 2024

ISTANBUL TECHNICAL UNIVERSITY ★ GRADUATE SCHOOL

**INVESTIGATION OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON (ADI)
CRANKSHAFTS' AUSTEMPERING HEAT TREATMENT USING THE
FINITE ELEMENT**

M.Sc. THESIS

**Hakkı Berke SOYDEMİR
(503201309)**

Department of Mechanical Engineering

Materials and Manufacture Master of Science Program

Thesis Advisor: Prof. Dr. Şafak YILMAZ

JUNE 2024

İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 503201309 numaralı Yüksek Lisans öğrencisi, "Hakkı Berke SOYDEMİR", ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL DÖKME DEMİR KRANK MİLLERİNİN (ADI) ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ" başlıklı tezini, aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı: **Prof. Dr. Şafak YILMAZ**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri: **Prof. Dr. Cemal BAYKARA**

İstanbul Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Umut KARAGÜZEL

Yıldız Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi: **24.05.2024**

Savunma Tarihi: **27.06.2024**



ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım sürecinde bana her konuda bilgi ve tecrübeleriyle yardımcı olan danışman hocam Sayın Prof. Dr. Şafak YILMAZ'a, deneysel çalışmalarımda her türlü yardım ve desteği sağlayan İ.T.Ü Metalurji ve Malzeme Bölümü Öğretim Üyesi Dr. Nuri SOLAK'a, TEKNOVAK Endüstriyel Fırın Sistemleri A.Ş. Genel Müdürü Hasan ÇEP'e, MOTUS Otomotiv A.Ş Genel Müdürü Mevlüt KAĞNICIOĞLU ve MOTUS Otomotiv A.Ş Yönetim Kurulu Üyesi Hıfı SOYDEMİR'e sonsuz saygı ve teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarım boyunca bilgileriyle sürekli beni destekleyen kıymetli arkadaşlarım Muhammet Bilal OYLUMLU'ya, Taylan YURTSEVER'e ve Canberk NAMIK'a teşekkürlerimi sunarım.

Tüm çalışmalarım esnasında, her zaman maddi ve manevi olarak yanımda olan ailem ve arkadaşlarıma teşekkür ve minnettarlıklarımı sunarım.

Haziran 2024

Hakkı Berke SOYDEMİR
(Makina Mühendisi)



İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ÖNSÖZ	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
SEMBOLLER	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ	xv
ŞEKİL LİSTESİ	xvii
ÖZET	ixx
SUMMARY	xxi
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1 Temel Kavramlar	3
2.1.1 Dökme demir malzemeler	3
2.1.2 Küresel dökme demir malzemeler.....	4
2.1.3 Östemperlenmiş küresel dökme demir malzemeler (ADI).....	5
2.1.4 ADI krank milleri	7
2.2 Östemperleme Simülasyon ve Modelleme Çalışmaları Literatür Özeti.....	8
2.3 Isıl Analiz	12
2.3.1 Isı geçişi denklemleri.....	12
2.3.2 Başlangıç ve sınır koşulları	13
2.3.3 Sonlu eleman formülasyonu	13
2.4 Metalurjik Analiz	16
2.4.1 Katı yapılarda faz dönüşümü kinetiği	16
2.4.2 ZSD ve CCT diyagramları	16
2.5 Isıl Karakterizasyon Yöntemleri.....	17
2.5.1 DSC analizi.....	18
2.5.2 Dilatometre analizi	18
2.5.3 LFY analizi.....	19
2.5.4 Isı taşınım katsayısının hesaplanması.....	20
3. MALZEME VE METOT	23
3.1 Malzeme ve Numunelerin Hazırlanması.....	23
3.2 Simülasyon Çalışmaları İçin Girdi Verilerinin Bulunması	23
3.2.1 DSC analizi.....	24
3.2.2 Dilatometre analizi	24
3.2.3 LFY analizi.....	25
3.2.4 Isı taşınım katsayısının hesaplanması.....	25
3.3 Simülasyon Çalışmaları	27
3.3.1 ABAQUS ısıl analiz	28
3.3.2 Isıl analizde malzeme tanımlama	28
3.3.3 Simülasyon adımları ve başlangıç/sınır koşulları.....	28
3.3.4 Parçanın elemanlara bölünmesi (mesh atılması)	29
3.4 Isıl İşlem Çalışmaları.....	29
4. DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR	31

4.1 Analiz İçin Kullanılan Verilerin Doğrulanması	31
4.2 Sonlu Elemanlar Analizi ile Isıl Analiz Simülasyonu Sonuçları.....	32
4.3 Elemanların Soğuma Eğrileri ve İçyapı Öngörülleri	33
4.3.1 Kasnak kısmında içyapı oluşumunun irdelenmesi	34
4.3.2 Krank mili 1. ana yatak kısmında içyapı oluşumunun irdelenmesi.....	37
4.3.3 Volan kısmında içyapı oluşumunun irdelenmesi.....	41
5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	47
5. KAYNAKLAR.....	49
5. ÖZGEÇMİŞ.....	55



KISALTMALAR

AC1	: Östenit dönüşümü başlama sıcaklığı
AC3	: Östenit dönüşümü bitiş sıcaklığı
ADI	: Östemperlenmiş Dökme Demir (Austempered Ductile Iron)
CCT	: Sürekli Soğuma Diyagramı
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Differential Scanning Calorimeter)
LFY	: Lazer Flaş Yöntemi
PE	: Para-Equilibrium Yöntemi
SEY	: Sonlu Elemanlar Yöntemi
ZSD	: Zaman sıcaklık dönüşüm diyagramı



SEMBOLLER

C_p	: Isı Kapasitesi
k	: Isı İletim Katsayısı
T	: Sıcaklık
t	: Zaman
q	: Isı Akısı
Q	: Isı Miktarı
ΔH_k	: Faz Dönüşüm Entalpisi
ξ_k	: Faz Dönüşüm Hızı
\vec{n}	: Yüzey Normali
α	: Ferrit Fazı
γ	: Östenit Fazı
m	: Kütle
ρ	: Yoğunluk
a	: Isıl yayılım katsayısı
Bi	: Biot Katsayısı
V	: Hacim
A	: Alan
L_c	: Kritik Uzunluk
h	: Isı Taşınım Katsayısı
x, y, z	: Uzunluk Bileşenleri
T_0	: Başlangıç Koşulu Sıcaklığı
$[H]$: Isı Kapasitesi Matrisi
$[C]$: Isı Geçişi Matrisi
$[C_c]$: Isı İletimi Matrisi
$[C_h]$: Isı Taşınımı Matrisi
$[Q_l]$: Gizli Isı Matrisi
$[Q_h]$: Taşınım Katsayısına Bağlı Isı Matrisi
$[N],[B]$: Şekil Fonksiyonu Matrisleri
w	: Ağırlık Fonksiyonu
C_α, C_γ	: Ferrit Karbon Konsantrasyonu, Östenit Karbon Konsantrasyonu

D_{α} , D_{γ} : Ferrit Difüzyon Katsayısı, Östenit Difüzyon Katsayısı



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 : Dökme demir türlerine göre mekanik özellik karşılaştırmaları [1-4].	4
Çizelge 3. 1 : Gerçekleştirilen deneyler ve kullanılan numune ölçüleri.....	23
Çizelge 3. 2 : Döküm numuneleri ve krank mili ağırlık yüzdelerine göre kimyasal kompozisyonu..	23
Çizelge 3. 3 : Deneylerde belirlenmek istenen parametreler.....	24
Çizelge 3.4 : Deneylerde belirlenmek istenen parametreler.....	24
Çizelge 3.5 : Sıcaklığa bağlı değişen ısı yayılım ve ısı iletim katsayıları.	25
Çizelge 3.6 : Inconel 600 için sıcaklığa bağlı değişen ısı malzeme özellikleri [56].	26



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Demir-Karbon diyagramı [1].....	3
Şekil 2.2 : Östenit beynit ve ösferrit dönüşümü [13].....	6
Şekil 2.3 : Krank milleri ve bölümleri [12].	7
Şekil 2.4 : Metal- Termo-Mekanik model [27-31, 42].	9
Şekil 2.5 : Gazda çalışmasında küresel dökme demir için elde edilmiş Sürekli Soğuma (CCT) diyagramı [46].	17
Şekil 2.6 : DSC grafiği [47].	18
Şekil 2.7 : Gazda çalışmasında küresel dökme demir için yapılan dilatometrik analiz [46].	19
Şekil 2.8 : LFY deney cihazı ve çalışma prensibi [49].	20
Şekil 3.1 : Dilatometrik analiz sonucu elde edilen sıcaklık, birim uzama ve genleşme katsayısı grafiği.	25
Şekil 3.2 : ISO9950 standartlarında kullanılan prob ölçüleri [54].	26
Şekil 3.3 : Petrofer marka AS-135 model tuz için ISO 9950 standartlarına uygun elde edilen soğuma eğrisi [55].	26
Şekil 3.4 : ISO9950 standardına uygun olarak kullanılan proba ABAQUS programında 1mm kuadratik mesh atılması.	27
Şekil 3.5 : İterasyonlar sonucu deneysel soğuma eğrisine en yakın sonucu veren ısı taşınım katsayısı veri grubu.	27
Şekil 3.6 : Deneylerden elde edilen sıcaklığa bağlı ısı kapasitesinin ABAQUS'e girilmesi.	28
Şekil 3.7 : 5 mm tetrahedron mesh atılmış krank mili.	29
Şekil 4.1 : Ölçülmüş ısı iletkenlik katsayısı değerlerini literatür verileri ile karşılaştırma [58].	31
Şekil 4.2 : Ölçülmüş ısı kapasitesi literatür verileri ile karşılaştırma [58].	32
Şekil 4.3 : Simülasyon sonucu sıcaklık dağılımları: a) 0.1 sn b) 1 sn c) 10 sn d) 60 sn e) 100 sn f) 200 sn.	33
Şekil 4.4 : Düğüm noktalarının soğuma eğrileri.	33
Şekil 4.5 : Krank mili kasnak bölgesi soğuma eğrileri.	34
Şekil 4.6 : (a) Seçilen soğuma eğrilerinin Ac3 sıcaklığına göre kıyaslanması ve (b) Kasnak bölgesinde soğuma eğrileri için seçilen noktalar.	35
Şekil 4.7 : Kasnak bölgesinden seçilen soğuma eğrilerinin CCT diyagramına ki yerleştirilmesi mikro yapı tahmini.	36
Şekil 4.8 : 70. saniyede kasnak bölgesinden seçilen noktaların soğudukları sıcaklıklar (noktalar en soğuktan en sıcak olanlara doğru sıralanmıştır).	37
Şekil 4.9 : Kasnak bölgesi metalografik görüntüler: a) Yüzey b) 9.5mm c)18mm d) Merkez.	37
Şekil 4.10 : Krank mili 1. ana yatak bölgesi soğuma eğrileri.	38

Şekil 4.11 : (a) Seçilen soğuma eğrilerinin Ac3 sıcaklığına göre kıyaslanması ve (b) 1. ana yatak bölgesinde soğuma eğrileri için seçilen noktalar.....	39
Şekil 4.12 : 1. ana yatak bölgesinden seçilen soğuma eğrilerinin CCT diyagramına yerleştirilmesi mikro yapı tahmini.	40
Şekil 4.13 : 70. saniyede 1. ana yatak bölgesinden seçilen noktaların soğudukları sıcaklıklar (noktalar en soğuktan en sıcak olanlara doğru sıralanmıştır).	41
Şekil 4.14 : 1. ana yatak bölgesi metalografik görüntüler: a) Yüzey b) 13.3 mm c) 26.6 mm d) Merkez.....	41
Şekil 4.15 : Krank mili volan bölgesi soğuma eğrileri.	42
Şekil 4.16 : (a) Seçilen soğuma eğrilerinin Ac3 sıcaklığına göre kıyaslanması (b) Volan bölgesinde soğuma eğrileri için seçilen noktalar.	43
Şekil 4.17 : Volan bölgesinden seçilen soğuma eğrilerinin CCT diyagramına yerleştirilmesi mikro yapı tahmini.	44
Şekil 4.18 : 70. saniyede 1. ana yatak bölgesinden seçilen noktaların soğudukları sıcaklıklar (noktalar en soğuktan en sıcak olanlara doğru sıralanmıştır).	45
Şekil 4.19 : Volan bölgesi metalografik görüntüler: a) Yüzey b) 13.3 mm c) 26.6 mm d) Merkez.....	45

ÖSTEMPERLENMİŞ KÜRESEL DÖKME DEMİR (ADI) KRANK MİLLERİNİN ÖSTEMPERLEME ISIL İŞLEMİNİN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

ÖZET

Dökme demir malzemeler yapısında %2-5 arasında karbon elementi bulunduran demir-karbon-silisyum alaşımlarıdır. Endüstride çok fazla uygulamada kullanılan bu malzemelerin mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için çeşitli ısıtım yöntemleri kullanılmaktadır. Küresel dökme demir malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için tuzda soğutma yöntemiyle yapılan ısıtım işlemi östemperleme ısıtım işlemi ve oluşan ürüne östemperlenmiş dökme demir denir. Östemperlenmiş dökme demir (ADI) malzemeler, yüksek dayanım, süneklik ve aşınma direnci gibi özellikleri nedeniyle otomotiv ve savunma sanayi gibi endüstrilerde dövme çelik alternatifini olarak giderek daha fazla tercih edilmektedir. Ancak, ADI malzemelerin üretiminde kritik bir aşama olan östemperleme ısıtım işleminin tasarımı deneysel maliyeti yüksek olduğu için zorlu bir süreçtir. Bu nedenle, östemperleme prosesinin tasarımını daha ekonomik hale getirmek için sayısal ve analitik yöntemler kullanılmaktadır. Östemperleme ısıtım işleminin sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi, literatürde çeliklerin su verilmesi ısıtım işleminin incelenmesine göre daha az araştırılmıştır. Ayrıca, döküm işleminin malzeme özelliklerini etkilemesinden kaynaklı, dökme demir malzemelerin ısıtım işlem simülasyonları için gerekli sıcaklığa bağlı sağlıklı malzeme verilerine ulaşmak oldukça zordur.

Bu bağlamda, çalışmanın amacı, EN-GJS-700 malzemedan üretilmiş bir krank mili için sonlu elemanlar yöntemi kullanarak ısıtım işlem simülasyonu gerçekleştirmek ve simülasyon sonuçlarını deneysel verilerle karşılaştırmaktır. Bu amaçla, ABAQUS yazılımı kullanılarak simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Sağlıklı malzeme verilerine ulaşmak amacıyla dilatometri, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve lazer flaş yöntemi (LFY) analizleri gerçekleştirilmiştir. Analizler için gerekli numuneler, EN-GJS-700 standardına uygun dökülmüş Y bloklardan elde edilmiştir. Analizler 10 °C/dak ısınma hızlarıyla gerçekleştirilmiştir. Ölçülen değerler literatürdeki veriler ile karşılaştırılmış ve doğrulanmıştır.

Sonlu elemanlar analizi, krank milinin 920 °C sıcaklıktan 280°C'e tuz banyosuna sokulması ve burada 2 saat bekletilmesi senaryosunu incelemiştir. Simülasyonda krank miline 5mm tetrahedral mesh atılmıştır. Analiz için gerekli ısı taşınım katsayıları AS-135 tuzu soğuma eğrilerinden elde edilmiştir. Sonlu elemanlar simülasyonu sonucu krank milinin kasnak, 1. ana yatak ve volan bölgesinin en yavaş soğuyan bölgeler olduğu görülmüştür. Bu bölgelerde oluşacak fazların tahmini literatürden elde edilen sürekli soğuma diyagramını (CCT diyagramı) kullanılarak yapılmıştır. Yapılan tahminler sonucu, 920 °C'deki östenit fazının 280°C'de 2 saat bekletilmesi sonucunda, kasnak ve 1. ana yatak bölgesinde %100, volan bölgesinde %99 ösferrite dönüşeceği öngörülmüştür.

Yapılan tahminler, optik mikroskop ile alınan metalografik görüntüler ile karşılaştırılmıştır. Buna göre volan, kasnak ve 1. ana yatak bölgesinde %100 ösferrit

oluştugu gözlenmiştir. Bu sonuçlar, simülasyon çalışmasının kasnak ve 1. ana yatak bölgesi için %100 doğrulukla çalıştığını ve volan bölgesinde %1'lik hata oranıyla tahmin yaptığını belirtmiştir.

Bu çalışma, literatüre EN-GJS-700 malzemenin ısı karakterizasyonunu kazandırmakla kalmayıp, aynı zamanda karmaşık geometrili parçaların ısı işlem süreci tasarımlarında sonlu elemanlar yönteminin kullanımını da hedeflemektedir.



FINITE ELEMENT METHOD ANALYSIS OF AUSTEMPERING HEAT TREATMENT OF AUSTEMPERED DUCTILE IRON CRANKSHAFTS

SUMMARY

The materials that are manufactured of cast iron are alloys of iron, carbon, and silicon that contain between 2-5% carbon respectively. Because cast irons contain a higher percentage of carbon than steels, they are simpler to manufacture than steels. Grey cast iron, white cast iron, tempered cast iron, and nodular cast iron (ductile iron) are the four types of cast iron that are utilised extensively in the application area. Because there is a significant concentration of carbon, graphite is formed in the matrix. The shape of the graphite, which has a direct influence on the mechanical behaviour of the material, is determined by the composition of the material as well as the rate at which the liquid cast iron cools. Because of the nodular shape of the graphite, the material is able to perform better in terms of its mechanical and physical properties. A magnesium or cerium element is added right before the graphite is cast into the mould in order to create the desired graphite nodularity. This addition is called magnesium or cerium treatment.

In order to enhance the mechanical and physical qualities of ductile iron or nodular cast iron materials, which are utilised extensively in the manufacturing sector, a variety of heat treatment techniques are utilised. In order to improve the mechanical qualities of nodular cast iron or ductile, a heat treatment method known as austempering is utilised. This procedure involves quenching the ductile iron and then exposing it to salt. Because of their high strength, ductility, and resilience to wear, austempered ductile iron (ADI) materials are becoming an increasingly popular alternative to forged steel in a variety of industries, including the automotive and defence sectors.

The austempering process begins with the austenitizing phase, where the material is heated to a temperature range of 870-950 °C and maintained for a duration of 1 to 3 hours. This essential process guarantees the full conversion of austenite throughout the material. Afterwards, the item is submerged into a salt bath that is kept at a temperature ranging from 250 to 500 °C for a duration of 0.5 to 3 hours. During this phase, the austenite phase undergoes a transition into the desirable ausferrite phase.

The quality and result of the austempering process depend on numerous pivotal aspects. The austenitizing temperature and time are crucial factors in achieving consistent and thorough phase change. Moreover, the temperature of the salt bath and the length of time the material is immersed in it are crucial factors that determine the final microstructure and qualities of the material. The success of this heat treatment process is also significantly influenced by the quality of the casting, highlighting the significance of precise casting practices in achieving desired results.

Due to the high number of parameters which influence the austempering heat treatment, which is an essential stage in the fabrication of ADI materials, design of this heat treatment process is a complex procedure where involves multi-physic interactions. Therefore, in order to make the design of the austempering process more

cost-effective, numerical and analytical methodologies are utilised. The research of finite element analysis for the quenching of steels has received more attention in the literature than the finite element method analysis of the austempering heat treatment, which has received a less amount of attention. Furthermore, due to the fact that the casting process has an effect on the properties of the material, it is rather difficult to collect reliable material data that is dependant on the temperatures that are required for heat treatment simulations of cast iron materials.

Taking this into consideration, the purpose of this research is not only to make a contribution to the existing body of knowledge by presenting a thermal characterization of the EN-GJS-700 material, but also to concentrate on the application of the finite element approach in the process of designing heat treatment procedures for parts with complicated shapes. This research was carried out in order to accomplish both of these goals. As a result, the purpose of this research is to simplify the process of designing heat treatment systems for engineers and to provide assistance to them in optimising heat treatment procedures in an effective manner.

In order to achieve the objectives of this study, simulations were carried out with the help of the ABAQUS software. In order to determine necessary temperature dependent thermal material parameters, analyses using dilatometry, differential scanning calorimetry (DSC), and the laser flash technique were carried out. For the austenite formation temperature (AC1) and austenite finishing temperature (AC3) dilatometry analysis was deployed. For the temperature dependent heat capacity DSC analysis was deployed. For thermal diffusivity coefficient laser flash technique was used. After measuring the thermal diffusivity coefficients, by using equations temperature dependent thermal conductivity values were obtained. Cast Y blocks that were in accordance with the EN-GJS-700 standard were used to collect the samples that were necessary for these analyses. All of the analyses were carried out at a rate of 10 °C/min. Comparisons were made between the values that were measured and the data that was found in the literature.

According to dilatometry test results, austenite formation temperature (AC1) and austenite finishing temperature (AC3) were determined as 787°C and 867°C. These values then were compared and validated with literature results. In the comparison of temperature dependent heat capacity values, there is a deviation in the temperature between 500°C-900°C. In the comparison of temperature dependent thermal conductivity values, it is observed that measured values are similar to literature results.

After obtaining the necessary temperature dependent material's thermal property values, simulation phase for the crankshafts to predict their phase transformation started. The scenario of submerging the crankshaft in a salt bath at 920 °C and keeping it there for two hours before allowing it to cool down to 280 °C was investigated using the finite element analysis. As part of the investigation, a tetrahedral mesh measuring 5 millimetres was put to the crankshaft. In order to complete the work, the appropriate heat transfer coefficients were derived from the cooling curves of AS-135 salt. The pulley, the first main bearing, and the flywheel regions were found to be the regions that cooled at the slowest rate, as determined by the finite element simulation. The continuous cooling transformation (CCT) diagram that was obtained from the literature was utilised in order to make the forecast of the phases that will result from the development of these portions. After the predictions were made, it was projected that the austenite phase would turn into 99% ausferrite in the flywheel region after being held at 280 °C for two hours. This transformation would take place in the pulley

and first main bearing regions, where the austenite phase completely transforms to ausferrite. In addition, for the other regions of crankshaft, also fully ausferrite transformation is predicted, since these regions shows faster cooling rate which prevents pearlite formation.

