



## Isıl İşlem Şartlarının Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi

### The Effect of Heat Treatment Conditions on the Properties of Ductile Cast Irons

Ezgi Sevgi <sup>1\*</sup>, Osman Çulha <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Kocaer Çelik San. ve Tic. A.Ş., İzmir, TÜRKİYE

<sup>2</sup> Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Manisa, TÜRKİYE

Sorumlu Yazar / Corresponding Author \*: [ezgi.sevgi@kocaersteel.com](mailto:ezgi.sevgi@kocaersteel.com)

Geliş Tarihi / Received: 15.10.2020

Araştırma Makalesi/Research Article

Kabul Tarihi / Accepted: 27.01.2021

DOI:10.21205/deufmd.2021236929

Atıf şekli/How to cite: SEVGİ E., ÇULHA O.(2021). Isıl İşlem Şartlarının Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Özelliklerine Etkisi. DEÜFMD 23(69), 1033-1048.

#### Öz

Bu çalışmada, küresel grafitli dökme demirlere uygulanan ısıl işlem şartlarının mekanik ve metalurjik özelliklere etkisi araştırılmıştır. GGG-40 küresel grafitli dökme demir numunelerin içerdiği alaşım elementleri JMatPro simülasyon yazılımına işlenmiş ve TTT ile CCT diyagramları elde edilmiştir. Küresel grafitli dökme demir numuneler ısıl işlem fırınında 940°C sıcaklıkta 38 dk östenitlenmiştir. Isıl işlem şartlarının malzeme özelliklerine etkisinin incelenmesi amacı ile numuneler östenitleme işlem sonrasında farklı soğuma ortamlarında soğutulmuştur. Soğutma ortamı olarak sırası ile su, yağ, fan, hava ve fırın kullanılmıştır. Isıl işlemin sonrasında, soğuma hızına bağlı olarak malzemenin mikroyapı ve sertlik değişimlerinin incelenmesi amacı ile metalografik ve mekanik testler yapılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen veriler kıyaslandığında, soğuma hızının artması sonucunda ferrit oranının azaldığı ve perlit oranının arttığı gözlemlenirken, aynı zamanda sertlikte artış olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Küresel Grafitli Dökme Demir, Isıl İşlem, Soğuma Şartları, Malzeme Özellikleri

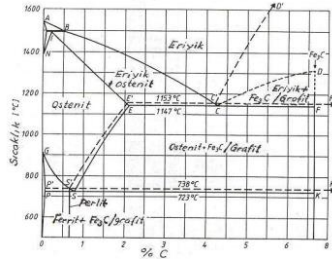
#### Abstract

In this study, the effect of heat treatment conditions applied to ductile cast irons on mechanical and metallurgical properties were investigated. The chemical composition of GGG-40 ductile cast iron samples was transferred to JMatPro simulation software and TTT and CCT diagrams were obtained. Ductile cast iron samples were austenitized in a heat treatment furnace at 940°C for 38 min. Water, oil, fan, air and oven are used respectively as cooling medium. After the heat treatment, metallographic and mechanical examinations were conducted to investigate the changes in microstructure and hardness of materials depending on the cooling rate. When the data obtained as a result of the study were compared; while it was observed that the ferrite ratio decreased and the pearlite ratio increased as a result of the increase in the cooling rate, at the same time increase in the hardness was determined.

**Keywords:** Ductile Cast Iron, Heat Treatment, Cooling Conditions, Material Properties

## 1. Giriş

Çelikler gibi demir alaşımının geniş bir bölümü dökme demirler olup, içeriğinde %2'den daha fazla karbon içermektedir. Bu sebep ile demir-karbon alaşımı olarak nitelendirilirler. Buna ek olarak, fazla "C" elementi, dökme demirlerin gevrekleşmesine sebep olmaktadır. Bundan dolayı ticari kullanımlarda dökme demirler için "C" oranının %2,5-%4 aralığında olması tercih edilmektedir. Ayrıca dökme demirler yüksek oranda C ve Si içermektedirler. Ötektik bölgede Fe<sub>3</sub>C fazı içerirler ve bu faz karbonca zengindir, bu durumda dökme demirler bu bölgede yarı kararlıdır. Kararlı durumda ise ötektik bölgede grafit fazı içerirler [1].