There was a comparison conducted between the forecasts and the metallographic pictures that were acquired using an optical microscope's capabilities. It was observed that the pulley, and first major bearing regions were the only places where ausferrite development was found to be fully complete. This was a significant finding. As a result of these discoveries, the simulation study was able to attain a total accuracy of 100% for the pulley and first main bearing regions, however it was only able to produce predictions with a 1% error rate for the flywheel zone. The limited resolution of optical microscope metallographic images in detecting small-sized phases with low volume fractions and the reliance of simulations on numerical calculations should all be taken into account collectively to clarify the %1 error observed in the flywheel zone.

As a result, this study has provided the literature with temperature-dependent material values necessary for thermal analysis, such as heat capacity, critical transformation temperatures, thermal conductivity coefficient, and thermal expansion coefficient for EN-GJS-700 material. Additionally, using cooling curves obtained through the finite element method and CCT diagrams, the details of the practical application of designing and analysing a heat treatment process for a machine part are addressed



1 . GİRİŞ

Östemperlenmiş dökme demir (ADI) malzemeler gösterdikleri yüksek dayanım, yüksek süneklik, aşınma direnci ve daha az hammadde kullanılması özellikleriyle otomotiv ve savunma sanayi gibi endüstrilerde dövme çeliklere alternatif malzeme olarak gün geçtikçe daha sık kullanılmaktadır [1-14].

ADI malzeme üretimi için en kritik aşama östemperleme ısı işlemi olup, bu sürecin tasarımı deneysel çalışmaların yapılması ile ya da literatürdeki deneysel çalışmaların kullanılması ile gerçekleşmektedir [12]. Östemperleme gibi bir ısı işlem süreci çok fazla değişken içerdiğinden, bu işlemi karakterize etmek için gerekli deney miktarı da oldukça fazla olmaktadır [14]. Uygulamalarda bu sorunun çözümü için, daha önce yapılan literatür çalışmalarını kullanarak incelenen değişken sayısı azaltılmaktadır, ancak bu çözüm yapılmış literatür çalışmalarından farklı sınır koşullarına sahip (geometride farklılık vb.) durumlarda geçerliliğini korumamaktadır [15-38].

Günümüzde östemperleme prosesinin tasarım sürecinin deneysel maliyetini azaltmak için çeşitli sayısal ve analitik yöntemler kullanılmaktadır [37]. Sonlu eleman yöntemi ile bu sürecin multifizik olarak termal, mekanik ve metalürjik olarak incelenmesi etkili bir yöntem olarak göze çarpmaktadır [29]. Ancak östemperleme ısı işleminin sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak simüle edilmesi, çeliklere su verilmesi ısı işlemine göre literatürde daha az araştırılmıştır [37,38]. Ayrıca literatürde dökme demir malzemelerin ısı işlem simülasyonları için gerekli olan, sıcaklığa bağlı olarak değişen malzeme değerlerine ulaşmak her zaman mümkün olmamaktadır ve dolayısıyla literatürün bu tür yeni ilave verilere halen ihtiyacı bulunmaktadır [34-36].

Sunulan çalışmada EN-GJS-700 malzemedan üretilmiş bir krank miline ait sonlu eleman yöntemiyle yapılan ısı işlem simülasyonu ABAQUS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Simülasyon için gereken sıcaklığa bağlı malzeme özellikleri dilatometrik analiz, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve lazer flaş yöntemi (LFY) teknikleri kullanılarak bulunmuştur.

Simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık eğrileri literatürden elde edilen sürekli soğuma diyagramına (CCT) eklenerek oluşması beklenen fazlar tahmin edilmiştir. Simülasyon

sonuçları optik mikroskop ile elde edilen mikroyapılar ile karşılaştırılmıştır. Bu alışma literatüre, EN-GJS-700 malzemenin ısı karakterizasyonu kazandırmıştır. Ayrıca karmaşık geometrili parçaların ısı işlem süreci tasarımlarında ABAQUS sonlu elemanlar yazılımının kullanılmasını amaçlamıştır.



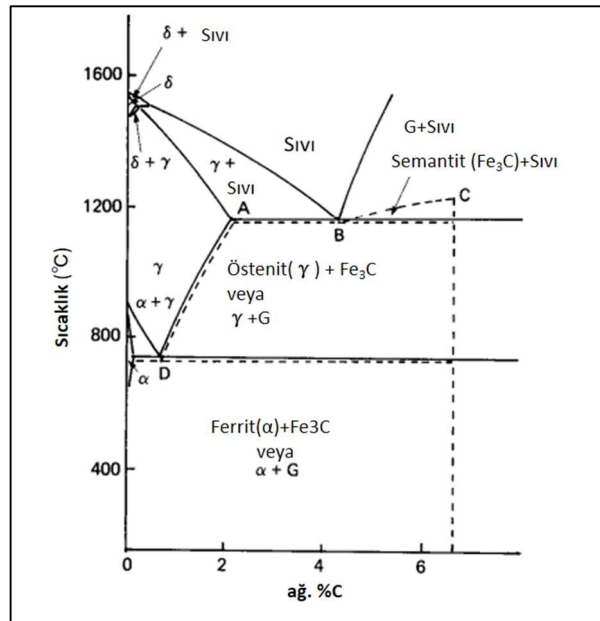
2 . LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1 Temel Kavramlar

Bu bölümde tez kapsamında kullanılacak küresel dökme demir malzemeler ve krank milleri ile ilgili temel bilgiler paylaşılmıştır.

2.1.1 Dökme demir malzemeler

Dökme demir malzemeler yapısında %2-%4 karbon içeren demir-karbon-silisyum alaşımlarıdır ve ayrıca alaşımlandırma elementleri olarak silisyum, magnezyum, kükürt gibi elementler de kullanılır [1-5]. Dökme demir yapısında sementit koşullarda stabil bir faz değildir, ferrit fazına ve grafit fazına dönüşür [1-5]. Şekil 2.1’de demir-karbon faz diyagramı görülmektedir. Şekil 1’deki kesikli çizgi altında kalan alan sementit fazının stabil kaldığı alan, sürekli çizgi altında kalan alan sementit fazının grafit ve ferrit fazına dönüştüğü alanı temsil eder [1-5]. Ayrıca oda şartlarında grafit fazının yanı sıra soğuma hızlarına bağlı olarak ferrit, perlit, beynit, kalıntı östenit ve martenzit fazları da oluşabilir [1-5].



Şekil 2.1 : Demir-Karbon diyagramı [1].

Kır dökme demir, beyaz dökme demir, temper dökme demir, küresel dökme demir ve yüksek alaşımlı dökme demir olmak üzere 5 genel tip dökme demir bulunmaktadır [1-5]. Kır dökme demirlerde ince uzun lamel grafit oluşumu gözlenir ve grafitin bu yapısı çentik etkisi yaratarak malzemeyi gevrekleştirir [6]. Eğer döküm sonrasında kır dökme demir hızlıca soğutulursa karbon grafit fazını oluşturacak zamanı bulamaz ve yapıdaki sementit fazı stabil kalır, bu malzemeye beyaz dökme demir denilir [7]. Beyaz dökme demire ısı işlem uygulanmasıyla elde edilen küresel grafitli malzemeye temper dökme demir denilir [8]. Eğer küresel grafitler döküm öncesinde magnezyum veya seryum gibi küreselleştirici alaşım elementleri katkısıyla oluşuyorsa bu tür malzemelere küresel dökme demir denilir [9].

Çizelge 2.1’de dökme demir tipleri tokluk, sertlik, elastiklik modülü ve aşınma direnci gibi özellikleri bakımından karşılaştırılmıştır. Yapıdaki grafitin şekli ve miktarı malzemenin tokluk, sertlik, elastiklik modülü ve aşınma direnci gibi özelliklerine direkt etki etmektedir [1-9].

Çizelge 2.1 : Dökme demir türlerine göre mekanik özellik karşılaştırmaları [1-4].

Dökme Demir Tipi	Tokluk	Sertlik	Elastik Modülü	Aşınma Direnci
Beyaz Dökme Demir	Düşük	Yüksek	Yüksek	Yüksek
Kır Dökme Demir	Orta	Orta	Düşük	Orta
Küresel Dökme Demir	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta
Temper Dökme Demir	Yüksek	Orta	Yüksek	Orta

2.1.2 Küresel dökme demir malzemeler

Dökme demirlerde lamel grafitin mekanik özellikler üzerinde oluşturduğu negatif etkiyi azaltmak ve engellemek için malzemeye seryum ve magnezyum eklenerek grafitler küreselleştirilir [1-5,8,9]. Avrupa standartları EN-1563 Küresel dökme demirleri GJS koduyla tanımlamaktadır ve küresel dökme demirlerin isimlendirilmesi maksimum çekme gerilmesi ile ilişkilendirilmiştir [2,10].

Sıvı halde ergitilen malzeme kalıba dökülmeden önce magnezyum aşısı adı verilen magnezyum ekleme işlemi yapılır [1-5,8-11]. Bu işlemde yapıya eklenen magnezyum katılma esnasında ilk östenit matris kalıp yüzeyinden içe doğru dentritik biçimde

oluşmaya başlar, daha sonra grafitler nodüller olarak büyümeye başlarlar. Grafitin stabil olarak kalması için silisyum, nikel, bakır, kobalt ve alüminyum gibi elementler kullanılır [11]. Literatürde düşük silisyum miktarlarında grafitin kararlı olmadığı, karbür oluştuğu gözlemlenmiştir [1-9,11]. Krom, titanyum, vanadyum, seryum ve magnezyum elementleri de dökme demirde karbür stabile edici elementler olarak bilinir, magnezyum aşısı sonu kalan fazla magnezyum yapıda karbür fazlarını stabile edici rol oynar [11].

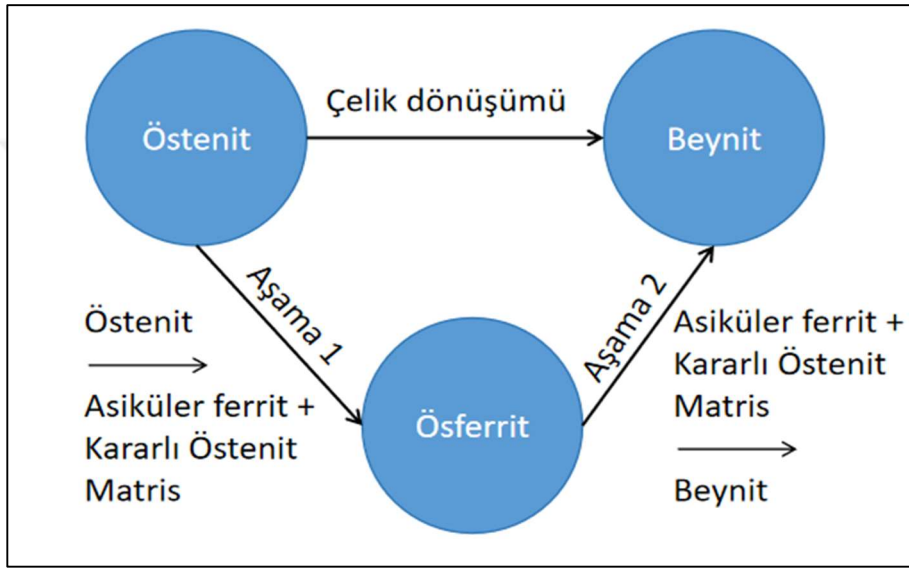
Grafitlerin şekilleri ve dağılımının, malzemenin mekanik özellikleri üzerine önemli etkisi vardır [8-9]. Küresel dökme demirlerde grafitlerin mükemmel küreselliğe ne kadar yakın olduklarını belirtmek için metalografik resimlerin incelenmesiyle yuvarlaklık şekil faktörü tanımlanır ve iyi mekanik özellikler elde etmek için grafitler mükemmel küresele yakın olmalıdırlar [11]. Magnezyum aşısının tamamlanmaması, yapıda titanyum, alüminyum, kalsiyum ve düşük miktarda silisyum bulunması gibi faktörler grafitlerin küreselliğini etkiler [8-11].

2.1.3 Östemperlenmiş küresel dökme demir malzemeler (ADI)

Yüksek dayanım, yüksek süneklik ve aşınma direncinin yanında, döküm sonrasında net şekle yakın şekil elde edilmesi, daha az talaş kaldırmaya ihtiyaç duyulması ve daha az hammaddenin kullanılması nedeniyle östemperlenmiş dökme demirler günümüzde ilgi duyulan malzemelerden olmuştur ve otomotiv endüstrinde kullanımları hızla artmaktadır [12-14].

Östemperleme ısı işlemi küresel dökme demirlerin mekanik özelliklerini geliştirmek üzere tasarlanmış bir ısı işlem yöntemidir. Bu proseste öncelikle ısı işlem uygulanacak parça 850-1050 °C'larına çıkarılır. Bu sıcaklık aralığına östenitleme sıcaklığı denilir ve bu sıcaklıklarda yapıdaki ferrit ve perlitin östenite dönüşmesi amaçlanır, malzemenin tamamı östenit oluncaya kadar beklenir ve bekleme süresi parçanın kalınlığına bağlı olarak değişiklik gösterir [15]. Ardından malzeme, 250-500 °C sıcaklıklarında tuz banyosuna sokulur ve parça bu sıcaklıkta 0.5-3 saat arasında bekletilir. Bu sıcaklık aralığına östemperleme sıcaklığı ismi verilir. Östemperleme sürecinde yapıda ösferrit adı verilen iğnemsî bir faz oluşturmak istenir [12-16]. Östemperleme ısı işleminde malzemeyi soğutmak ve ösferrit fazını elde etmek için soğutucu sıvı olarak tuz kullanılmaktadır [12-16].

850-1050 °C sıcaklıklarında oluşan östenit tuz banyosunda 250-500 °C sıcaklıklarında su verme işlemi esnasında 2 kademedeki faz değişimi geçirir [12-15]. I. aşamada östenit matris için iğnemsiz ferrit fazlar oluşmaya başlar, bu fazlar oluştuğunda geri kalan östenit faz karbonca zenginleşir ve doygun hale gelir [13]. Eğer tuz banyosunda belirli bir miktar beklenirse ilk aşamadan ikinci aşamaya geçiş sağlanır. II. aşamada karbonca zengin östenit fazı ferrit ve karbür fazına dönüşür [13]. Uygulamada ikinci aşamaya geçilmeden ısıl işlemin tamamlanması hedeflenir. Şekil 2.2’de aşamalar arası geçiş görülmektedir.



Şekil 2.2 : Östenit beynit ve ösferrit dönüşümü [13].

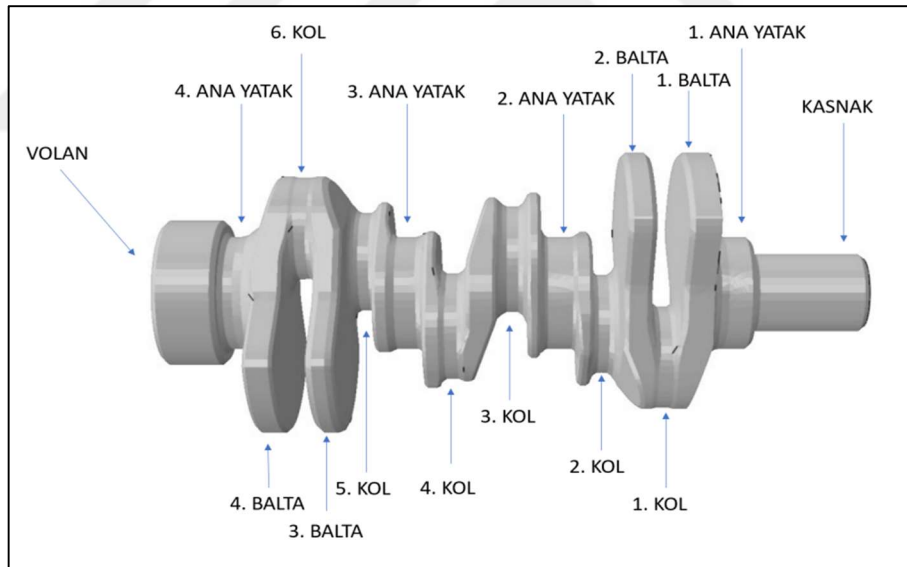
ADI malzemelerin mekanik özellikleri üzerinde grafitlerin küreselliği, yapıdaki dağılımı, döküm yapının homojenliği ve mikro yapısı gibi döküm kaynaklı parametrelerin yanında östenitleme sıcaklığı, östemperleme sıcaklığı ve soğuma hızı gibi ısıl işlem parametrelerinin de çok önemli etkileri vardır [12-16]. Górný yapmış olduğu çalışmasında östenitleme sıcaklığının artmasıyla beraber faz dönüşüm hızının arttığını, toplam dönüşüm için gereken zamanın daha kısa olması gerektiğini, ösferrit fazındaki östenit hacim oranının arttığını, yapıdaki homojenliğin azaldığını ve sonuç olarak daha düşük darbe dayanımı ve sertlik elde edildiğini belirtmiştir [16].

Bendikiene ve arkadaşları 3 farklı östemperleme sıcaklığında yapılarıdaki değişimi incelemiş ve östemperleme sıcaklığının artmasıyla ösferrit konsantrasyonunun arttığını dolayısıyla sertliğin düştüğünü gözlemlemiş, ince yapıda oluşan ösferritlerin yapıda daha iyi mekanik özelliklere neden olduğunu belirtmiştir [17]. Bosnjak ve Radulovic çalışmasında 250-500 °C sıcaklıkları arasında 5 sıcaklık değerinde

inceleme yapmış ve yapıdaki ösferrit fazının hacimsel olarak artmasıyla çekme dayanımının düştüğünü gözlemiştir [18]. Sellamuthu ve Samuel çalışmasında artan östemperleme sıcaklığı ile beraber küresel grafit sayısının azaldığını ve grafitlerin boyutlarının büyüdüğünü belirtmiş ve ayrıca artan östemperleme sıcaklığının aşınma özelliğini olumsuz etkilediğini not etmiştir. [19]. Liu vd. çalışmasında düşük östemperleme sıcaklıklarında yüzeyde artık gerilme meydana geldiğini, artan östemperleme sıcaklığı ile yüzey artık gerilmelerin azaldığını belirtmiştir [20].

2.1.4 ADI krank milleri

Krank milleri içten yanmalı motorlar içinde kritik parçalardan biridir ve büyük dinamik yükler altında çalışırlar, pistonların oluşturduğu doğrusal hareketi dairesel harekete çevirirler [21-22]. Şekil 2.3'te 6 silindirli motorun krank milinin bir örneği ve krank milinin bölümleri görülmektedir [12]. Krank millerinin kol bölümlerine piston kolları montajlanır. Ana yataklar krankların motor bloğuna montajlandığı yataklardır.



Şekil 2.3 : Krank milleri ve bölümleri [12].

Krank millerinin malzeme ve üretim yöntemi seçimi motor tipine, krank milinin geometrisine ve tasarımına göre değişiklik göstermektedir. Krank milleri çelik veya dökme demir malzemelerden yapılmaktadır [21]. Dökme demirden yapılan krank miller çelik malzemeden yapılan krank millerinden daha ucuz ve daha hızlı üretilmektedirler. Ayrıca büyük boyutlara ve kompleks geometriye sahip krank milleri için en ideal malzeme küresel dökme demir olmaktadır [21-23].

Östemperlenmiş küresel dökme demir malzemeler sunduğu yüksek süneklik yüksek dayanım, düşük maliyet ve ağırlık tasarrufu gibi avantajlardan dolayı endüstride dövme çelik krank milleri için alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır [20-22]. Kovacs çalışmasında ADI krank millerinin dövme çelik krank millerinden, 35% daha yüksek çekme gerilmesine, 10% daha az ağır olduklarını, tasarım ve üretimde daha fazla esneklik sunduğunu belirtmiştir [23]. Bahmani ADI krank mili ve indüksiyon sertleştirilmiş dövme çelik krank mili karşılaştırması yaptığı çalışmada, ADI malzemenin %10 daha hafif olduğunu, yorulma özelliklerinin daha iyi olduğunu ve %30 daha ucuz olduğunu vurgulamıştır [24].

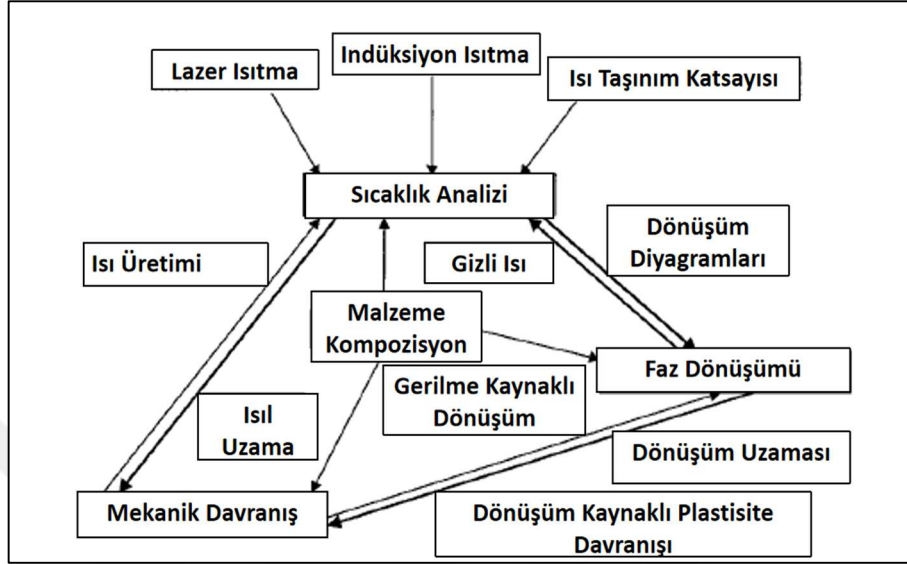
2.2 Östemperleme Simülasyon ve Modelleme Çalışmaları Literatür Özeti

Dökme demirlerin östemperleme ısıl işleminin tasarımı ile ilgili literatürde çalışmalar çoğunlukla deneysel olarak yapılmaktadır, bu ısıl işleminin sayısal ve sayısal modellemesi ile ilgili çalışmalar deneysel çalışmalara oranla daha azdır ancak son zamanlarda bu alanda olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır.

Literatürde östemperleme ısıl işlemini karakterize etmek için yapılan ilk sayısal çalışmalar 60 yıl öncesine dayanmaktadır [25]. Sonlu elemanlar yönteminin geliştirilmesiyle beraber, literatürde sonlu elemanlar yöntemi, ısıl işlem simülasyonu çalışmalarında baskın olarak kullanılan teknik haline gelmiştir [25]. Literatürde bulunan sayısal olarak incelenen ısıl işlem simülasyon çalışmaları çeliklerin su vermesi ısıl işlemi konusu üzerinde yoğunlaşmıştır [25-30]. Literatürdeki birçok çalışmada ısıl işlem simülasyonu için termal analiz, mekanik analiz ve metalürjik analiz birleştirilerek kullanıldığı görülmektedir [25-42]. Şekil 2.4'te 3 analizin nasıl birleştirildiği ve 3 analiz arasındaki ilişki görülmektedir.

Şekil 2.4'e göre termal analizde parçanın sıcaklık geçmişi ve sıcaklık dağılımı bulunması amaçlanır. Sınır koşulu olarak lazer ısıtma, indüksiyon ısıtma ya da ısı transfer katsayısı girilebilir. Bu parametreler parçanın sıcaklığını ve sıcaklık değişimini etkilerler. Mekanik analiz sonucu oluşan gerilmeler kaynaklı veya metalürjik analizde faz geçişleri etkisiyle ısı üretimi gerçekleşebilir. Bu ısı üretimleri de sıcaklık dağılımı üzerinde etkilidir. Mekanik analizde parçadaki birim şekil değiştirmeler ve oluşan gerilmeler hesaplanır. Termal analizde oluşan termal birim şekil değiştirmeler ve metalürjik analizde faz dönüşümü sonucu oluşan birim şekil değiştirmeler mekanik analiz sonuçları üzerinde etkilidir. Metalürjik analizde faz

dönüşümleri incelenir. Termal analizdeki süreye bağlı sıcaklık dağılımı hangi fazların oluşacağını belirler. Mekanik analizdeki hesaplanan plastik şekil değişiminin de faz dönüşümleri üzerinde etkisi vardır. Malzemenin kompozisyonu bu 3 analiz üzerinde de etkisi vardır.



Şekil 2.4 : Metallo-Termo-Mekanik model [27-31, 42].

Mackerle çalışmasında 1976-2001 arasında su verme ve diğer ısıl işlemler ile ilgili yapılan sonlu eleman analiz çalışmalarını özet şeklinde açıklamıştır [25]. Çalışmasında belirtilen yıllar arasında incelediği makalelerin çok büyük bir bölümünün su verme üzerine olduğunu belirtmiştir. Östemperleme, tavlama, menevişleme, karbürizasyon ve nitrasyon gibi işlemler ile ilgili çalışmalar su vermeye oranla daha az bulunmaktadır. Yapılan çalışmalarda ısı geçişi ve termomekanik modelleme beraber kullanılmıştır ve artık gerilmelerin hesaplanması amaçlanmıştır.

Metallerin su verme ve tavlama sürecindeki iç gerilme analizleriyle ilgili öncü çalışmalar Inoue tarafından yapılmıştır [27]. Daha sonraki çalışmalarında Inoue Metallo-Termo-Mekanik modeli tanıtmıştır [28]. Yapılan çalışmalarda, Metalurjik analiz kapsamında difüzyon gerektiren dönüşümler için ZSD diyagramını oluşturmak amacıyla Johnson-Mehl-Avrami denklemleri kullanılmıştır ve denklem içerisine gerilme faktörü de eklenmiştir. Difüzyonsuz dönüşümler için CCT diyagramları kullanılmıştır. Faz oluşumları esnasında değişen fiziksel özellikler karışımlar kuralı ile hesaplanmıştır. ZSD veya CCT diyagramlarından elde edilen zamana bağlı faz oranları karışımlar kuralına yerleştirilerek ilgili zamandaki malzeme özelliği tahmin edilmiştir.

Ayrıca çalışmalarda simülasyonlarda tutarlı sonuçlar elde etmede ısı geçişine ait katsayıların gerçekçi belirlenmesinin önemini vurgulamıştır.

Aksel vd. çalışmasında bir çubuğun asimetric tek taraflı su verme sürecini matematiksel olarak modellemiştir [29]. Modellemesinde faz dönüşümlerini hesaba katmamıştır ve sıcaklık ile değişen ısı verileri kullanmıştır. Radyasyon ve hava kaynaklı ısı kayıplar ihmal edilmiştir. Sıcaklığa göre değişen ısı transfer katsayısı tersine ısı geçişi denklemleri ile deneysel düzeneden alınan sıcaklık verilerinin kullanılmasıyla hesaplanmıştır.

Huiping vd. çalışmasında ısı işlem sürecindeki 2B geçici rejim ısı transfer problemini değişkenleri ayırma yöntemi ve Newman yöntemi kullanılarak incelemiştir, sonuçlar sonlu eleman analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Çalışmasında faz değişimi sonucu oluşan gizli ısının ihmal edilebilecek derecede olduğunu vurgulamıştır.

Borteletto çalışmasında ısı işlem problemini sonlu eleman yöntemi kullanarak incelemiştir [31]. Çalışmasında ABAQUS programı kullanarak, yazılımın ısı işlem simülasyonlarına uygun olduğunu, sıcaklık ve gerilim dağılımı hesaplamalarında kullanabileceğini vurgulamıştır. Isıl işlem esnasında soğuma hızı değişiminden dolayı faz dönüşümlerini belirlemek üzere CCT diyagramlarını kullanmıştır.

Dökme demirlerin östemperleme ısı işlemi ile ilgili ilk çalışmalardan biri Roy vd. tarafından yapılmıştır [32]. Çalışmada oluşturulan model ile sadece ısı geçişi incelenmiştir, faz değişimini hesaba katılmamıştır. Isıl özellikler ile ilgili katsayıları sıcaklığa bağımsız değerler olarak alınmıştır. Tuz banyosunun ısı transfer katsayısı, tuz banyosu ile ilgili verilerin kullanılarak Nusselt sayısının hesaplanmasıyla çıkarılmıştır.

Kapturkiewicz yaptığı çalışmasında östemperlenmiş dökme demir malzemeler için ösferrit büyümesi için difüzyon modeli önermiştir [33]. Model kapsamında grafit nodüller ve ösferrit matrix arasındaki difüzyon ihmal edilmiştir. Ferrit ve östenit fazları için difüzyon denklemleri tanımlanmış olup difüzyon katsayıları sabit değerler olarak kabul edilmiştir. Sayısal çözümler kapsamında difüzyon denklemi mesafeye (eleman kalınlıkları) ve zamana bağlı bir denklem olarak oluşturulmuştur. Sıcaklık arttıkça östenit fazı içindeki ferrit lamellerinin oluşum hızının difüzyon hızına bağlı olarak arttığı gözlemlenmiştir.

Celentano vd ve Dardati vd. yapmış oldukları çalışmalarda küresel dökme demirin katılaşmasını ve ötektoid tepkimeleri termo-mekanik modeller ile incelemiştirler [34-36]. Yapmış oldukları çalışmalarda termo-mekanik modeli metalurjik model ile başarıyla akuple etmişlerdir. Ayrıca simülasyon çalışmalarında kullanılmak üzere malzemenin ısı özelliklerini karakterize etmişlerdir ve bir veri kaynağı oluşturmuşlardır.

Boccardo vd. yapmış olduğu çalışmalarla Celantano vd. ve Dardati vd.'nin uygulamış olduğu termo-mekanik metodu ve oluşturduğu veri tabanını kullanarak küresel dökme demirlerin östemperleme işlemini sonlu eleman metoduyla modellemeye çalışmıştır [37,38]. Çalışmalarında termal-metalurjik-mekanik model kullanarak, ısı işlem sonrası faz oranlarını, kalıntı gerilmeleri tespit etmeye çalışmış ve şekil değişimini hesaplamaya çalışmıştır. Ösferrit oluşumu için östenit matris içerisinde ferrit lamellerin çekirdeklenmesini ve büyümesini esas alan Avrami difüzyon denklemleri temelli bir model kullanılmıştır. Östenit matris içerisindeki ferrit lamelleri hesaplamak için küresel grafit nodül sayısı girdi olarak kullanılmıştır, bunun için escast döküm numunelerinin mikro yapı görüntülerinden nodül sayısı hesaplanmıştır. Analizler için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır. Oluşturduğu modeli deneysel çalışmalar ile doğrulamıştır.

Hepp yaptığı çalışmalarında entegre edilmiş sayısal yöntemler ile ısı işlem sonucunda oluşan fazlar görüntülenmeye çalışmıştır [39]. Östenitleme işleminde sadece Fe-C faz diyagramı dikkate alındığı para-equilibrium (PE) yaklaşımını kullanmıştır. PE yaklaşımında Si, Mo, Ni, Mn, Cu gibi elementlerin difüzyonlarını göz ardı etmiştir. Östenitleme işleminde karbon kontrollü difüzyon problemleri oluşan östenit fazı tahmin edilmeye çalışılmıştır. Difüzyon denklemlerinde grafit fazı konsantrasyonu ve yarıçapı, kalıntı östenit konsantrasyonu ve yarıçapı, ferrit fazı konsantrasyonu ve yarıçapı ve perlit fazı ve yarı çapı değerleri girdi olarak kullanılmıştır. Kullanılan denklemlerden östemperleme işlemi için CCT diyagramları oluşturulmuştur. Geliştirilen modelleme tekniği deneysel çalışmalar ile doğrulanmaya çalışılmıştır, yüksek doğrulukla modelin çalıştığı gözlenmiştir.

Wei yaptığı çalışmada sonlu eleman yöntemiyle düşük alaşımlı dökme demirlerin izotermal su verme işlemi esnasındaki sıcaklık alanlarını incelemiştir [40]. Malzeme özellikleri homojen ve izotropik kabul edilmiştir. Faz dönüşümü gizli ısı ihmal edilmiştir. Isıl parametreler sıcaklığa bağlı olarak kullanılmıştır. Bu parametreler Jmat-

Pro simülasyonu ile elde edilmişlerdir. Isı taşınım katsayısı ise literatürden bulunmuştur.

2.3 Isıl Analiz

Östemperleme ısıl işleminde ısıl analiz, analiz edilen parçanın sıcaklık geçişini ve ısıl uzama miktarını ölçmek için yürütülür [37-40]. Zamana bağlı değişim olduğundan kaynaklı geçici rejim analizi kullanılır ve geçici rejimli ısı geçişi problemleri yüksek derecede lineer olmayan problemlerdir [41]. Bunun nedeni süreç boyunca ısı üretimi olması, sıcaklığa bağlı değişen malzeme özellikleri ve sıcaklığa bağlı değişen ısı taşınım katsayısından kaynaklı değişen sınır koşullarıdır [41]. Çeliklerin su verme ısıl işlemindeki soğutucu sıvı yani su kaynarken, östemperleme ısıl işlemindeki soğutucu sıvı olan tuz kaynamamaktadır, bu yüzden analiz kapsamında buharlaşmanın analizlere etkisi ihmal edilir [37,38].

2.3.1 Isı geçişi denklemleri

Simülasyonda termal analizi gerçekleştirmek için Fourier denklemi kullanılır [41,42]. Faz geçişi olduğu durumlarda enerji üretimi gözlemlenmektedir [25-40]. Denklem 2.1'de 3 boyutlu Fourier ısı iletim denklemi görülmektedir.

$$\widehat{C}_p \frac{dT(\vec{x},t)}{dt} = \left[-\widehat{k} * \left(\frac{d^2T(\vec{x},t)}{dx^2} + \frac{d^2T(\vec{x},t)}{dy^2} + \frac{d^2T(\vec{x},t)}{dz^2} \right) \right] + \dot{Q}(\vec{x},t), \vec{x} \in \Omega \subset \mathbb{R}^3, t > 0, \quad (2.1)$$

ρ malzemenin yoğunluğunu, \widehat{C}_p malzemenin sıcaklığa bağlı değişen ısı kapasitesini, \widehat{k} malzemenin sıcaklığa bağlı değişen ısıl iletim katsayısını ve \dot{Q} faz değişiminden kaynaklı yapıda üretilen gizli ısıyı temsil eder. $\vec{x} = (x, y, z)$ ise \vec{x} vektörü x y z yönlerindeki sıcaklık değişimini ifade eder. Ω üç boyutlu uzaydaki bir kapalı alanı temsil eder.

Şimşir ve Gür çalışmasında gizli ısıyı hesaplayabilmek için faz dönüşümlerinde yayılan ısıyı birim hacimdeki entalpi değişimine eşit olduğunu varsaymıştır [42]. Denklem 2.2'de ΔH_k faz dönüşüm entalpisini, ξ_k faz dönüşüm hızını temsil eder. Ayrıca, çalışmada gerilme oluşumlarından kaynaklı basınç değişiminin entalpi değişimi üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir.

$$\dot{Q} = \Delta H_k * \xi_k \quad (2.2)$$

2.3.2 Başlangıç ve sınır koşulları

İkincil sınır koşulları S_q olarak adlandırılan Ω uzayı sınırında ifade edilirken, birincil sınır koşulu kalan S_T sınırı olarak ifade edilir [43-45]. Buna göre bu sınırlardaki sınır koşulları denklem 2.3 ve denklem 2.4' te ifade edilmiştir.

$$-\widehat{k} \frac{dT(\vec{x}, t)}{d\vec{n}} \Big|_{S_q} = q(\vec{x}, t) \quad (2.3)$$

$$T|_{S_T} = T_1(\vec{x}, t) \quad (2.4)$$

Burada \vec{n} S_q sınırındaki yüzey normalini ifade ederken, q ısı akısını ve T_1 verilen sıcaklıktır. Başlangıç koşulundaki sıcaklık denklem 2.5'te ifade edilmiştir [43].

$$T|_{t=0} = T_0(\vec{x}) \quad (2.5)$$

2.3.3 Sonlu eleman formülasyonu

Karmaşık problemlerde yaklaşık çözüm bulabilmek için sonlu elemanlar yöntemi kullanılır [37,42,44,45]. Sonlu elemanlar yönteminde problemin ele alındığı sistem daha ufak parçalara bölünür ve bu alt parçalarda problemler ayrı ayrı çözülür. Daha sonra bu parçalar birleştirilerek sistemin yakın çözümü elde edilir. Sonlu eleman yöntemi 7 aşamadan oluşur [44,45];

- Parça küçük elemanlara bölünür.
- Enterpolasyon ve şekil fonksiyonu belirlenir. (linear, quadratik ya da kübik)
- Elemanlar için denklemler türetilir.
- Elemanlar birleştirilir.
- Sınır koşulları uygulanır.
- Denklem sistemi çözülür.
- Son işlem uygulaması (gerilme/uzama/ısı akısı gibi değerlerin hesabı)

Galerkin yönteminde çözmek için oluşturulan problemin zayıf formülasyonu denklem 2.6' da görülmektedir [43,45].

$$\int_{\Omega} \widehat{C}_p \frac{dT(\vec{x}, t)}{dt} w + \left[\widehat{k} * \left(\frac{d^2T(\vec{x}, t)}{dx^2} + \frac{d^2T(\vec{x}, t)}{dy^2} + \frac{d^2T(\vec{x}, t)}{dz^2} \right) w \right] - \dot{Q}(\vec{x}, t) w dV + \int_{S_q} q w dS = 0 \quad (2.6)$$

$t > 0$ anı için, w ağırlık fonksiyonu olup denklemin Ω uzayında ve S_q sınırında integrali alındığında sonucu 0 yapan keyfi seçilmiş bir fonksiyondur.

Galerkin yönteminde çözüm yapılırken, problem temel fonksiyonlar sistemi cinsinden bir açılım ile ifade edilip problemin yaklaşık çözümü aranır [43,45]. Nodal sıcaklık dağılımı ve sıcaklık değişim hızları denklem 2.7'deki gibi ifade edilir. Formülde [N] şekil fonksiyonlarını ifade eder [43,45].

$$T = \sum_{i=1} N_i T_i \quad (2.7)$$

Daha sonra denklem 2.7 'deki ağırlık fonksiyonları yerine şekil fonksiyon matrisleri denklem 2.8'deki gibi yazılır.

$$\iiint_{\Omega} \left(\bar{C}_p \frac{dT(\vec{x}, t)}{dt} N_i z \left[\hat{k} * \left(\frac{d^2 T(\vec{x}, t)}{dx^2} + \frac{d^2 T(\vec{x}, t)}{dy^2} + \frac{d^2 T(\vec{x}, t)}{dz^2} \right) N_i \right] - \dot{Q}(\vec{x}, t) N_i \right) dV = 0 \quad (2.8)$$

Bu ifade Gauss Diverjans metoduyla elaman matrislerine ve sınır terimlerine ayrıştırılır [43,45]. Matris formunda ifade edilmiş şekli denklem 2.9' da verilmiştir.

$$\left[\frac{1}{\Delta t} [H] + [C] \right] \{\Delta T_t\} = \frac{1}{\Delta t} \{\Delta T_{t-\Delta t}\} + [Q] \quad (2.9)$$

Denklemden sırasıyla [H] ve [C] ısı kapasitesi ve ısı geçişi matrislerine karşılık gelmektedir. [C] ısı iletim matrisi iki matristen oluşmaktadır, bunlar: [C_c] ve [C_h]. [C_c] ısı iletim matrisi olup yalnızca ısı iletimini kapsar. Sıcaklığa bağlı ısı taşınım kat sayısı varlığı ve gizli ısı oluşumu durumunda; h(T) sıcaklığa bağlı değişen ısı taşınım katsayısı olmak üzere h(T)'ye bağlı ısı iletim ve ısı matrisleri [C_h] ve [Q_h], gizli ısıya bağlı ısı akısı matrisi [Q_l] olarak ifade edilir [43]. Matrislerin açılımları, denklem 2.10-2.15'teki gibi ifade edilir [43].

$$[H] = \rho \iiint c [N]^T [N] dV \quad (2.10)$$

$$[C_c] = \iiint k [B]^T [B] dV \quad (2.11)$$

$$[C_h] = \iint h [N]^T [N] dS \quad (2.12)$$

$$[Q_l] = \iiint \dot{Q} [N]^T dV \quad (2.13)$$

$$[Q_h] = \iint h T_o [N]^T dS \quad (2.14)$$

$$\{\Delta T_{t-\Delta t}\} = \{T_t\} - \{T_{t-\Delta t}\} \quad (2.15)$$

[N] ve [B] denklemlerdeki şekil fonksiyon matrisleridir. Sonuç olarak son formülasyon denklem 2.16'daki gibi ifade edilir [43].

$$\left[\frac{1}{\Delta t} [H] + [C_c] + [C_h] \right] \{\Delta T_t\} = \frac{1}{\Delta t} \{\Delta T_{t-\Delta t}\} + [Q_l] + [Q_h] \quad (2.16)$$

Formülasyon sonucu oluşan yüksek derecedeki lineer olmayan durumu çözebilmek için zaman adım algoritması kullanılır (Denklem 2.17-2.19). $\Delta T_{t+\Delta t}$ 'yi tahmini olarak bulabilmek için sonlu Δt aralığındaki $\{T\}_t$ ve $\{Q\}_t$ değerleri bilinmelidir ve bu aralıkta sıcaklığın lineer değiştiği varsayılmalıdır[43-45].

$$T \approx T_t + \frac{\tau}{\Delta t} (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.17)$$

$$T(\tau) = \sum_{i=1} N_i T_i = \left(1 - \frac{\tau}{\Delta t}\right) \{T\}_t + \left(\frac{\tau}{\Delta t}\right) \{T\}_{t+\Delta t} \quad (2.18)$$

$$\int_0^{\Delta t} (w [C] \{T\} + w [H] \{T\} + w Q) d\tau = 0 \quad (2.19)$$

Denklem 2.20'de, θ ağırlık parametresi ve \bar{Q} tanımı yapılarak denklem genişletilir (Denklem 2.21-2.22) [43-45]. Eğer θ parametresi 0 ile 1 arasında değişen bir parametre ise belirgin (explicit), farklı bir değerse dolaylı (implicit) olarak adlandırılır. Eğer θ parametresi 1/2 'ye eşit ise Crank-Nielson şeması, eğer 2/3'e eşitse Galerkin şeması olarak adlandırılır [43].

$$\theta = \frac{1}{\Delta t \int_0^{\Delta t} w d\tau} \int_0^{\Delta t} w \tau d\tau \quad (2.20)$$

$$[\bar{Q}] = \frac{\int_0^{\Delta t} [Q] w d\tau}{\int_0^{\Delta t} w d\tau} = [\bar{Q}]_t + \theta ([\bar{Q}]_{t+\Delta t} - [\bar{Q}]_t) \quad (2.21)$$

$$\{\Delta T\}_{t+\Delta t} = \frac{[C] - ([H](1 - \theta) \cdot \Delta t \{T\}) - [\bar{Q}]\Delta t}{[C] + ([H]\theta \cdot \Delta t)} \quad (2.22)$$

2.4 Metalurjik Analiz

Östemperleme ısı işleminin metalurjik analizinde, parçanın zamana bağlı sıcaklık dağılımını kullanarak işlem sürecinde yapıda oluşacak faz değişimlerini belirlemeye çalışılır [28]. Ayrıca faz değişimleri sonucunda oluşan gizli ısıları hesaplayarak ısı analize katılır [28-31].