Şekil 1. Demir-karbon denge diyagramı [2]

Dökme demirler genellikle mikroyapılarına göre sınıflandırılırlar. Mikroyapı durumunu etkileyen faktörler ise, "C" oranı, alaşım elementleri veya emprüte miktarı, katılma

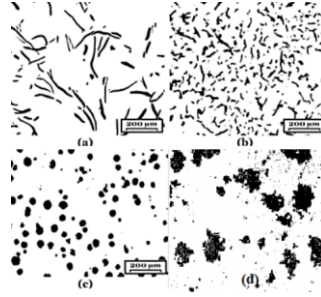
**Tablo 1.** Dökme demirlerin sınıflandırılması [6].

Ticari Adı (dökme demir)	Karbonca Zengin Faz	Matris	Kırılma Görünümü	Nihai İşlem
Gri	Lamelli grafit	Perlit	Gri	Katılma
Sünek	Küresel grafitli	Ferrit, Perlit, Östenit	Gümüş - Gri	Katılma veya ısı işlem
Yumru grafitli	Yumru (vermiküler) grafit	Ferrit, Perlit	Gri	Katılma
Beyaz	Sementit	Perlit, Martenzit	Beyaz	Katılma veya ısı işlem
Benekli	Lamel grafit + sementit	Perlit	Benekli	Katılma
Temper	Temperlenmiş grafit	Ferrit, Perlit	Gümüş - Gri	Isıl işlem
Östemperlenmiş	Küresel grafit	Beynit	Gümüş - Gri	Isıl işlem

En eski dökme demir sınıfı, halen birçok alanda kullanılan ve yüksek karbon içerikli karbon-silisyum alaşımı olan gri dökme demirlerdir. Tablo 2'de bazı dökme demir kimyasal içeriği

durumu, soğuma oranı/hızı ve ısıl işlemdir [3, 4].

Geçmişleri en az 14. yüzyıla dayanan ve mühendislik malzemesi olan dökme demirlerin tarihsel olarak ilk sınıflandırmaları kırılma yüzeylerine göre yapılmış olup bunlar gri ve beyaz dökme demirlerdir. Akabinde, metalografide meydana gelen gelişmeler neticesinde elde edilen bilgi birikimi vasıtasıyla sınıflandırmalar, mikroyapı durumuna göre yapılmaya başlamıştır [5]. Gri, beyaz, temper, küresel grafitli ve alaşım dökme demirler günümüzde endüstride en çok kullanılan dökme demirler olup, Tablo 1'de bunların şematik olarak gösterimi verilmiştir [6, 7].



Şekil 2. Grafit yapısına göre; a) Lamel grafitli dökme demir, b) Kompakt grafitli dökme demir, c) Küresel grafitli dökme demir d) Temper grafitli dökme demir [8, 9]

hakkında bilgi verilmiştir. Temper dökme demirler benzer kompozisyona sahiptir, ancak süneklik özelliğinin verilebilmesi amacıyla ısıl işlem uygulamaları ile

değiştirilmektedir. Beyaz dökme demirler ise sert ham döküm yapısındadır. Küresel grafitli dökme demirlerin ise sünekliği temper dökme demirlerinki ile benzerlik göstermektedir, ancak burada süneklik küreselleştirici alaşım elementleri ile sağlanmaktadır. Genel olarak gri ya da beyaz dökme demirlere alaşım ilavesi ile daha sert ve korozyon dayanımı daha iyi dökme demir olan alaşım dökme demirler elde edilmektedir [6].