2.4.1 Katı yapılarda faz dönüşümü kinetiği

Küresel dökme demir malzemelerin döküm sonrası yavaş soğumasında grafit fazının ferrit fazı içinde küresel biçimde oluştuğu gözlemlenmektedir [34-36]. Ancak östemperleme ısı işleminin esnasında ferrit fazı östenit fazı içerisinde hacim olarak her yerde çekirdeklenir ve büyümeye başlar [33,37]. Oluşan ferrit lamelleri grafit sayısı ile kıyaslanmayacak kadar fazladır ve ferritler normal ötektoid sıcaklığın çok daha altında östemperleme sıcaklığında oluşmaya başlarlar [33,38]. Ferrit büyümesi ferrit-östenit bölgesindeki difüzyon sistemine uygun biçimde gerçekleşir. Buna göre ferrit fazı ve östenit fazı için kullanılan karbon konsantrasyonu difüzyon denklemleri denklem 2.23 ve denklem 2.24'te gösterilmiştir [33].

$$\alpha \text{ ferrit fazı için; } \frac{\partial C_{\alpha}}{\partial t} = D_{\alpha} \frac{\partial^2 C_{\alpha}}{\partial x^2} \quad (2.23)$$

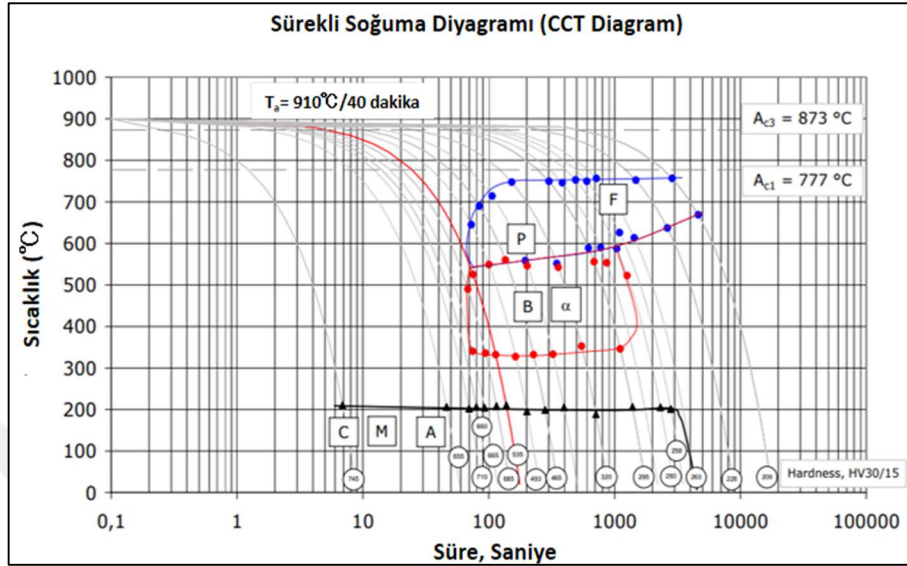
$$\gamma \text{ östenit fazı için; } \frac{\partial C_{\gamma}}{\partial t} = D_{\gamma} \frac{\partial^2 C_{\gamma}}{\partial x^2} \quad (2.24)$$

Denklem 2.23 ve denklem 2.24'te C_{α}, C_{γ} ferrit ve östenit için karbon konsantrasyonlarını, D_{α}, D_{γ} ferrit ve östenit fazları için difüzyon katsayılarını ifade eder.

2.4.2 ZSD ve CCT diyagramları

Malzemenin sıcaklığına ve kimyasal içeriğine bağlı olarak iç yapısında çeşitli fazlar oluşmaktadır. Isıl işlem prosesinde yapıların dönüşümü ZSD (zaman-sıcaklık-dönüşüm) ya da CCT (sürekli dönüşüm) diyagramları ile tahmin edilebilmektedir ve bu diyagramlar kinetik diyagramlardır. ZSD diyagramları sabit soğuma hızları altında oluşan fazları gösterirken CCT diyagramları değişen soğuma hızları altında oluşan fazları gösterir [46]. Çeliklerde su verme ısı işleminin esnasında soğuma hızı sürekli değiştiğinden CCT diyagramı kullanımı tercih edilmektedir. Şekil 2.5'te Gazda'nın

yaptığı çalışma sonucu nikel, bakır, molibden ve mangan ilaveli küresel dökme demirin östempereleme prosesi için elde ettiği CCT diyagramı görülmektedir [46]. Şekilde P perlit, F ferrit, B ve α ösferrit, M martenzit, C karbür ve A kalıntı östenit fazını ifade eder.



Şekil 2.5 : Gazda çalışmasında küresel dökme demir için elde edilmiş Sürekli Soğuma (CCT) diyagramı [46].

2.5 Isıl Karakterizasyon Yöntemleri

Simülasyon çalışmalarında doğru sonuç elde edebilmek için malzeme özelliklerinin ve ısı taşınım katsayısının sıcaklığa bağlı değerlerinin girilmesi gerekmektedir [26-31]. Isıl karakterizasyon yöntemleri ile malzemelerin sıcaklığa bağlı değişen ısıl özellikleri ölçülmektedir. Isıl karakterizasyon yöntemleri ile ölçülen özellikler şunlardır;

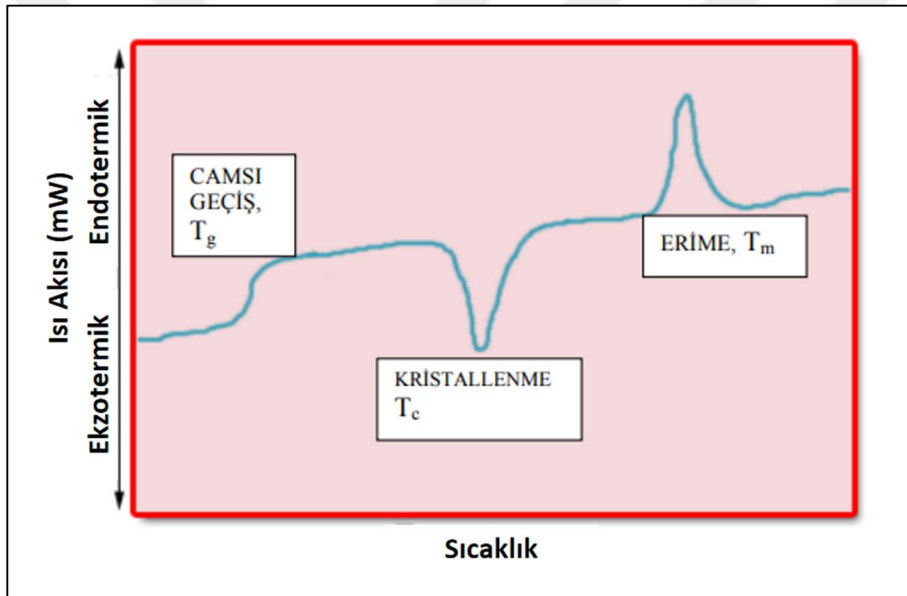
- Faz dönüşüm sıcaklıklarının belirlenmesi
- Sıcaklığa bağlı ısı kapasite değerlerinin belirlenmesi
- Sıcaklığa bağlı ısıl genleşme kat sayısının belirlenmesi
- Sıcaklığa bağlı ısıl yayılım ve ısıl iletim kat sayılarının belirlenmesi
- Sıcaklığa ve zamana bağlı ısıl taşınım kat sayısının belirlenmesi

Bu özellikleri belirlemek amacıyla DSC, Dilatometre ve Lazer Flaş Yöntemi analizleri gerçekleştirilir. DSC, Dilatometre ve LFY analizlerinde faz değişiminin görüldüğü kritik sıcaklıkları belirlemek mümkündür. DSC analizlerinde ısıl kapasite ölçümü ve faz değişimi esnasında açığa çıkan enerji ölçülür. Dilatometre analizlerinde ısıl

genleşme kat sayısı ölçülür. LFY analizlerinde ısı yayılım kat sayısı ölçümü gerçekleşir ve ısı yayılım katsayısı kullanılarak ısı iletim katsayısı hesaplanır.

2.5.1 DSC analizi

DSC analizlerinde faz değişimlerinde oluşan entalpi değişimi ölçülür [47]. Ölçüm esnasında aynı anda bir referans malzemesi de aynı koşullarda ısıtılır ve soğutulur. Isıtma süresince faz değişimleri sonucu oluşan endotermik ya da ekzotermik reaksiyonlar, malzeme ve referans malzemesi arasında ΔT 'lik bir sıcaklık farkına neden olur. DSC analizinde bu sıcaklık farkını dengelemek için cihaz malzemeye ısı verir ya da malzemedен ısı çeker ve ısı değişimini ölçer [47]. Şekil 2.6'da örnek bir DSC grafiği görülmektedir.



Şekil 2.6 : DSC grafiği [47].

Malzemenin ısı kapasitesi denklem 2.25 ile hesaplanır [47]:

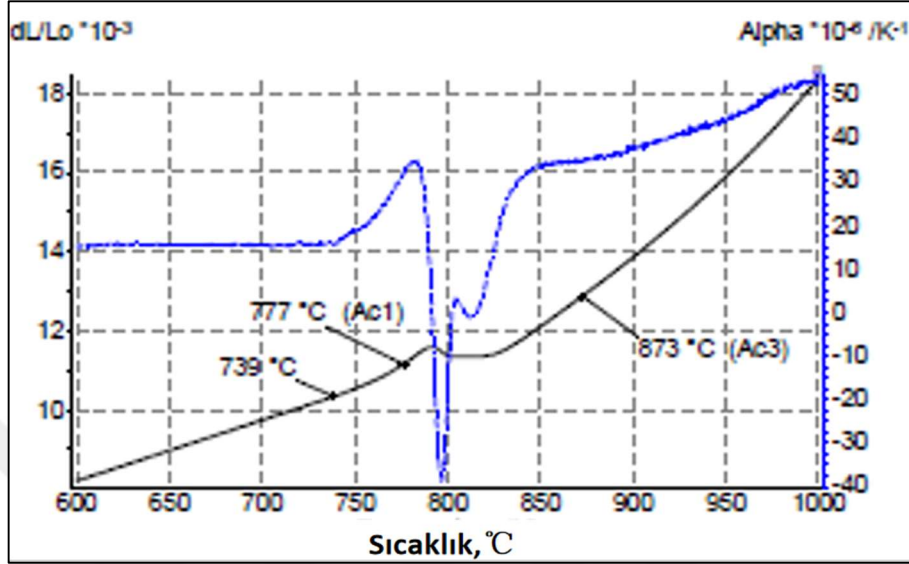
$$c_p = Q/(m * \Delta T) \quad (2.25)$$

Denklem 25'te, Q DSC tarafından ölçülen kaybedilen veya kazanılan enerji, ΔT sıcaklık farkı, c_p özgül ısı kapasitesidir ve m numune kütlesidir.

2.5.2 Dilatometre analizi

Kritik dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek amacıyla dilatometre analizi yapılır [48]. Küresel dökme demir malzemeler için ferrit+perlit>östenit dönüşümü sıcaklıkları (Ac1-Ac3) belirlenmesinde kullanılır. Şekil 2.7'de Gazda'nın yapmış GGG70

malzeme için yapmış olduğu çalışmadaki dilatometrik analiz görülmektedir [46]. Şekil 2.7’de de görüldüğü üzere ilk pik vermeden önceki eğim değişiminin olduğu nokta Ac1 yani östenit fazının oluşmaya başladığı ilk nokta, en son eğim değişiminin gözlemlendiği nokta Ac3 yani tamamen östenit fazının oluştuğu noktadır.

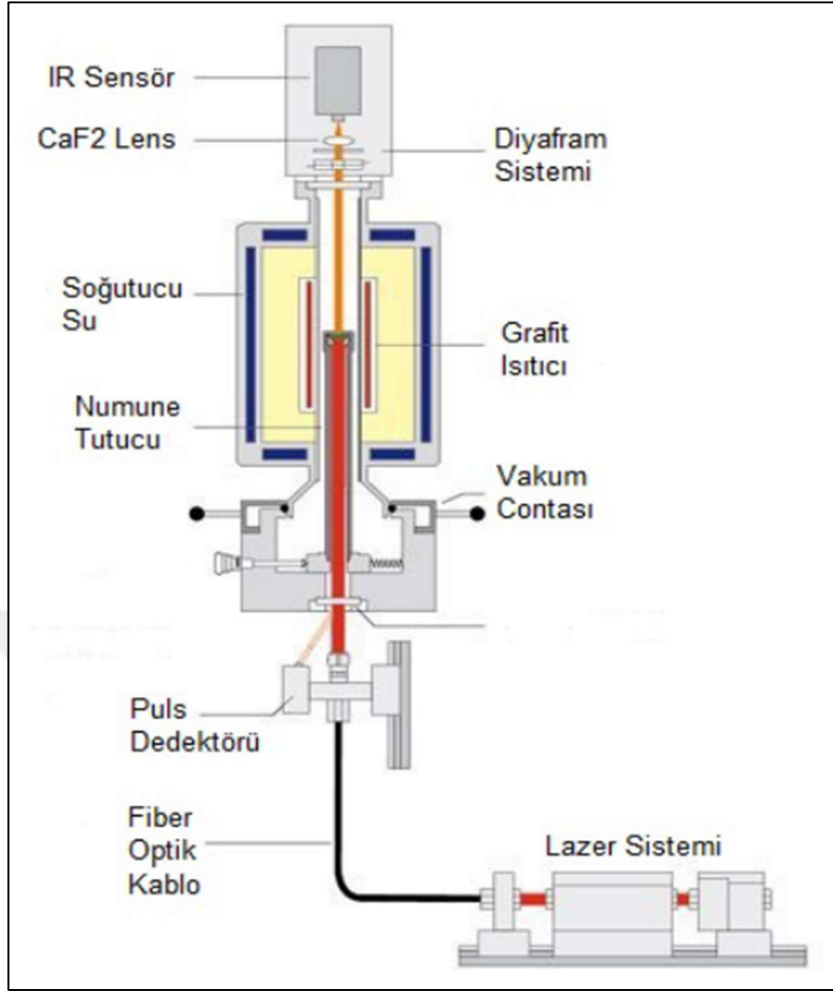


Şekil 2.7 : Gazda çalışmasında küresel dökme demir için yapılan dilatometrik analiz [46].

Ayrıca bir mekanik özellik olan ısı genleşme katsayısını da dilatometrik analiz sonucunda bulmak mümkündür.

2.5.3 LFY analizi

Malzemelerin ısı yayılım katsayısını ölçmek için Lazer Flaş Yöntemi (LFY) kullanılmaktadır [49]. Şekilde tipik bir lazer flaş cihazının şeması bulunmaktadır. Şekil 2.8’de görüldüğü üzere numune alt yüzeyinden lazer darbelerine maruz kalarak ısınmaktadır ve ısı geçişi alt yüzeyden üst yüzeye ilerlemektedir. Bu ısı değişimi şekilde görülen IR sensör tarafından ölçülür.



Şekil 2.8 : LFY deney cihazı ve çalışma prensibi [49].

Hesaplanan ısı yayılım değerleri ısı iletim katsayısını denklem 2.26 ile dönüştürülür [50]:

$$k = a * c_p * \rho \quad (2.26)$$

Denklemde a ısı yayılım kat sayısını, k ısı iletim kat sayısını, c özgül ısı kapasitesini ve ρ malzemenin yoğunluğunu ifade eder.

2.5.4 Isı taşınım katsayısının hesaplanması

Isıl işlem sıvılarının ısı taşınım katsayılarını hesaplamak için soğuma eğrileri hesaplanmaktadır [51]. Isı taşınım katsayısının hesabı için bu soğuma eğrilerinin doğruluğu önem arz etmektedir [52]. Isı işlem sıvılarının soğuma eğrileri, gümüş, inconel ya da çelik problar kullanılarak gerçekleştirilmektedir [53]. Biot sayısı 0.1'den küçük olan durumlarda, yapıdaki sıcaklık dağılımının düzgün dağıldığı kabul edilir ve Denklem 2.27 ısı taşınım katsayısı hesabında kullanılır [51-53]. Denklem 2.27'nin

kullanılabilmesi için Biot sayısı 0.1'den küçük olmalıdır. Bu yüzden deneysel süreçte ısı iletim kat sayısı yüksek malzeme kullanılması ya da düşük ısı taşınım kat sayısına sahip soğutucular kullanılmalıdır [51-53].

$$Bi = \frac{hL_c}{k}, Bi < 0.1; \frac{d(T - T_\infty)}{T - T_\infty} = -\frac{hA}{\rho V c_p} dt \quad (2.27)$$

Denklem 2.27'de L_c parçanın kritik uzunluğunu, h ısı taşınım kat sayısını, T_∞ ortam sıcaklığını ifade eder.



3 . MALZEME VE METOT

3.1 Malzeme ve Numunelerin Hazırlanması

Planlanan dilatometre, diferansiyel termal kalorimetre, lazer flaş analizi ve ısı transfer kat sayısının ölçümü deneyleri için öncelikle numuneler Y blok ve krank mili kalıplarına dökülmüştür. Döküm sonrasında parçalar çapaklarından temizlenmiş, Y blok küçük parçalara ayrılmıştır. Çizelge 3.1 'de deneyler için gereken numune ölçüleri görülmektedir. Y bloktan kesilen numuneler talaşlı imalat yöntemleri ile istenilen ölçülere getirilmiştir.

Çizelge 3.1 : Gerçekleştirilen deneyler ve kullanılan numune ölçüleri.

Deney ismi	Numune Ölçüleri (mm)
DSC	ø4*0,9
Dilatometre	ø6*50
LFY	ø12.55*2
Isı Taşınım Katsayısı Ölçüm Deneyi	ø90*9

OBLF marka RS-1000 model spektrometre cihazı ile spektrometre analizi yapılmıştır. Yapılan analizler sonucunda numunelerin kompozisyonları Çizelge 3.2'deki gibidir.

Çizelge 3.2 : Döküm numuneleri ve krank mili ağırlık yüzdelere göre kimyasal kompozisyonu.

C	Si	Ni	Cu	Mn	Mo
3.3-3.6	2.2-2.4	0.5-0.8	0.7-0.9	0.10-0.30	0.10-0.30

3.2 Simülasyon Çalışmaları İçin Girdi Verilerinin Bulunması

Tez kapsamında yapılan deneyler ve deney sonucu belirlenmesi istenen parametreler Çizelge 3.3'te görülmektedir.

Çizelge 3.3 : Deneylerde belirlenmek istenen parametreler.

Deney ismi	Belirlenmesi istenen parametreler
DSC	Sıcaklığa Bağlı Isı Kapasitesi Kritik Sıcaklıklar
Dilatometre	Sıcaklığa Bağlı Isıl Genleşme Katsayısı Kritik Sıcaklıklar
LFY	Isıl Yayınım Katsayısı Sıcaklığa Bağlı Isı İletim Katsayısı
Isı Taşınım Katsayısı Ölçüm Deneyi	Sıcaklığa Bağlı Isı Taşınım Katsayısı

3.2.1 DSC analizi

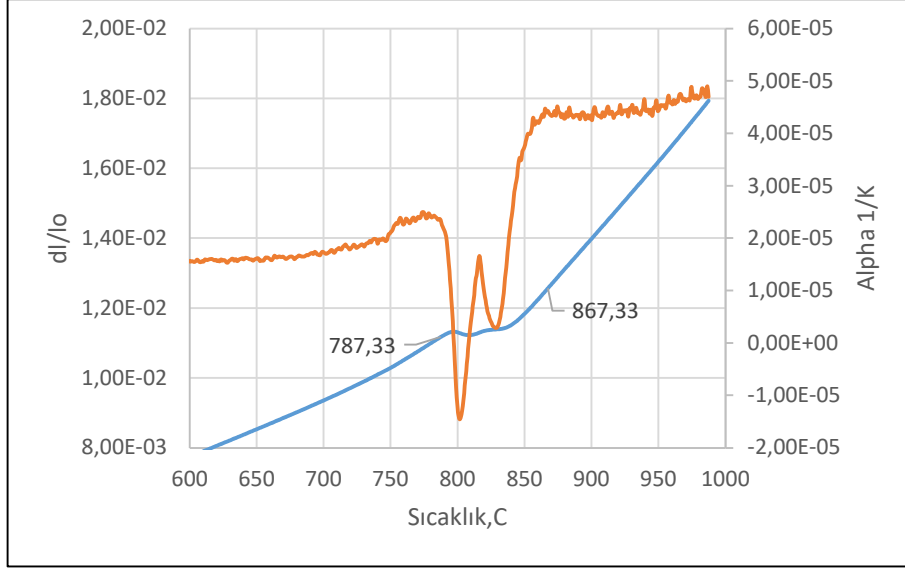
DSC analizleri NETZCH marka DIL 402 model cihazında 10°C/dak ısıtma hızıyla 30-990 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen sıcaklığa bağlı değişen ısı kapasitesi verileri Çizelge 3.4'te verilmiştir.

Çizelge 3.4 : Deneylerde belirlenmek istenen parametreler.

Sıcaklık (°C)	Isı Kapasitesi (Cp) (J/(kg*K))
20	510
300	560
400	590
500	640

3.2.2 Dilatometre analizi

Dilatometre analizleri NETZCH marka STA 449Jupiter model cihazında 10°C/dak ısıtma hızıyla 45-990 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu elde edilen sıcaklık, birim uzama ve genleşme katsayısı grafiği Şekil 3.1'de verilmiştir. Şekil 3.1'de Ac1 sıcaklığı 787 °C, Ac3 sıcaklığı 867 °C olarak görülmektedir.



Şekil 3.1 : Dilatometrik analiz sonucu elde edilen sıcaklık, birim uzama ve genleşme katsayısı grafiği.

3.2.3 LFY analizi

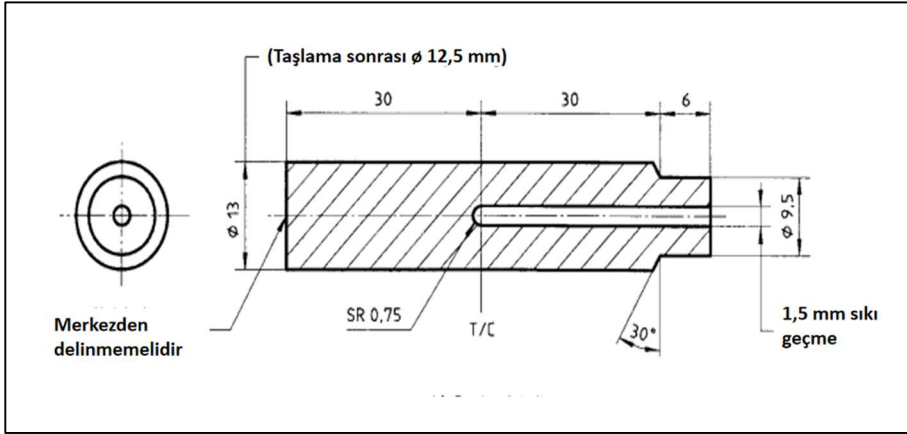
Hazırlanan numunelerin dilatometre analizi NETZCH marka LFY 457 model cihaz ile gerçekleştirildi. Elde edilen değerler ile ölçülen ısı yayılım katsayısı ve Denklem 2.26'ya göre hesaplanan ısı iletim katsayısı değerleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Denklem için gerekli yoğunluk verileri literatürden alınmıştır [58].

Çizelge 3.5 : Sıcaklığa bağlı değişen ısı yayılım ve ısı iletim katsayıları.

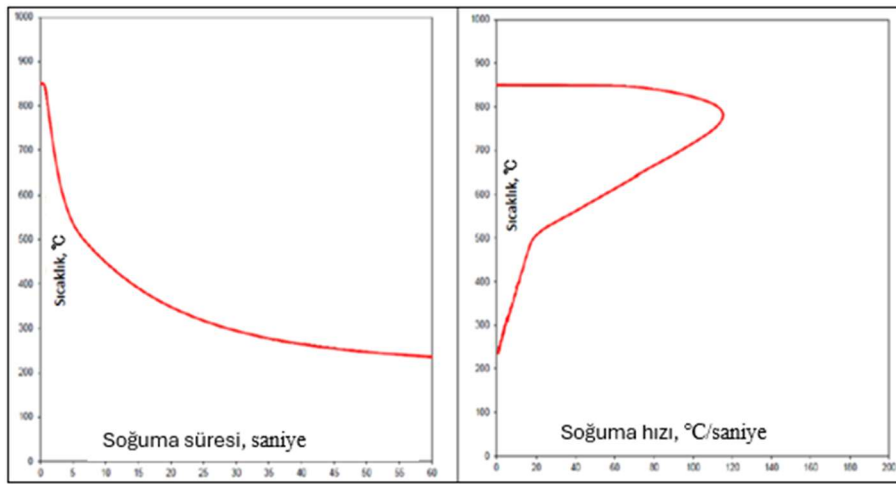
Sıcaklık (°C)	Isı Yayılım Katsayısı (mm ² /s)	Yoğunluk ((g/mm ³)*10 ⁴)	Isı İletim Katsayısı (W/(m*K))
20	8.26	70.55	28.54
300	7.65	70.25	30.11
400	7.04	70.00	29.10
500	6.12	69.80	27.36
600	5.13	69.70	25.24
900	4.99	69.60	22.85

3.2.4 Isı taşınım katsayısının hesaplanması

Tez kapsamında ısı taşınım katsayısını hesaplamak için, Petrofer firması tarafından AS-135 tuzu için ASTM D682(ISO 9950) standartlarına uygun oluşturulmuş soğuma eğrisi kullanılmıştır (Şekil 3.2) [54,55]. Soğuma eğrisi Inconel 600 malzeme problemler kullanılarak oluşturulmuştur (Şekil 3.3) [54]. Sıcaklığa bağlı değişken malzeme değerleri kullanıldığında Biot sayısının istenilen değerlerden fazla çıktığı gözlemlenmiştir. Bu yüzden ısı taşınım katsayısının Abaqus programı kullanılarak optimizasyon ile oluşturulmasına karar verilmiştir.



Şekil 3.2 : ISO 9950 standartlarında kullanılan prob ölçüleri [54].



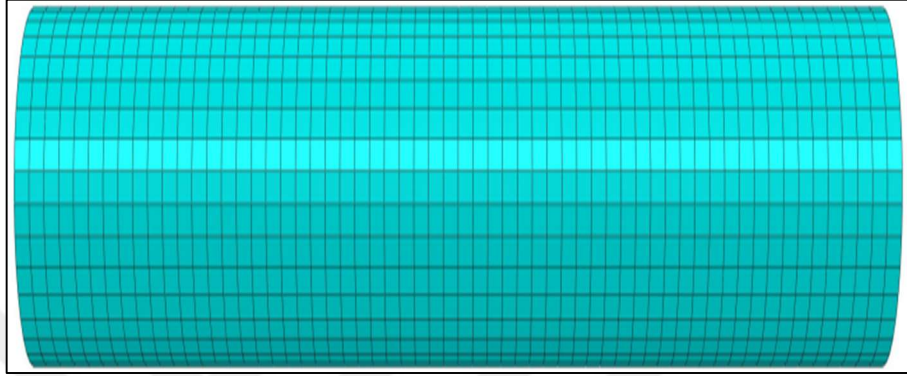
Şekil 3.3 : Petrofer marka AS-135 model tuz için ISO 9950 standartlarına uygun elde edilen soğuma eğrisi [55].

AS-135 tuzunun ısı taşınım katsayısını hesaplayabilmek için ISO 950 standartlarına göre yapılan deney Abaqus de simüle edilmiştir. Inconel 600 malzeme için kullanılan veriler literatürden elde edilmiştir (Çizelge 3.6) [56].

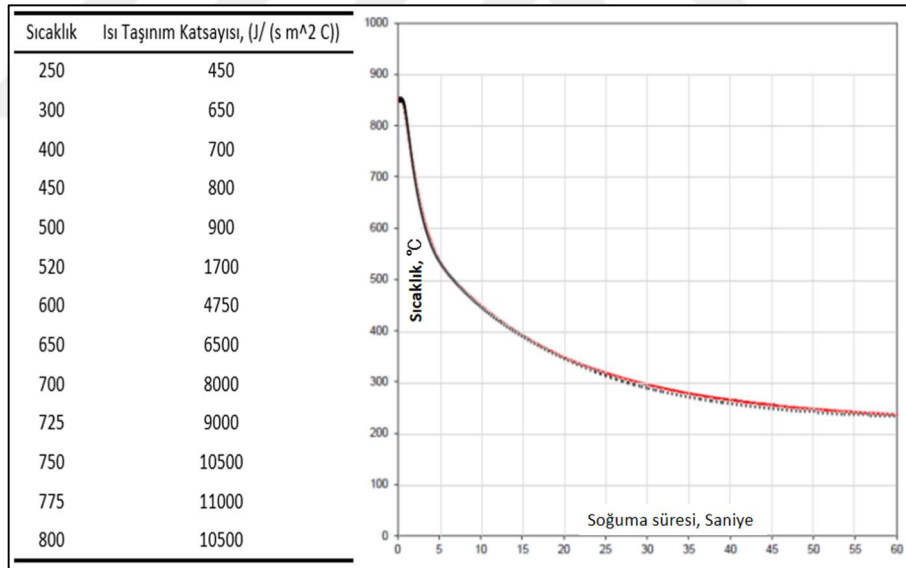
Çizelge 3.6 : Inconel 600 için sıcaklığa bağlı değişen ısı malzeme özellikleri [56].

Ölçüm Cihazı Sıcaklığı (°C)	Isı Kapasitesi (J/kg*°C)	Yoğunluk (kg/m ³)	Isıl İletkenlik (W/m*°C)
200	491	83400	16.0
300	509	8300	17.8
400	522	8270	19.7
500	533	8230	21.7
600	591	8190	23.9
700	597	8150	25.9
800	602	8100	27.5
850	611	8080	-

Simülasyonda 1 mm kuadratik mesh kullanılmış (Şekil 3.4) ve 800 °C ‘den 200°C ‘ye soğuması incelenmiştir. Soğuma eğrisi simülasyonda deney parçasının tam orta noktasından değerler alınmıştır. Farklı ısı taşınım katsayıları denenerek simülasyonda elde edilen soğuma eğrisi, deneysel eğriye uydurulmuştur. İterasyonlar sonucunda deneysel soğuma eğrisine en yakın sonucu veren ısı taşınım katsayısı veri grubu Şekil 3.5’te görülmektedir.



Şekil 3.4 : ISO 9950 standardına uygun olarak kullanılan proba ABAQUS programında 1mm kuadratik mesh atılması.



Şekil 3.5 : İterasyonlar sonucunda deneysel soğuma eğrisine en yakın sonucu veren ısı taşınım katsayısı veri grubu.

3.3 Simülasyon Çalışmaları

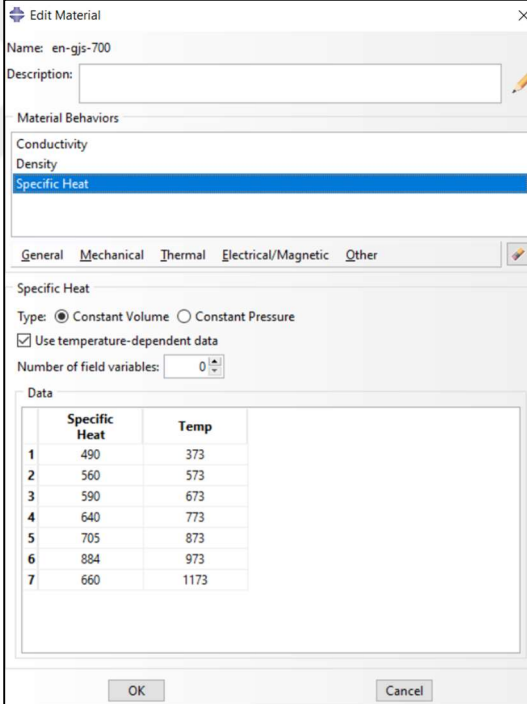
Krank milinin östemperleme ısıl işlemi sürecinde tuz banyosu içinde soğumasının SEY (Sonlu Eleman Yöntemi) analizleriyle milin zamana bağlı değişen sıcaklık dağılımı elde edilmiş, bulunan sonuçlar metalurjik analizlerde kullanılarak oluşacak fazlar tahmin edilmiştir.

3.3.1 ABAQUS ısı analiz

Isıl SEY analizi için ABAQUS programı tercih edilmiştir. Bu seçim programın üniversite kütüphanesinde bulunması ve analizlerindeki hata oranlarının tatmin edici seviyelerde olmasından kaynaklanmıştır [31,37,38]. Mekanik analiz sonucu oluşabilecek ısı miktarı ihmal edilebilir seviyede olduğundan ısı analiz sürecine dahil edilmemiştir [42].

3.3.2 Isıl analizde malzeme tanımlama

Programın malzeme giriş ara yüzü kullanılarak, Bölüm 4.2' de EN-GJS-700 malzeme için elde edilen sıcaklığa bağlı değişen malzeme verileri sisteme girilmiştir. Veriler kilogram (kg), metre (m), saniye (sn) cinsinden girilmiştir [57]. Şekil 3.6'te Bölüm 4.2.3'te DSC analizi sonucu bulunan ısı kapasitesi verilerinin sisteme girilmesi gösterilmiştir.



The screenshot shows the 'Edit Material' dialog box for 'en-gjs-700'. The 'Material Behaviors' section has 'Specific Heat' selected. The 'Specific Heat' section is expanded, showing 'Type: Constant Volume' selected and 'Use temperature-dependent data' checked. The 'Number of field variables' is set to 0. The 'Data' table is as follows:

	Specific Heat	Temp
1	490	373
2	560	573
3	590	673
4	640	773
5	705	873
6	884	973
7	660	1173

Şekil 3.6 : Deneylemlerden elde edilen sıcaklığa bağlı ısı kapasitesinin ABAQUS'e girilmesi.

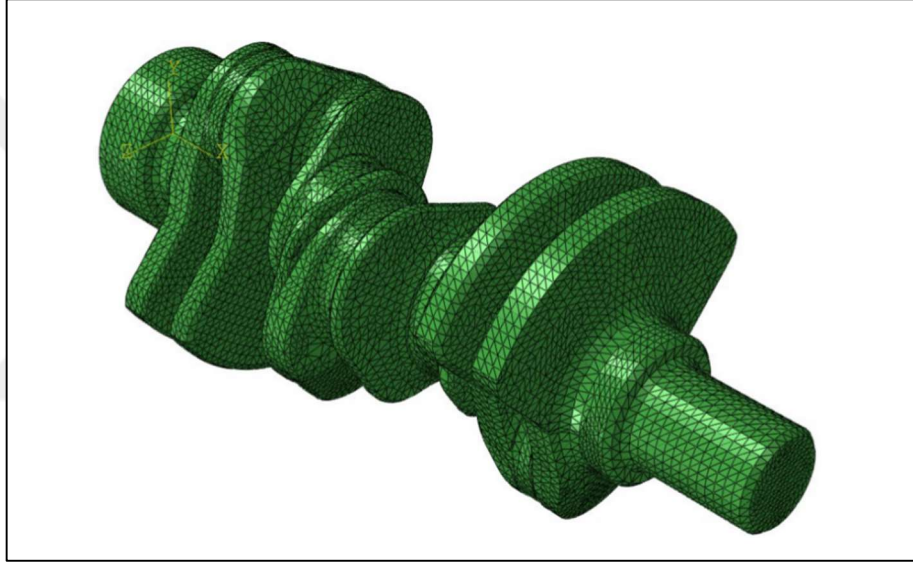
3.3.3 Simülasyon adımları ve başlangıç/sınır koşulları

Krank milinin tuz banyosunda soğutulması tek bir adımda incelenmiştir. Başlangıç koşulunda parçanın her bir noktası 920 °C'dir. Daha sonra parça tuz banyosu ile soğumaktadır. Soğuma adımı 7200 saniye (2 saat) sürmektedir. Tuz banyosuna ısı, taşınım ile atılmaktadır. Sınır koşulu olarak tuz banyosunun sıcaklığı 280 °C girilmiştir.

Bölüm 4.2.4'te elde edilen sıcaklığa bağlı değişen ısı taşınım katsayısı verileri de programa girilmiştir.

3.3.4 Parçanın elemanlara bölünmesi (mesh atılması)

Bilindiği üzere SEY 'de parça küçük elemanların bir araya getirilmesi ile inşa edilir. Krank millerinin karmaşık geometriye sahip olmasından dolayı üçgen yüzeyli 3 boyutlu elemanlar (tetrahedral) tercih edilmiştir [44-45]. Bu çalışma kapsamında 5 mm boyutunda eleman kullanılmasının yeterli olduğu denemeler sonucunda belirlenmiştir. Şekil 3.7'de ABAQUS programında elemanlarla örülmüş krank mili modeli görülmektedir.



Şekil 3.7 : 5 mm tetrahedron mesh atılmış krank mili.

3.4 Isıl İşlem Çalışmaları

Dökülen krank milinin östempereleme ısıl işlemi Teknovak marka M 85/125-1000 model çan tipi atmosferik ısıl işlem fırınında gerçekleştirildi. Parçalar fırınla beraber kademeli olarak 920 °C'ye 3 saatte çıkarıldı. Ardından 920 °C'de 2 saat bekletildi. Daha sonra 280 °C sıcaklıkta, Petrofer marka AS-135 model tuzun bulunduğu tuz banyosunda parçalar 1 saat tutularak soğutuldu.

Isıl işlemden çıkan krank milinin çeşitli bölgelerinden kesitler alındı ve mikroyapılar Nikon Ekipse MA100 model cihaz ile incelendi. Numuneler önce zımparalanmış sonra 1 µm Al₂O₃ ile patlatılmıştır ve % 2 Nital çözeltisi kullanılarak dağlanmıştır.

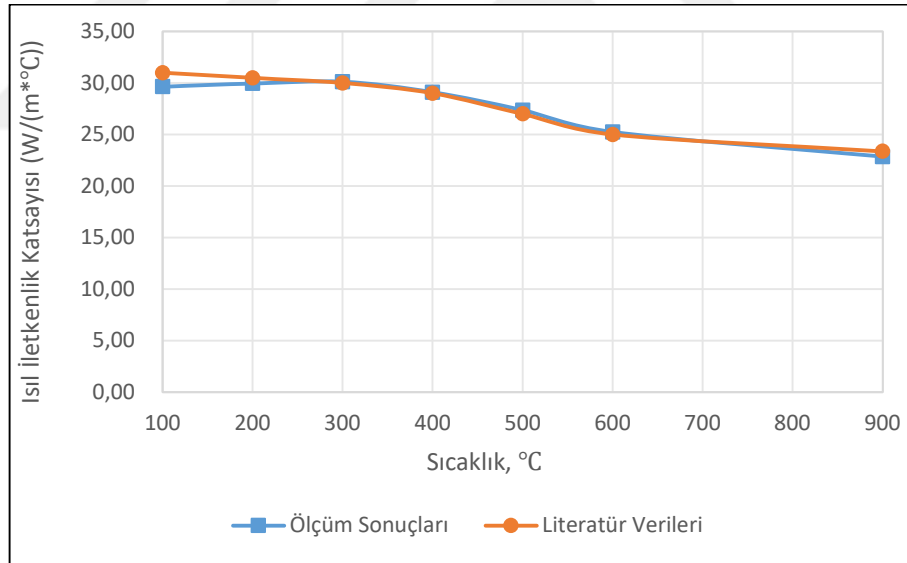


4 . DENEYSEL VE SAYISAL SONUÇLAR

4.1 Analiz İçin Kullanılan Verilerin Doğrulanması

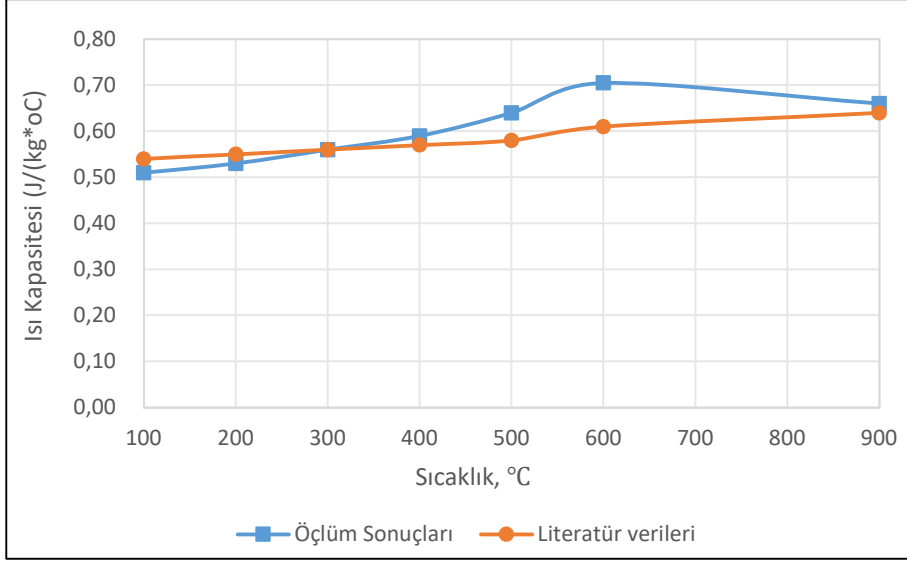
Yapılan analizler sonucu elde edilen özgül ısı kapasitesi ve ısı iletkenlik katsayısı değerleri literatürde Altair Inspire Cast 2020 Student Edition programındaki GGG70 malzemesi veri tabanı ile karşılaştırıldı [58].

Şekil 4.1 LFY analizi sonucu elde edilen ısı iletim katsayılarının Altair Inspire Cast 2020 Student Edition programındaki veri tabanı ile karşılaştırılması görülmektedir. Yapılan karşılaştırmaya göre elde edilen ısı iletim katsayılarının Altair Inspire Cast 2020 Student Edition programı kütüphanesindeki verilerle oldukça uyumlu olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.1 : Ölçülmüş ısı iletkenlik katsayısı değerlerini literatür verileri ile karşılaştırma [58].

Şekil 4.2’de DSC analizi sonucu elde edilen ısı kapasitesi katsayılarının Altair Inspire Cast 2020 Student Edition programındaki veri tabanı ile karşılaştırılması görülmektedir. Yapılan karşılaştırmaya göre elde edilen ısı kapasitesi değerlerinin Altair Inspire Cast 2020 Student Edition programı kütüphanesindeki verilerle 500-900°C aralığında farklılık gösterdiği görülmüştür.



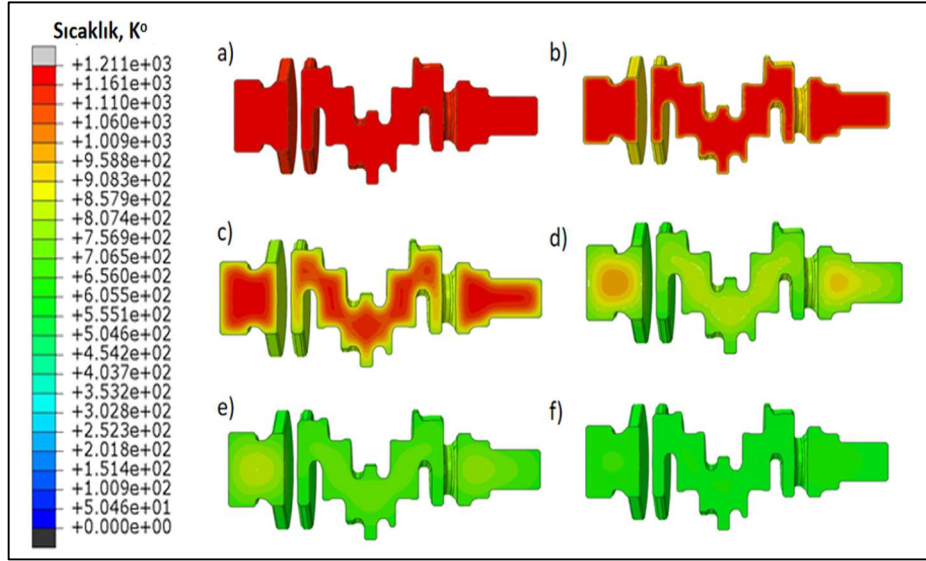
Şekil 4.2 : Ölçülmüş ısı kapasitesi literatür verileri ile karşılaştırma [58].

Sıcaklığa bağlı değişen yoğunluk verileri için deneyler yapılmamış, sonlu elemanlar yöntemi analizlerindedir Altair Inspire Cast 2020 Student Edition programındaki veriler kullanılmıştır [58].

Faz değişim sıcaklıkları olarak, dilatometrik analiz sonucuna göre Ac1 için 767°C, Ac3 için 867°C belirlenmiştir. Elde edilen dilatometri ölçüm eğrisi ve sıcaklık değerleri benzer malzeme kompozisyonu kullanan çalışmanın sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır [46]. Hem kimyasal yapının benzer olması hem de Ac1 ve Ac3 sıcaklıklarının benzer olmasından ötürü, metalurjik analiz için de Gazda'nın elde ettiği CCT diyagramının kullanılmasına karar verilmiştir [46].