Bu sebeple, döküm sektörünün ilk başlangıcı gri dökme demirler olarak söylenebilir. Sonrasında küresel grafitli dökme demirler tanıtılmış ve bu türün mekanik özelliklerinin çeliğe en yakın

olduğu tespit edilmiştir [7, 10]. Serbest karbonun küresel şekilde bulunduğu küresel grafitli dökme demir malzemeler "nodüler, duktıl ve sfero" olarak adlandırılmaktadır. Döküm öncesi ergiyiğe az oranda Mg ve Ce elementi katkısı ile sementitin oluşumunun önlenmesi neticesinde küresel grafitler oluşmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlerin kimyasal içeriği gri dökme demirlere benzemektedir, ancak az oranda kükürt ve fosfor bulunmaktadır. Temper dökme demirler ile kıyaslandığında ise küresel grafitli dökme demirlerin akma dayanımları daha iyidir. [11, 12, 13, 14].

**Tablo 2.** Bazı dökme demirlerin kimyasal bileşimi [5, 15]

Dökme Demir	C	Si	Mn	P	S
Gri	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.002-1.0	0.02-0.25
Yumru grafitli	2.5-4.0	1.0-3.0	0.2-1.0	0.01-0.5	0.01-0.03
Sünek	3.0-4.0	1.8-2.8	0.1-1.0	0.01-0.1	0.01-0.03
Beyaz	1.8-3.6	0.5-1.9	0.25-0.8	0.06-0.2	0.06-0.2
Temper	2.2-2.9	0.9-1.9	0.15-1.2	0.02-0.2	0.06-0.2

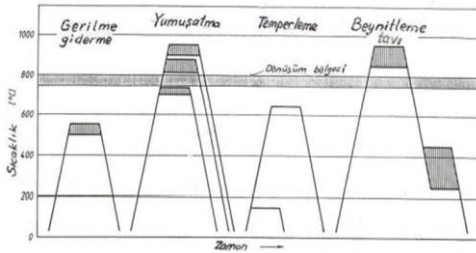
**Tablo 3.** Küresel grafitli dökme demir ve farklı malzemelerin özellikleri (1: En iyi ve 5: En kötü) [16]

Özellik	Küresel Grafitli Dökme Demir	Temper Dökme Demir	Gri Dökme Demir	Beyaz Dökme Demir	%0,3 Karbonlu Çelik Dökümü
Dökülebilirlik	1	2	1	3	5
İşlenebilirlik	2	2	1	-	3
Titreşim sönümlenme	2	2	1	5	4
Yüzey sertleştirilebilirlik	1	1	1	-	3
Elastik modülü	1	2	3	-	1
Darbe dayanımı	2	3	5	-	1
Korozyon dayanımı	1	2	1	5	4
Dayanım/ağırlık oranı	1	4	5	-	3
Aşınma dayanımı	2	4	3	1	5
Üretim maliyeti	2	3	1	2	4

Küresel grafitli dökme demirlerin ayrıca; yüksek üretim maliyeti az, aşınma ve korozyon dayanımı iyidir ve kompleks şekillerde üretime akışkanlık özelliği iyi, şekil alabilme kabiliyeti

imkan vermektedir. Bu sebep ile yapısal uygulamalarda ve otomotiv sektöründe olmak üzere daha pek çok endüstriyel alanlarda sahip oldukları özellikler sebebi ile tercih edilmekte ve kullanılmaktadır [17].

Uygulanan ısı işlemleri ile küresel grafitli dökme demirlerin üstün özelliklere sahip olması sağlanmaktadır. Küresel grafitli dökme demirlere uygulanmakta olan ısı işlemleri; gerilim giderme tavlama, yumuşatma tavlama, normalizasyon, su verme ve ıslah etme, östempereleme olmak üzere sıralanmaktadır [2].