4.2 Sonlu Elemanlar Analizi ile Isıl Analiz Simülasyonu Sonuçları

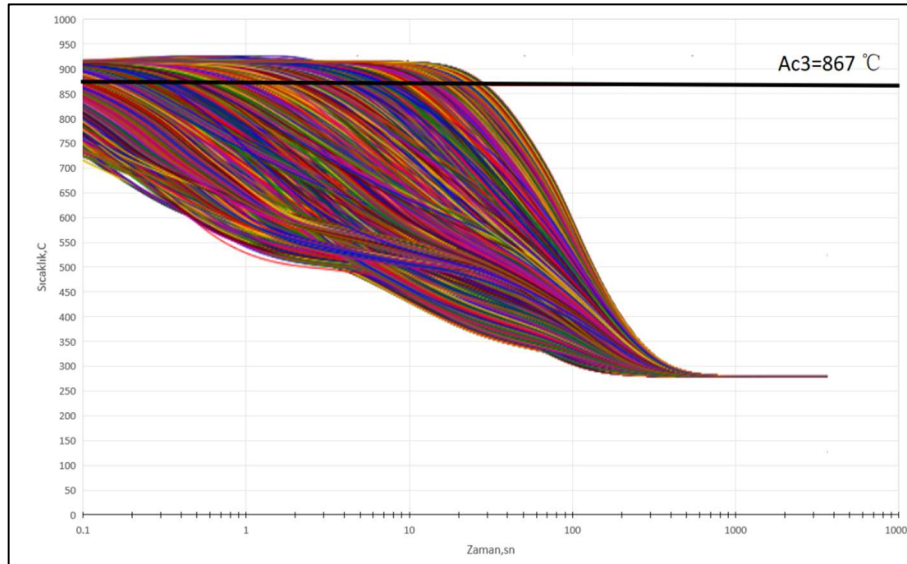
ABAQUS/CAE'de yapılan ısıl analiz sonucuna göre krank milinin ilk 200 saniyedeki sıcaklık dağılım görüntüsü Şekil 4.3'te verilmiştir. Simülasyon sonuçlarına göre en geç soğuyan bölgeler krank milinin 1. ana ve volan kısımlarıdır. Geri kalan ana ve kol yatak bölgeleri krank milinin kasnak bölgesine benzer soğuma davranışı göstermiştir. En hızlı soğuyan bölge ise krank milinin en ince kesiti olan baltalarıdır.



Şekil 4.3 : Simülasyon sonucu sıcaklık dağılımları: a) 0.1 sn b) 1 sn c) 10 sn d) 60 sn e) 100 sn f) 200 sn.

4.3 Elemanların Soğuma Eğrileri ve İçyapı Öngörülleri

Şekil 4.4'te tüm düğüm noktalarının soğuma eğrileri görülmektedir. Şekil 4.4'te görüldüğü üzere, krank milinin Ac3 sıcaklığına en erken soğuyan noktası 0.1 saniyeden daha erken bir sürede, en geç soğuyan noktası 40 saniyede faz dönüşümünün başlayacağı AC3 sıcaklığına soğumaktadır.



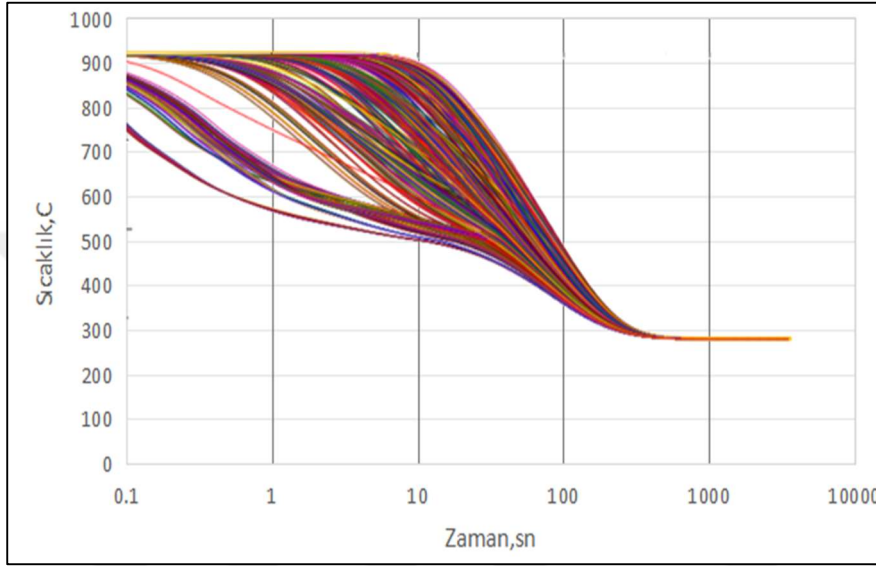
Şekil 4.4 : Düğüm noktalarının soğuma eğrileri.

Düğüm noktalarında oluşan içyapıların tahmin etmek için, noktaların Ac3 sıcaklığına soğudukları anı başlangıç anı olacak şekilde CCT diyagramını üzerine yerleştirmek gerektiği açıktır. Bölüm 4.2' de anlatıldığı üzere en yavaş soğuyan bölümler volan ve

1. ana yatak bölümleri olmuştur. Kasnak bölgesi ve diğer ana yatak ve kol yatak bölgeleri benzer soğuma davranışı göstermiştir. Bu yüzden, analiz sonuçlarının irdelenmesi kasnak, volan ve 1. ana yatak bölümlerinde yapılmıştır.

4.3.1 Kasnak kısmında içyapı oluşumunun irdelenmesi

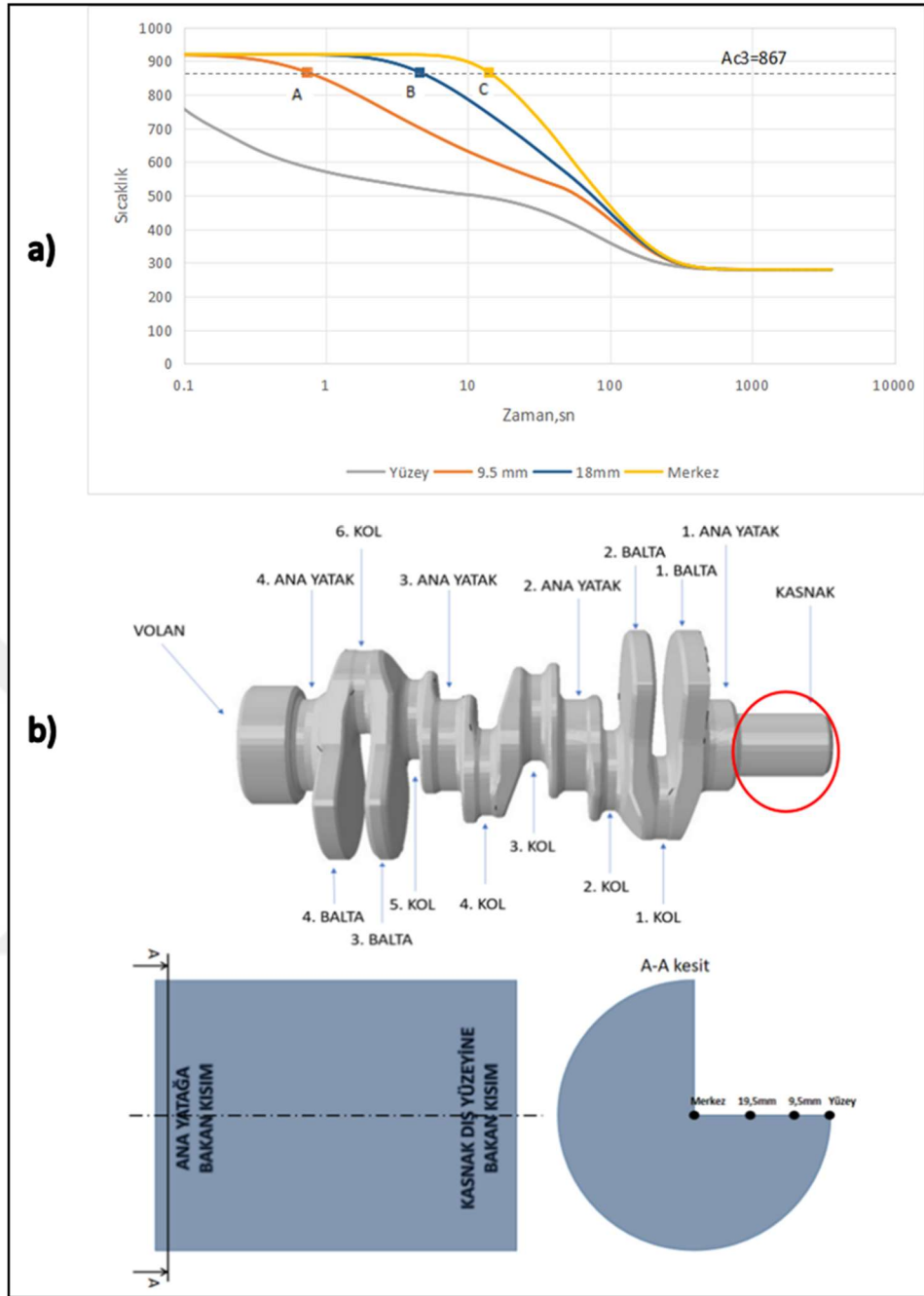
Şekil 4.5'te krank milinin kasnak bölgesindeki 519 noktadan alınan soğuma eğrileri görülmektedir.



Şekil 4.5 : Krank mili kasnak bölgesi soğuma eğrileri.

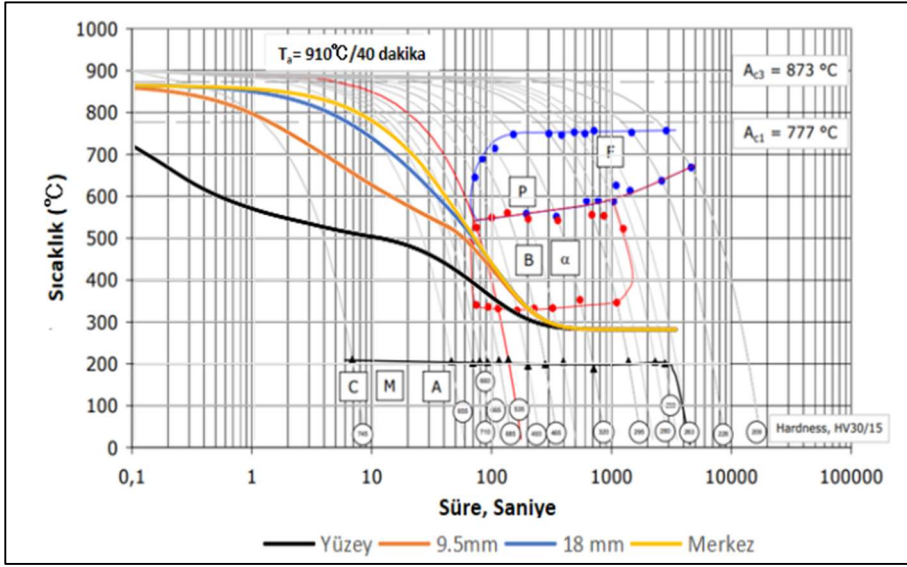
Şekil 4.5'te verilen soğuma eğrilerinin tümünün tek tek içyapı incelenmesinde ele alınmasına gerek olmadığı, soğumanın en yavaş gerçekleşeceği kritik noktaların incelenmesinin yeterli olduğu açıktır. Bu doğrultuda Şekil 4.6.a'da kasnak bölgesinin ana yatağa yakın olan kesiminden seçilen karakteristik soğuma eğrileri verilmektedir. Şekil 4.6.b 'de bu karakteristik soğuma eğrilerinin ait olduğu noktaların konumları da verilmektedir.

Şekil 4.6.a'daki soğuma eğrilerine göre en dış yüzey 0.1 saniyeden önce östenit bitiş sıcaklığının (867°C) altına düşmektedir. Diğer soğuma eğrilerinde östenit bitiş sıcaklığı A, B ve C olarak işaretlenmiştir. Şekil 4.6.a'daki soğuma eğrilerinde, kasnak bölgesinde yüzeyden 9.5 mm içeriden alınan soğuma eğrisinin faz dönüşümü başlangıç anı 0.7 saniye (A), 18 mm içeriden alınan soğuma eğrisinin faz dönüşüm başlangıç anı 4.6 saniye (B) ve merkezden alınan soğuma eğrisinin faz dönüşümü başlangıç anı 14.9 saniye (C) olmaktadır.



Şekil 4.6 : (a) Seçilen soğuma eğrilerinin A_{c3} sıcaklığına göre kıyaslanması ve (b) Kasnak bölgesinde soğuma eğrileri için seçilen noktalar.

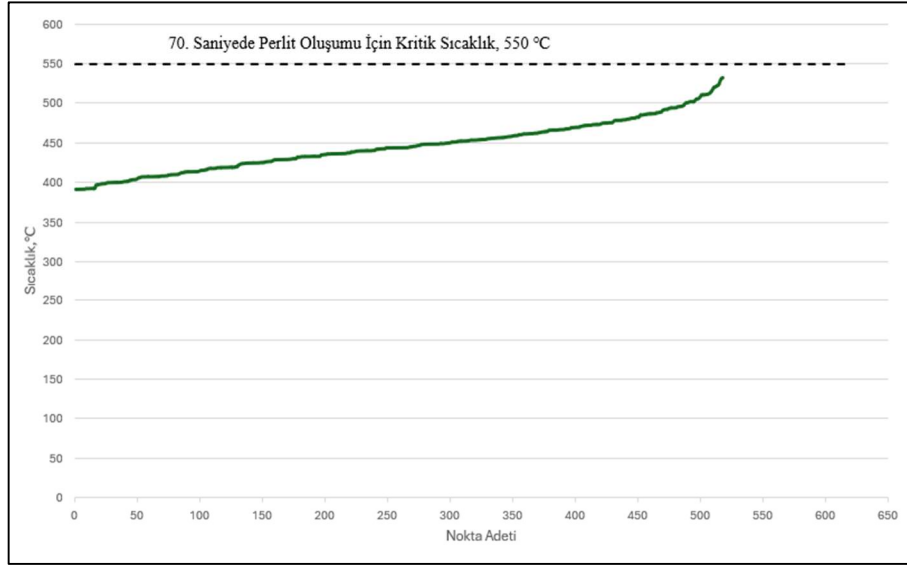
Şekil 4.6.a'daki seçilen soğuma eğrileri A, B, C başlangıç anları CCT diyagramı zaman ekseninde sıfır anına karşılık getirilerek, (A_{c3}) östenit bitiş sıcaklığından itibaren soğumayı verecek şekilde CCT şeklinde diyagramına yerleştirilmiştir. CCT diyagramına yerleştirilen soğuma eğrileri Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 : Kasnak bölgesinden seçilen soğuma eğrilerinin CCT diyagramına yerleştirilmesi mikro yapı tahmini.

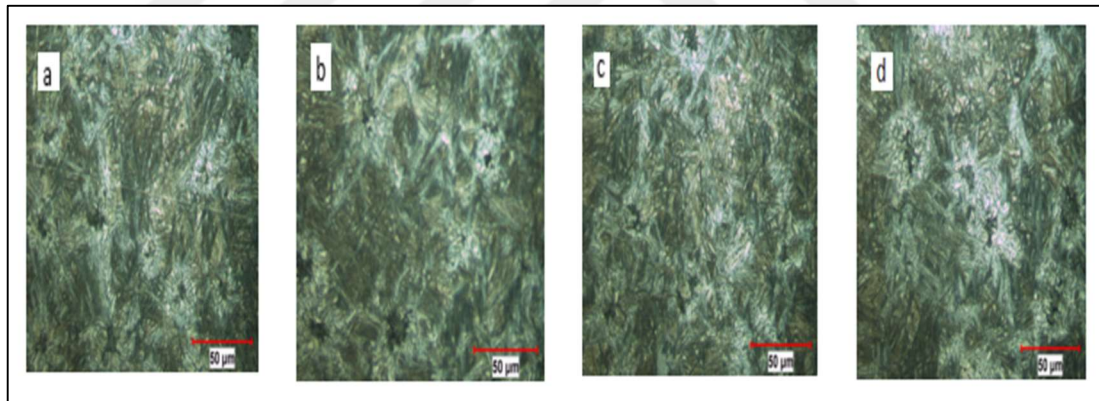
Şekil 4.7 'deki ısıtım işlem grafiği incelendiğinde, seçilen tüm soğuma eğrilerinin CCT diyagramının dirsek kısmını kesmeden yani, perlit oluşum bölgesine uğramadan ösferrit oluşum bölgesine girdiği görülmektedir. Dolayısıyla Şekil 4.7 'de incelenen seçilmiş noktalarda %100 ösferrit oluşması beklenir.

Yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda sürekli soğuma (CCT) diyagramına göre, krank milinde perlit oluşmaması için, krank mili üzerindeki herhangi bir noktanın östenit bitiş sıcaklığından (A_{c3}) düşük sıcaklığa düştüğü andan itibaren 70 saniye içerisinde $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük sıcaklığa sahip olması gerekmektedir (soğuma eğrisinin CCT diyagramının dirsek kısmını kesmemesi için). Krank milinin en yavaş soğuyan bölümleri olan volan ve 1. ana yatak bölümlerinden seçilen düğüm noktalarının A_{c3} sıcaklığına düştükleri andan itibaren 70 saniye içinde hangi sıcaklığa düştüklerini incelemek krank milinin her yerinde ösferrit iç yapısının oluşup oluşmadığını belirlemek için yeterli olacaktır. Bu doğrultuda kasnak bölgesinden 518 nokta seçilmiştir. Şekil 4.8 'deki sonuçlara göre 70. saniyede kasnaktan seçilen noktaların hepsi $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ altında kalmıştır, böylece bu bölgede perlit oluşumu gözlemlenmemesi, %100 ösferrit oluşumunun gözlemlenmesi beklenmelidir.



Şekil 4.8 : 70. saniyede kasnak bölgesinden seçilen noktaların soğudukları sıcaklıklar (noktalar en soğuktan en sıcak olanlara doğru sıralanmıştır).

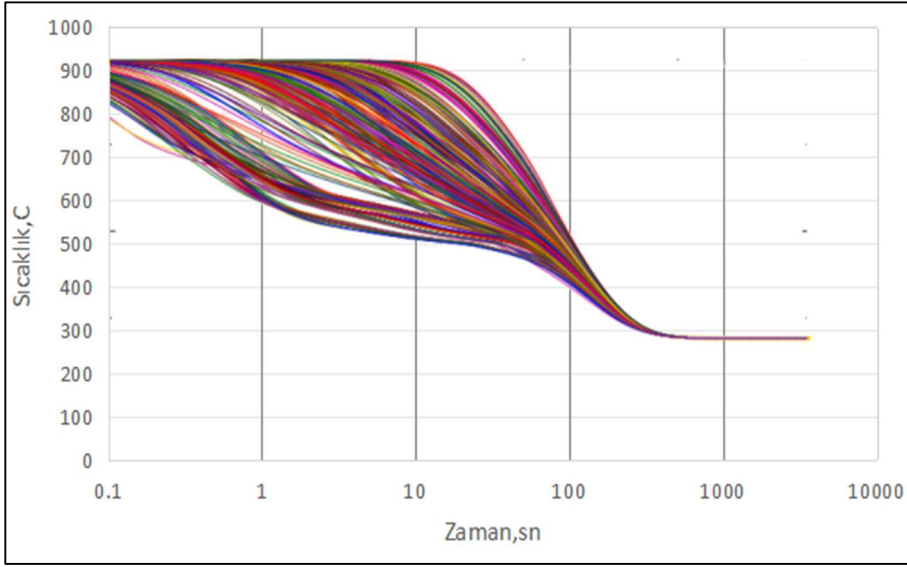
Şekil 4.7’de elde edilen sonuç metalografik görüntüler ile karşılaştırılmıştır (Şekil 4.9). Metalografik gözlemler, simülasyon sonuçları incelenen noktalarda %100 ösferrit oluştuğu değerlendirmesini doğrulamıştır.



Şekil 4.9 : Kasnak bölgesi metalografik görüntüler: a) Yüzey b) 9.5mm c)18mm d) Merkez.

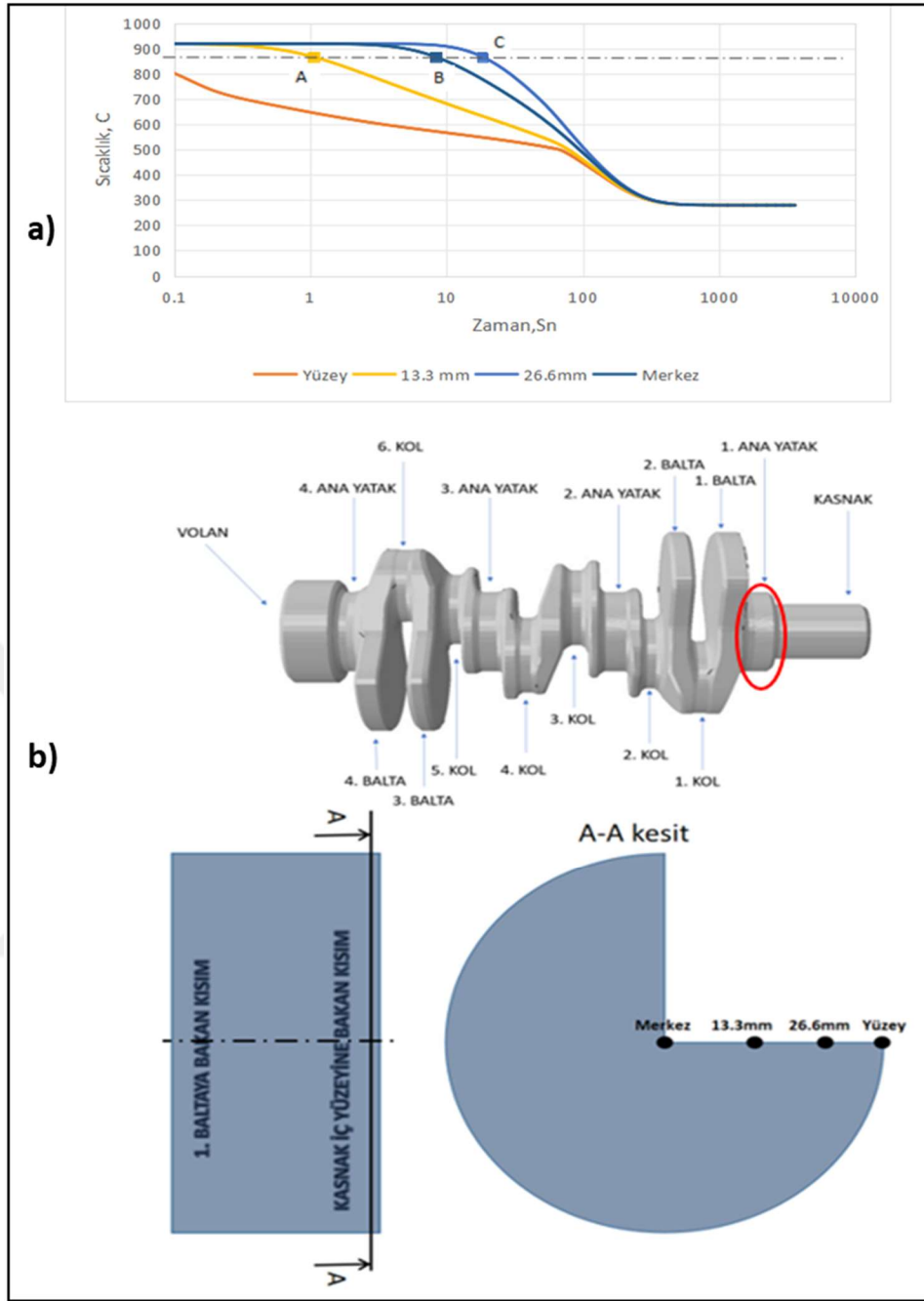
4.3.2 Krank mili 1. ana yatak kısmında içyapı oluşumunun irdelenmesi

Şekil 4.10’da krank milinin 1. ana yatak bölgesindeki 303 noktadan alınan soğuma eğrileri görülmektedir.



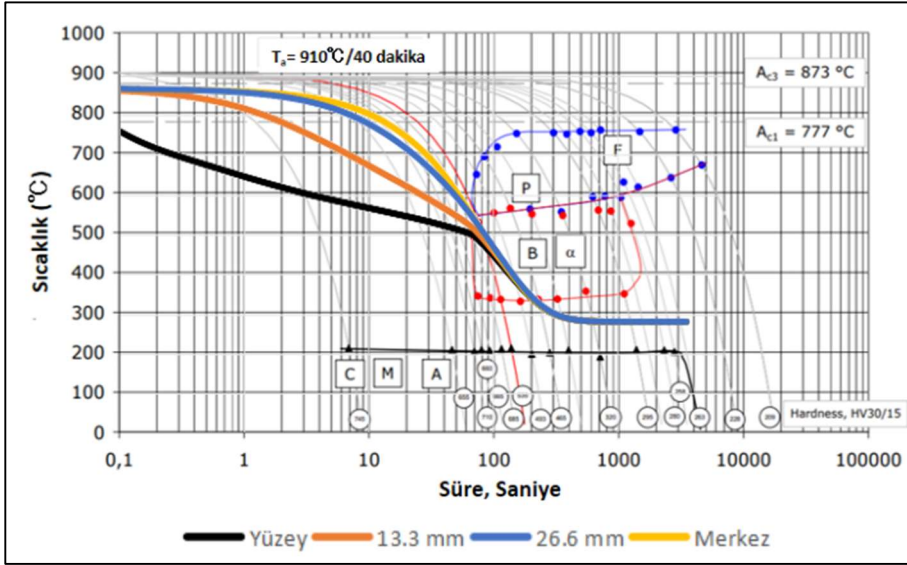
Şekil 4.10 : Krank mili 1. ana yatak bölgesi soğuma eğrileri.

Şekil 4. 10 'da verilen soğuma eğrilerinin tümünün tek tek içyapı incelemesinde ele alınmasına gerek olmadığı, soğumanın en yavaş gerçekleşeceği kritik noktaların incelenmesinin yeterli olduğu açıktır. Bu doğrultuda Şekil 4.11.a'da 1. ana yatak bölgesinin kasnak bölgesine yakın olan kesiminden seçilen karakteristik soğuma eğrileri verilmektedir. Şekil 4.11.b 'de bu karakteristik soğuma eğrilerinin ait olduğu noktaların konumları da verilmektedir. Şekil 4.11.a'daki soğuma eğrilerine göre en dış yüzey 0.1 saniyeden önce östenit bitiş sıcaklığının (867°C) altına düşmektedir. Diğer soğuma eğrilerinde östenit bitiş sıcaklığı A, B ve C olarak işaretlenmiştir. Şekil 4.11.a'daki soğuma eğrilerinde, 1. ana yatak bölgesinde yüzeyden 13.3 mm içeriden alınan soğuma eğrisinin faz dönüşümü başlangıç anı 1 saniye (A), 26.6 mm içeriden alınan soğuma eğrisinin faz dönüşüm başlangıç anı 8.3 saniye (B) ve merkezden alınan soğuma eğrisinin faz dönüşümü başlangıç anı 18.2 saniye (c) olmaktadır.



Şekil 4.11 : (a) Seçilen soğuma eğrilerinin A_{c3} sıcaklığına göre kıyaslanması ve (b) 1. ana yatak bölgesinde soğuma eğrileri için seçilen noktalar.

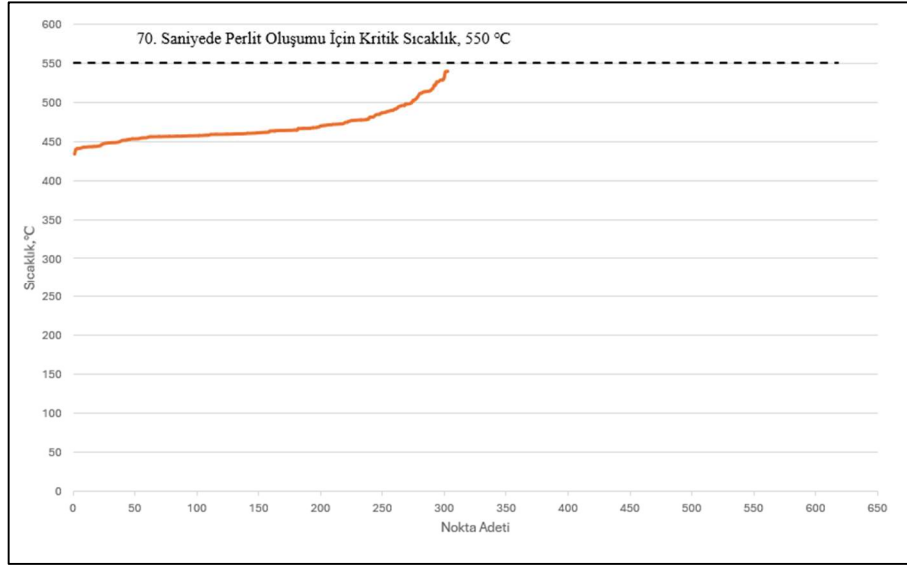
Şekil 4.11.a' daki seçilen soğuma eğrileri A, B, C başlangıç anları CCT diyagramı zaman ekseninde sıfır anına karşılık getirilerek, (A_{c3}) östenit bitiş sıcaklığından itibaren soğumayı verecek şekilde CCT şeklinde diyagramına yerleştirilmiştir. CCT diyagramına yerleştirilen soğuma eğrileri Şekil 4.12'de görülmektedir.



Şekil 4.12 : 1. ana yatak bölgesinden seçilen soğuma eğrilerinin CCT diyagramına yerleştirilmesi mikro yapı tahmini.

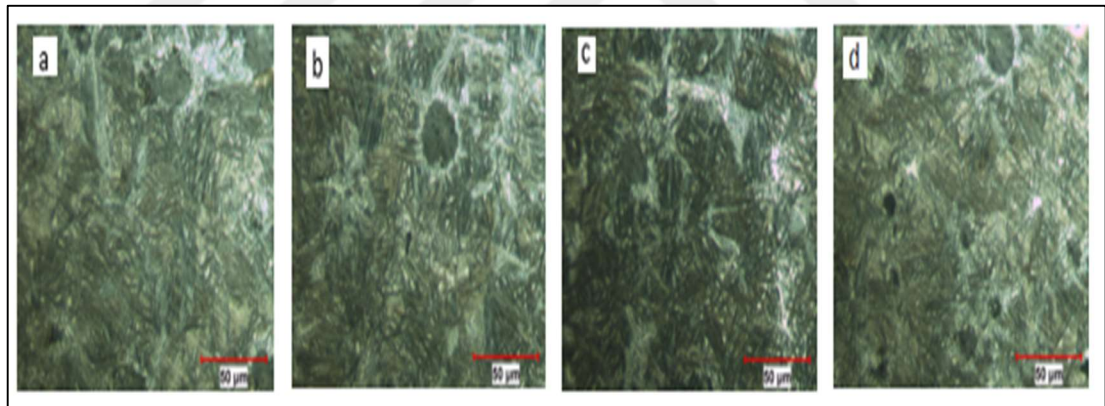
Şekil 4.12 'deki ısıl işlem grafiği incelendiğinde, seçilen tüm soğuma eğrilerinin CCT diyagramının dirsek kısmını kesmeden yani, perlit oluşum bölgesine uğramadan ösferrit oluşum bölgesine girdiği görülmektedir. Dolayısıyla Şekil 4.12 'de incelenen seçilmiş noktalarda %100 ösferrit oluşması beklenir.

Yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda sürekli soğuma (CCT) diyagramına göre, krank milinde perlit oluşmaması için, krank mili üzerindeki herhangi bir noktanın östenit bitiş sıcaklığından (A_{c3}) düşük sıcaklığa düştüğü andan itibaren 70 saniye içerisinde $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük sıcaklığa sahip olması gerekmektedir (soğuma eğrisinin CCT diyagramının dirsek kısmını kesmemesi için). Krank milinin en yavaş soğuyan bölümleri olan volan ve 1. ana yatak bölümlerinden seçilen düğüm noktalarının A_{c3} sıcaklığına düştükleri andan itibaren 70 saniye içinde hangi sıcaklığa düştüklerini incelemek krank milinin her yerinde ösferrit iç yapısının oluşup oluşmadığını belirlemek için yeterli olacaktır. Bu doğrultuda 1. ana yatak bölgesinden 303 nokta seçilmiştir. Şekil 4.13 'deki sonuçlara göre 70. saniyede 1. ana yatak bölgesinden seçilen noktaların hepsi $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ altında kalmıştır, böylece bu bölgede perlit oluşumu gözlemlenmemesi, %100 ösferrit oluşumunun gözlemlenmesi beklenmelidir. Krank milinin 2. Ana yatak, 3. Ana yatak, 4. Ana yatak, 1. Kol yatak, 2. Kol yatak, 3. Kol yatak, 4. Kol yatak ve balta bölümleri, 1. ana yatak bölümünden daha hızlı soğuma davranışı göstermesine bağlı olarak (Şekil 4.3) krankın incelemeye dahil edilmeyen bu kısımlarında da %100 ösferrit oluşacağı açıktır.



Şekil 4.13 : 70. saniyede 1. ana yatak bölgesinden seçilen noktaların soğudukları sıcaklıklar (noktalar en soğuktan en sıcak olanlara doğru sıralanmıştır).

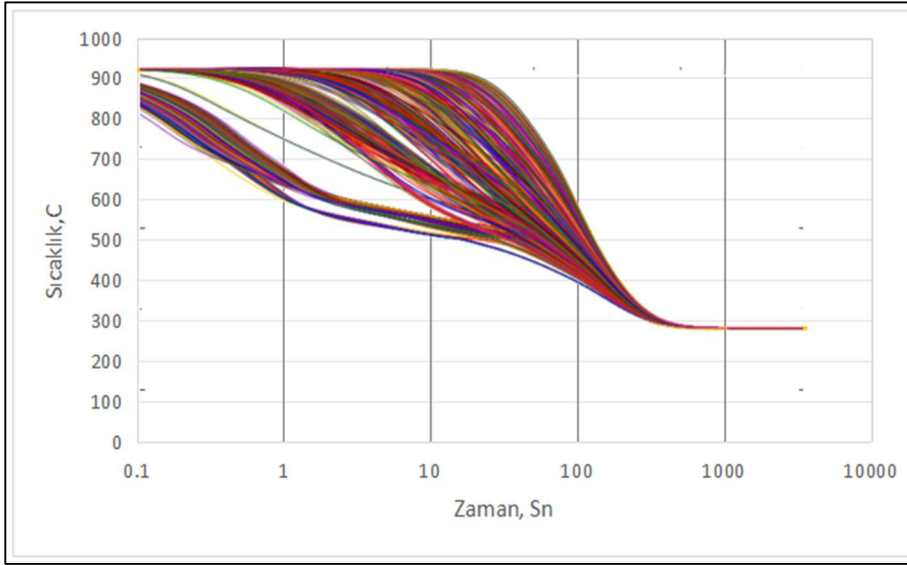
Şekil 4.12 ile varılan içyapı öngörülmesi metalografik gözlemlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.14). Metalografik gözlemler, simülasyon sonuçları incelenen 1. ana yatak noktalarında %100 ösferrit oluştuğu değerlendirilmesini doğrulamıştır.



Şekil 4.14 : 1. ana yatak bölgesi metalografik görüntüleri: a) Yüzey b) 13.3 mm c) 26.6 mm d) Merkez.

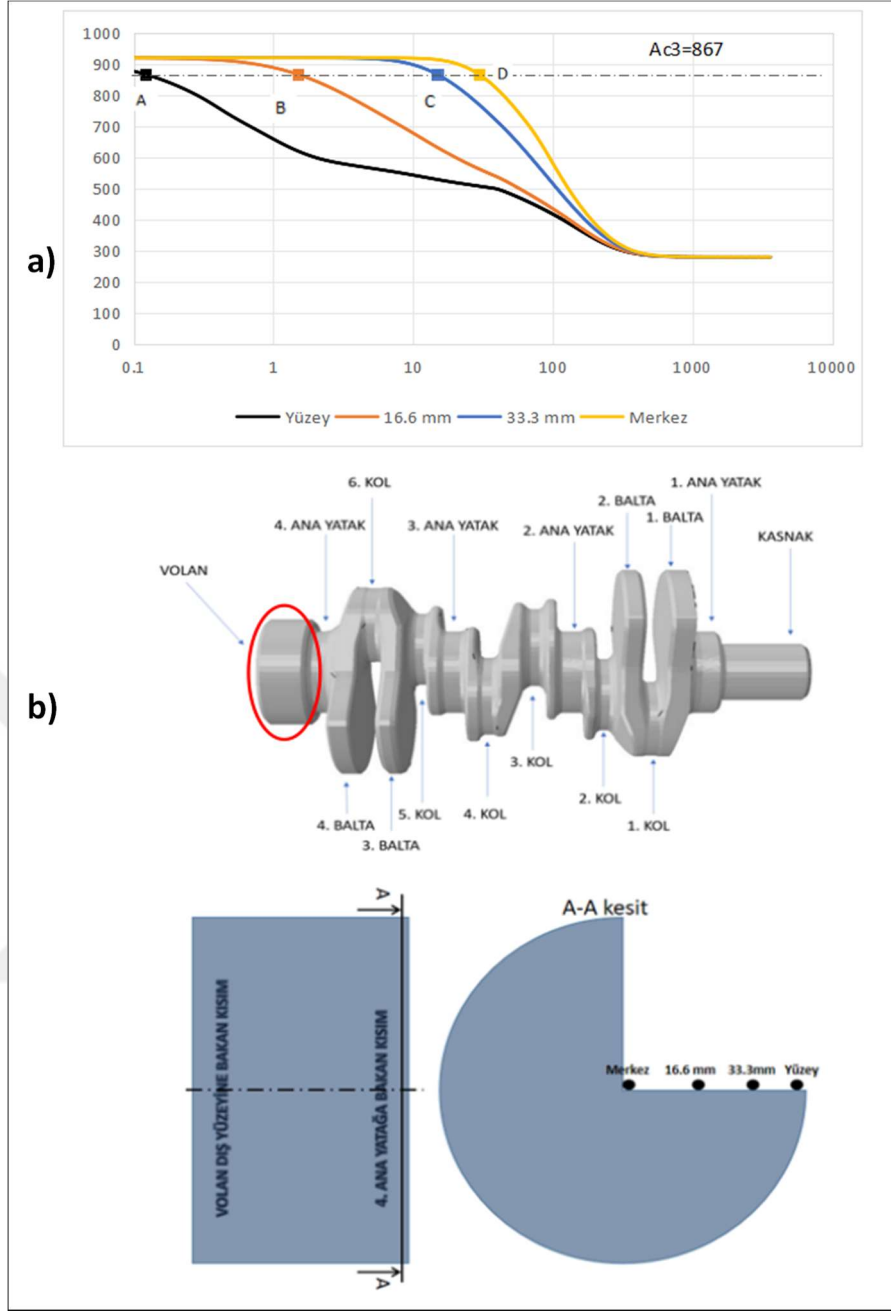
4.3.3 Volan kısmında içyapı oluşumunun irdelenmesi

Şekil 4.15'te krank milinin volan bölgesindeki 619 noktadan alınan soğuma eğrileri görülmektedir.



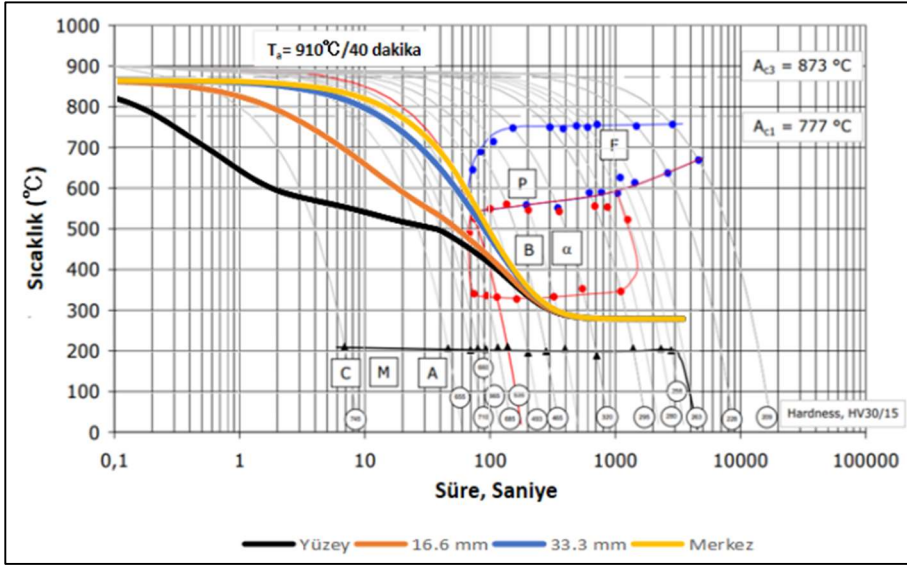
Şekil 4.15 : Krank mili volan bölgesi soğuma eğrileri.

Şekil 4. 15 'de verilen soğuma eğrilerinin tümünün tek tek içyapı incelemesinde ele alınmasına gerek olmadığı, soğumanın en yavaş gerçekleşeceği kritik noktaların incelenmesinin yeterli olduğu açıktır. Bu doğrultuda Şekil 4.16.a'da volan bölgesinin 4. ana yatak bölgesine yakın olan kesiminden seçilen karakteristik soğuma eğrileri verilmektedir. Şekil 4.16.b'de bu karakteristik soğuma eğrilerinin ait olduğu noktaların konumları da verilmektedir. Şekil 4.16.a'daki soğuma eğrilerinde östenit bitiş sıcaklığı A, B, C ve D olarak işaretlenmiştir. Şekil 4.16.a'daki soğuma eğrilerinde, volan bölgesinde yüzeyden alınan noktanın soğuma eğrisinin faz dönüşümü başlangıç anı 0.12 saniye (A), yüzeyden 16.6 mm içeriden alınan noktanın soğuma eğrisinin faz dönüşüm başlangıç anı 1.5 saniye (B), yüzeyden 33.3 mm içeriden alınan noktanın soğuma eğrisinin faz dönüşüm başlangıç anı 14.9 saniye (C) ve merkezden alınan soğuma eğrisinin faz dönüşümü başlangıç anı 29.6 saniye (D) olmaktadır.



Şekil 4.16 : (a) Seçilen soğuma eğrilerinin A_{c3} sıcaklığına göre kıyaslanması (b) Volan bölgesinde soğuma eğrileri için seçilen noktalar.

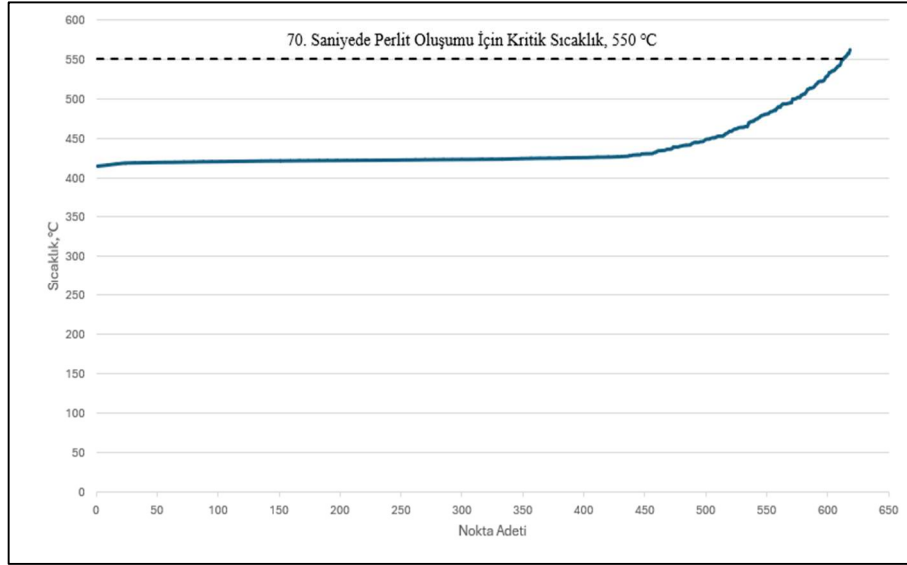
Şekil 4.16'daki seçilen soğuma eğrileri A, B, C ve D başlangıç anları CCT diyagramı zaman ekseninde sıfır anına karşılık getirilerek, (A_{c3}) östenit bitiş sıcaklığından itibaren soğumayı verecek şekilde CCT şekilde diyagramına yerleştirilmiştir (Şekil 4.17).