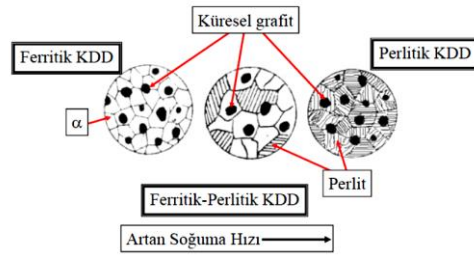
**Şekil 3.** Dökme demir ısı işlemleri ve sıcaklık-zaman grafiği [2]

Küresel grafitli dökme demirlere uygulanan ısı işlemleri için geçerli olan sıcaklık-zaman grafiği Şekil 3'teki gibidir. Dökme demirler için uygulanmakta olan ısı işlemlerinin çeliğinkine benzediği Şekil 3'te de görülmektedir. Ancak, dökme demir kimyasal kompozisyonunda bulunan farklı alaşım elementleri dönüşümü kararlı veya yarı-kararlı kılmaktadır ve alaşım elementleri bu durumu etkilemektedir. Böylece dökme demirlerin ısı işlemi çeliklerinkinden farklılık göstermektedir. Buna ek olarak, dökme demirlerde bağlı karbon elementi, uygun sıcaklıkta grafit formunda ayrılmaktadır [2].

Küresel grafitli dökme demirlerde dönüşüm çeliklere benzemektedir. Dönüşüm östenitten ferrit ve perlite doğru ilerlemektedir. Ancak yapı oluşumu çeliktan farklıdır ki ferrit ile perlit oluşum miktarı difüzyon kontrollüdür. Alaşım elementi türü ve miktarı, zaman, sıcaklık ve soğuma hızı difüzyon hızını etkilemektedir. Döküm şartlarında elde edilemeyen mikro-yapı ısı işlemi ile elde edilmesi durumunda hem ısıtma hem de soğutma esnasında oluşan yapı değişimi detaylı incelenmelidir [18].

Küresel grafitli dökme demirlerde katılaşma esnasında gözlenen yapı östenittir. Bu sırada, kalıntı ve yapı içinde çözünmüş maksimum

karbon miktarının fazlası grafit olarak ayrışır. Östenitteki karbon çözünürlüğü sıcaklığın düşmesiyle azalmaktadır. Bu nedenle, östenit fazından ayrılan karbon difüze olup grafit şeklini almaktadır. Ayrıldığı bölgeyi karbonsuzlaştırmaktadır ve böylece ferrit fazı meydana gelmektedir. Yüksek uzama kapasitesine sahip olan ferrit fazının oluşumu perlit fazına nazaran yüksek sıcaklıkta olmaktadır. Ferrit ile perlitin birbiri ile oranı kimyasal kompozisyon ile soğuma hızından etkilenmektedir, ayrıca bu durum malzemenin akma ve çekme dayanımı, sertlik ve uzama gibi bazı özelliklerini doğrudan etkilemektedir [15].



**Şekil 4.** Soğuma hızının dökme demirlere etkisi [19]

Temper ya da östenitleme sıcaklığına çıkarılan küresel grafitli dökme demir ürünlerin soğuması esnasında meydana gelen dönüşüm, soğuma hızından etkilenmektedir. Soğuma hızının artması ile Şekil 4'te görüldüğü gibi malzeme mikroyapısı tamamen değişmektedir [18].

Fırında yavaş soğutma esnasında, soğuma hızı difüzyonun sürekliliğine olanak sağlamaktadır ve bu esnada ferrit fazı meydana gelmektedir. Havada soğutma şartlarında ise, soğuma hızı genel olarak difüzyona az oranda imkan sağlamaktadır ve ısıtma esnasında oluşan yapı daha az miktarda değişmektedir. Östenitleme sıcaklığına çıkarılmış malzemenin havada soğuma şartlarındaki soğuma hızı, genellikle kalıp içerisinde oluşan katılaşma sonrasındaki soğuma hızına göre daha yüksek olmaktadır. Buna ek olarak grafit haricinde ana yapı dönüşmektedir. Bu kapsamda sadece mikroyapısal olarak etki göstermekte ve bununla birlikte malzemenin mekanik özellikleri tamamen değişmektedir. Örneğin, hava ortamında soğumuş parçanın perlit miktarı, döküm şartlarında sağlanmış perlit miktarına göre daha yüksek olup, perlitik

küresel grafitli dökme demir sert ve kırılğan özellik gösterir iken, ferritik küresel grafitli dökme demir sünektir [18].