Şekil 4.17 : Volan bölgesinden seçilen soğuma eğrilerinin CCT diyagramına yerleştirilmesi mikro yapı tahmini.

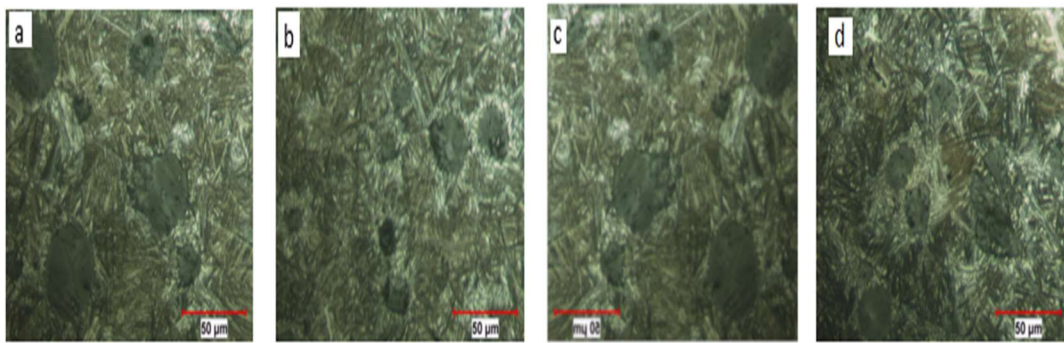
Şekil 4.17 'deki ısı işlem grafiği incelendiğinde, yüzeyde, yüzeyden 16.6 mm içerde ve yüzeyden 33.3 mm içeride olan noktadaki soğuma eğrilerinin perlit oluşum bölgesine uğramadan ösferrit oluşum bölgesine girdiği görülmektedir. Dolayısıyla bu noktalarda %100 ösferrit oluşması beklenir. Şekil 4.17 'de merkezdeki noktadan alınan soğuma eğrisinin ise perlit oluşma bölgesine çok az da olsa girdiği görülmektedir. Bu yüzden merkezdeki noktalarda perlit oluşması beklenmektedir.

Yukarıdaki açıklamalar doğrultusunda sürekli soğuma (CCT) diyagramına göre, krank milinde perlit oluşmaması için, krank mili üzerindeki herhangi bir noktanın östenit bitiş sıcaklığından (A_{c3}) düşük sıcaklığa düştüğü andan itibaren 70 saniye içerisinde $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den daha düşük sıcaklığa sahip olması gerekmektedir (soğuma eğrisinin CCT diyagramının dirsek kısmını kesmemesi için). Krank milinin en yavaş soğuyan bölümler olan volan ve 1. ana yatak bölümlerinden seçilen düğüm noktalarının A_{c3} sıcaklığına düştükleri andan itibaren 70 saniye içinde hangi sıcaklığa düştüklerini incelemek krank milinin her yerinde ösferrit iç yapısının oluşup oluşmadığını belirlemek için yeterli olacaktır. Bu doğrultuda volan bölgesinden 618 nokta seçilmiştir. Şekil 4.18 'deki sonuca göre volan bölgesinde 70. saniyede 6 noktanın (seçilen 618 noktanın 6 'sı) $550\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'nin üzerinde olduğu görülmüştür. Bu sonuca göre volan bölgesinde %99 ösferrit ve %1 perlit oluşumu öngörülmüştür



Şekil 4.18 : 70. saniyede 1. ana yatak bölgesinden seçilen noktaların soğudukları sıcaklıklar (noktalar en soğuktan en sıcak olanlara doğru sıralanmıştır).

Şekil 4.17 ile yapılan değerlendirmeler metalografik gözlemlerle karşılaştırılmıştır (Şekil 4.19). Metalografik gözlemlerde yukarıda belirtilen konumlarda %100 ösferrit oluştuğu tespit edilmiştir. Simülasyon sonuçlarına dayalı içyapı öngörülerini yüzey, yüzey altındaki 16,6 mm ve 3.3 mm noktaları için doğrulanmıştır. Merkez kısımlarında perlit oluşumu gözlemlenmediğinden, volan bölgesi merkez kısımlarının soğuma eğrisinin, perlit dönüşümünü tamamlamadan da olsa CCT diyagramındaki perlit başlangıcı dirseğini kısmen kesmiş olmasını, simülasyon sonuçlarının toleransı bağlamında değerlendirmek gerekmektedir.



Şekil 4.19 : Volan bölgesi metalografik görüntüleri: a) Yüzey b) 13.3 mm c) 26.6 mm d) Merkez.



5 . SONUÇLAR VE ÖNERİLER

1- Çalışma kapsamında EN-GJS-700 malzemedan imal edilen krank milinin ısı işlemlerinin tasarımı sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir.

2- Sonlu elemanlar yöntemi incelemeleri için gerek duyulan EN-GJS-700 malzemenin sıcaklığa bağlı özellikleri dilatometri, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ve lazer flaş yöntemi (LFY) teknikleri ile tespit edilmiştir.

3- Dilatometri analizi sonucunda östenit başlama (AC1) ve östenit bitiş sıcaklıkları (AC3) sırasıyla 787°C ve 867°C olarak tespit edilmiştir. Bu sıcaklıklar literatürde Gazda (2016)'nın bulduğu sonuçlar ile benzerlik göstermiştir.

4- DSC analizi sonucunda malzemenin sıcaklığa bağlı değişen ısı kapasitesi tespit edilmiştir. Ölçülen değerlerden, Altair Inspire Cast malzeme kütüphanesindeki malzeme verilerinin 500-900 °C sıcaklık aralığında farklı olduğu görülmüştür.

5- LFY analizi sonucunda ısı yayılım katsayısı değerleri ölçülmüştür ve bu değerler kullanılarak ısı iletim kat sayıları hesaplanmıştır. Hesaplanan ısı iletim kat sayılarının, Altair Inspire Cast malzeme kütüphanesindeki malzeme verileri ile çok yakın oldukları tespit edilmiştir.

6- Isı taşınım katsayısını hesaplayabilmek için Petrofer AS-135 tuza ait, ISO 9950 standardına göre hazırlanmış soğuma eğrileri kullanılmıştır. Soğuma eğrileri elde etmek için kullanılan deney ABAQUS FEA yazılımında farklı ısı taşınım katsayısı veri gruplarıyla simüle edilmiştir. Sıcaklığa bağlı ısı taşınım katsayısı verileri elde edilmiştir.

7- Isıl analiz simülasyonu sonucunda, en yavaş soğuyan bölgelerin 1. ana yatak ve volan bölgeleri olduğu tespit edilmiştir. Kasnak, 1. kol, 2. ana, 2. kol, 3. ana, 3. kol, 4. ana, 4. kol, 5. kol ve 6. kol bölgeleri benzer soğuma davranışı göstermişlerdir. En hızlı soğuyan bölgelerin krank milinin balta bölgeleri olduğu görülmüştür.

8- Simülasyon sonuçlarına göre Kasnak ve 1. ana yatak bölgesinde östenitten ösferrite %100 dönüşüm olacağı, volan bölgesinde ise östenitten ösferrite %99 dönüşüm olacağı tahmin edilmiştir.

9- Simülasyon sonuçlarına dayalı ısı işlem sonrası içyapı öngörülere, öngörü için seçilen soğuma eğrilerinin alındığı noktalara ait numunelere ait metalografik görüntülerle karşılaştırılmıştır. Alınan görüntülere göre krank mili üzerinde her yerde %100 ösferrit oluşumu gözlenmiştir. Volan merkez bölgesinde simülasyon sonuçlarına göre %1 oranında oluşması öngörülen perlit fazına metalografik görüntülerde rastlanmamıştır.

10- İçyapıdaki faz türlerini belirlemedeki %1'lik hata payının incelenmesinde; optik mikroskopla yapılan metalografik görüntülerin düşük hacim oranlarına sahip küçük boyutlu fazları görüntüleyebilme kabiliyeti, analizlerin sıcaklığa bağlı malzeme özelliklerinin simülasyon tekniği gereği ortalama değerlerle ele alınmasını gerektiren sıcaklık aralıklarını içermesi ve simülasyonların sayısal hesaplamalara dayanması hususları birlikte dikkate alınmalıdır. Bu bağlamda krank milinin östemperleme ısı işlemi prosesi, kabul edilebilir başarıyla modellenmiş ve analiz edilmiştir.

11- Çalışma literatüre EN-GJS-700 standardındaki küresel dökme demir malzeme için ısı kapasitesi, kritik dönüşüm sıcaklıkları, ısı iletkenlik katsayısı ve ısı genleşme katsayısı gibi ısı analiz için gerekli sıcaklığa bağlı malzeme değerlerini kazandırmıştır. Ayrıca bir makine parçasının sonlu elemanlar yöntemini kullanarak elde edilen soğuma eğrileri ve CCT diyagramları yardımıyla, bir ısı işlem süreci tasarımının ve analizinin pratik uygulamasına dair ayrıntılar ele alınmıştır.

12- Gelecekteki çalışmalarda, mevcut simülasyon çalışmasına mekanik analiz de dahil edilerek, ısı işlem sonucu meydana gelebilecek plastik şekil değişiminin ve artık gerilmelerin tespit edilmesi hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] **Elliott, R.**, (1988). Cast Iron Technology. Butterworth-Heinemann. Retrieved from http://books.google.ie/books?id=_OdbAwAAQBAJ&printsec=frontcover&q=cast+iron+technology&hl=&cd=1&source=gbs_api
- [2] **Berns, H., & Theisen, W.**, (2008). Ferrous materials: Steel and cast iron. Springer Science & Business Media.
- [3] **Glaeser, A.**,(1992) Chapter 4. Cast Iron, Tribology Series, Elsevier, Volume 20, 89-113.
- [4] **Angus, H. T.**, (2013). Cast iron: physical and engineering properties. Elsevier.
- [5] **Budinski, K. G., & Budinski, M. K.** (1983). Engineering materials. Pearson Education India.
- [6] **Collini, L., Nicoletto, G., & Konečná, R.** (2008). Microstructure and mechanical properties of pearlitic gray cast iron. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 488(1–2), 529–539. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2007.11.070>
- [7] **Ngqase, M., & Pan, X.** (2020). An overview on types of white cast irons and high chromium white cast irons. Journal of Physics. Conference Series, 1495(1), 012023. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1495/1/012023>
- [8] **Sevgi, E., & Çulha, O.** (2021). Isıl İşlem Şartlarının Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi. Deu Muhendislik Fakültesi Fen ve Muhendislik, 23(69), 1033–1048. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2021236929>
- [9] **Uzunova, T.** (1967). Küresel Grafitli Dökme Demir. Scientific Mining Journal, 6(4), 240-245.
- [10] **DIN European Standard.** (2012) Founding – spheroidal graphite cast irons (EN 1563:2012-03, <https://webstore.ansi.org/standards/din/dinen15632012.>)
- [11] **Labrecque, C., & Gagne, M.** (1998). Ductile iron: Fifty years of continuous development. Canadian metallurgical quarterly, 37(5), 343-378.
- [12] **Keleş, A., Cengiz, R., & Yildirim, M.** (2023). Effect of alloying elements and technological parameters of austempering on the structure and mechanical properties of ductile cast iron (ADI). Metal Science and Heat Treatment, 65(3–4), 191–199. <https://doi.org/10.1007/s11041-023-00914-1>,
- [13] **Chiniforush, E. A., Rahimi, M. A., & Yazdani, S.** (2016). Dry sliding wear of Ni alloyed austempered ductile iron. China Foundry, 13, 361-367.
- [14] **Blackmore, P. A., and R. A. Harding.** (1984)"The effects of metallurgical process variables on the properties of austempered ductile irons." Journal of Heat Treating 3.4: 310-325.

- [15] **Putatunda, K.** (2001) "Development of austempered ductile cast iron (ADI) with simultaneous high yield strength and fracture toughness by a novel two-step austempering process." *Materials Science and Engineering: A* 315.1-2: 70-80.
- [16] **Gorny M.**, (2019) Role of Austenitization Temperature on Structure Homogeneity and Transformation Kinetics in Austempered Ductile Iron, *Metals and Materials International*, 25:956-965
- [17] **Bendikiene, R., Ciuplys, A., Cesnavicius, R., Jutas, A., Bahdanovich, A., Marmysh, D., Nasan, A., Shemet, L., & Sherbakov, S.** (2021). Influence of austempering temperatures on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron. *Metals*, 11(6), 967. <https://doi.org/10.3390/met11060967>
- [18] **Bosnjak, B., & Radulovic, B.** (1999). Effect of austempering temperature on microstructure and mechanical properties of unalloyed ductile iron. *Kovine Zlitine Tehnologije(Slovenia)*, 33(6), 401-404.
- [19] **Sellamuthu, P., Samuel, D. H., Dinakaran, D., Premkumar, V. P., Li, Z., & Seetharaman, S.** (2018). Austempered ductile iron (ADI): Influence of austempering temperature on microstructure, mechanical and wear properties and energy consumption. *Metals*, 8(1), 53.
- [20] **Liu, J. H., Xiong, P., Fu, B. G., Yang, W. T., Zhao, X. B., Han, Z. A., & Li, G. L.** (2018). Effects of austempering temperature on microstructure and surface residual stress of carbidic austempered ductile iron (CADI) grinding balls. *China Foundry*, 15, 173-181.
- [21] **Menk, W., Kniewallner, L., & Prukner, S.** (2007). Cast crankshafts as an alternative to forged crankshafts: New perspectives in automotive construction. *MTZ Worldwide*, 68(5), 23–24. <https://doi.org/10.1007/bf03226828>
- [22] **Myagkov, L. L., Mahkamov, K., Chainov, N. D., & Makhkamova, I.** (2014). Advanced and conventional internal combustion engine materials. In *Alternative Fuels and Advanced Vehicle Technologies for Improved Environmental Performance* (pp. 370-408e). Woodhead Publishing.
- [23] **Kovacs, B. V.** (1987). Development of austempered ductile iron (ADI) for automobile crankshafts. *Journal of Heat Treating*, 5(1), 55–60. <https://doi.org/10.1007/bf02831620>
- [24] **Bahmani, M., Elliott, R., & Varahram, N.** (1997). Austempered ductile iron: a competitive alternative for forged induction-hardened steel crankshafts. *International Journal of Cast Metals Research*, 9(5), 249–257. <https://doi.org/10.1080/13640461.1997.11819666>
- [25] **Mackerle, J.** (2003). Finite element analysis and simulation of quenching and other heat treatment processes. *Computational Materials Science*, 27(3), 313–332. [https://doi.org/10.1016/s0927-0256\(03\)00038-7](https://doi.org/10.1016/s0927-0256(03)00038-7)
- [26] **Rohde, J., & Jeppsson, A.** (2000). Literature review of heat treatment simulations with respect to phase transformation, residual stresses and distortion. *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 29(2), 47–62. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0692.2000.d01-6.x>

- [27] **T. Inoue et al.**, (1976) Stress analysis during quenching and tempering, *J. Soc. Mater. Sci. Jpn.* 25 (273) 521–526.
- [28] **T. Inoue et al.**, (1986) Simulation of quenching process of carburized steel gear under metallo-thermomechanical coupling, *Thermomech. Coupl. Solids*, Paris, pp. 257–262.
- [29] **Aksel, B., Arthur, W. R., & Mukherjee, S.** (1992). A study of quenching: Experiment and modelling. *Journal of Engineering for Industry*, 114(3), 309–316. <https://doi.org/10.1115/1.2899797>
- [30] **Huiping, L., Guoqun, Z., Shanting, N., & Chuanzhen, H.** (2007). FEM simulation of quenching process and experimental verification of simulation results. *Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 452–453, 705–714. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.11.023>
- [31] **Bortoleto, E. M., Sarmiento, G. S., Fioranelli, A., & Gastón, A.** (2009). Using ABAQUS user subroutines to develop a new finite element modeling tool for heat treatment simulation. In 2009 SIMULIA Customer Conference.
- [32] **Roy, A., et al** (1996). "Mathematical modelling of austempering by finite element method.": 130-140.
- [33] **Kapturkiewicz, W., Burbelko, A. A., Lelito, J., & Frasz, E.** (2003). Modelling of ausferrite growth in ADI. *International Journal of Cast Metals Research*, 16(1–3), 287–292. <https://doi.org/10.1080/13640461.2003.11819597>
- [34] **Celentano, Diego Javier, et al.** (2013) "Thermomechanical–microstructural modelling of nodular cast iron solidification." *Materials Science and Technology* 29.2 : 156-164.
- [35] **Dardati, Patricia M., Luis A. Godoy, and Diego J. Celentano.** (2006) "Microstructural simulation of solidification process of spheroidal-graphite cast iron." : 977-983.
- [36] **Dardati, P. M., et al.** (2009) "Analysis of ductile cast iron solidification: numerical simulation and experimental validation." *International Journal of Cast Metals Research* 22.5 :390-400.
- [37] **Boccardo, Adrián D., et al.** (2018) "Design of the austempering heat treatment of a ductile iron differential case aided by computer simulation." *Latin American Journal of Solids and Structures* 15 (2018).
- [38] **Boccardo, Adrian Dante, et al.** (2017). "Austempering heat treatment of ductile iron: Computational simulation and experimental validation." *Finite Elements in Analysis and Design* 134: 82-91.
- [39] **Hepp, E., V. Hurevich, and W. Schäfer.** (2012)"Integrated modeling and heat treatment simulation of austempered ductile iron." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 33. No. 1. IOP Publishing, 2012
- [40] **Wei, De Qiang, et al.** (2013) "Numerical Simulation of Temperature Field of Low Alloyed Bainite Ductile Iron in Austempering." *Applied Mechanics and Materials*. Vol. 271. Trans Tech Publications Ltd.

- [41] **Bergman, T. L., Lavine, A. S., Incropera, F. P., & DeWitt, D. P.** (2017). *Incropera's principles of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- [42] **Şimşir, C., & Gür, C. H.** (2008). A FEM based framework for simulation of thermal treatments: Application to steel quenching. *Computational Materials Science*, 44(2), 588–600. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2008.04.021>
- [43] **Galanin, M. P., Proshunin, N. N., Rodin, A. S., & Sorokin, D. L.** (2016). Solution of the three-dimensional unsteady heat equation by the finite element method taking into account phase transitions. *Preprints of the Institute of Applied Mathematics named after. MV Keldysh RAS*, (0), 66-27.
- [44] **Heuser, J.** (1973). *Finite element method for thermal analysis* (No. NASA-TN-D-7274).
- [45] **Huang, H.-C., & Usmani, A. S.** (1994). *Finite Element Analysis for Heat Transfer*. Springer London.
- [46] **Gazda, A.** (2016). Determination of the optimal austempering parameters of Ni–Cu (Mo, Mn) ductile iron based on CCT and ZSD diagrams. *Prace Inst Odlew.*, 56, 133-145.
- [47] **Menczel, J. D., Judovits, L., Prime, R. B., Bair, H. E., Reading, M., & Swier, S.** (2009). Differential Scanning Calorimetry (DSC). In *Thermal Analysis of Polymers* (pp. 7–239). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470423837.ch2>
- [48] **Hunkel, M., Surm, H., & Steinbacher, M.** (2018). Dilatometry. In *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry* (Vol. 6, pp. 103-129). Elsevier Science BV.
- [49] **Çaylan, Ö. R.** (2019). *Grafen-bakır heteroyapıların üretimi, karakterizasyonu ve ısı dağıtım performanslarının incelenmesi* (Master's thesis, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- [50] **Zhang, Z. X., Yu, J., Kou, S. Q., & Lindqvist, P. A.** (2001). Effects of high temperatures on dynamic rock fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 38(2), 211-225.
- [51] **Liščić, B., & Filetin, T.** (2012). Measurement of quenching intensity, calculation of heat transfer coefficient and global database of liquid quenchants. *Materiálové inžinierstvo*, 19(2), 52-63.
- [52] **Liščić, B., & Singer, S.** (2014) Calculation Of The Heat Transfer Coefficient Based On Experiments By The Liscic Probes.
- [53] **Singer, S.** (2014). Sensitivity of the Heat Transfer Coefficient Calculation. arXiv preprint arXiv:1401.2983.
- [54] **ISO 9950:1995.** (2022). ISO. <https://www.iso.org/standard/17848.html>
- [55] **Petrofer.** (2024, Şubat). AS 134 tuz soğuma eğrileri.
- [56] **Said, D., Belinato, G., Simencio Otero, R. L., Canale, L. C., Sarmiento, G. S., Gastón, A., & Totten, G. E.** (2011). Effect of the oxidation stability of soybean oil and palm oil on steel quenching performance. In *Proceedings of the 26th ASM Heat Treating Society Conference*, BL

Ferguson, R. Jones, DS MacKenzie, and D. Weires, Eds., Cincinnati, OH, Oct (pp. 258-265).

[57] **Dassault Systemes.** (2013). Abaqus User's Guide.

[58] **Altair.** (2020). Altair Inspire Cast 2020 Student Edition [Computer Software].
<https://altair.com/inspire-cast>





ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Hakkı Berke Soydemir

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2020, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Lisans** : 2022, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya ve Metalurji Fakültesi, Metalurji Malzeme Mühendisliği

YÜKSEK LİSANS TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Soydemir H. B.**, Şafak Y., Solak N., (2024). Identification of Thermal Properties of Nodular Graphite EN-GJS-700 Cast Iron. *International Graduate Research Symposium-Igrs '24*, May 8-10, 2024 Istanbul, Turkey