Bu çalışmada, deney numunesi olarak kullanılan GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demirlerin farklı soğuma hızlarındaki mikroyapı ve sertliğe etkilerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda 940°C sıcaklıkta 38 dk östenitlenen deney numuneleri sırası ile fırında, havada, fanda, yağda ve suda soğutulmuştur. Akabinde, mikro sertlik testleri yapılmış ve buradan elde edilen değerler ile sertlik-mukavemet dönüşüm formülünden yararlanılarak çekme mukavemet değerleri de elde edilmiştir. Deneysel çalışmaların devamında metalografik incelemeler yapılmıştır. Elde edilen veriler karşılaştırılmış ve soğuma hızının etkileri incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Deneysel çalışmalarda, materyal olarak GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir kullanılmış

olup, numuneye ait boyut bilgileri Şekil 5'te verilmiştir.



**Numune Boyutları;**

*Çap (mm)=36*

*Uzunluk (mm)=25*

**Şekil 5.** GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir numunelere ait boyut bilgileri

Deney numunelerine ait kimyasal kompozisyon detayları Tablo 4'de ve mekanik özelliklerine ait detaylar ise Tablo 5'te verilmiştir.

**Tablo 4.** Döküm malzeme spektral analizi

<i>Alaşım Elementi</i>	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Mg</i>	<i>P</i>
% Ağırlıkça	3,725	2,900	0,010	0,050	0,059	0,240	0,074	0,105

**Tablo 5.** Döküm malzeme mekanik özellikleri

<i>Çekme mukavemeti (MPa)</i>	<i>Akma mukavemeti (MPa)</i>	<i>% Uzama</i>	<i>Sertlik (HB)</i>
553	382	13,1	175

Bu çalışmada; ısıtma işlem çalışmaları ve laboratuvar incelemeleri yapılmıştır.

### 2.1. Simülasyon Analizleri

Bu çalışmada, deney malzemesinin farklı soğuma şartları altındaki TTT ve CCT diyagramlarının elde edilebilmesi amacı ile JMatPro yazılımı kullanılmıştır. Bu kapsamda deney numunesinin kimyasal kompozisyonuna ait 1°C/s, 3°C/s ve 5°C/s soğutma hızlarında simülasyon analizi yapılmıştır.

### 2.2. Isıl İşlem Çalışmaları

Isıl işlem çalışmalarında Şekil 5'te boyutu verilen ve 5 farklı soğuma ortamı için 3'er adet olmak üzere 15 adet GGG 40 kalite küresel grafitli dökme demir numuneler kullanılmıştır. Burada, soğutma ortamı olarak fırın, hava, fan, yağ ve su tercih edilmiştir. Deney

numunelerinin östenitleme işlemleri için Protherm marka elektrikli ısıtma fırını kullanılmıştır.

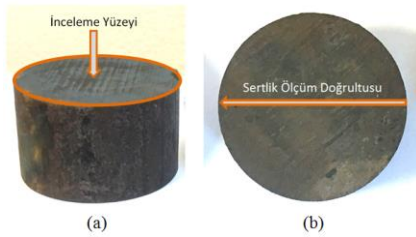
Fırında bekletme süresinin hesabı için "Bekletme Süresi = D/2+20 (Dakika)" formülü kullanılmış olup, "D" mm cinsinden numune çapını belirtmektedir [20]. Bu kapsamda, ısıtma işlem uygulamaları için; Şekil 5'te verilen 36 mm çaptaki deney numuneleri, 15,67°C/dk hız ile 940°C östenitleme sıcaklığına çıkarılmış akabinde tavlama süresi formülü ile hesaplanan 38 dk süresince tavlansmıştır. Tavlama işlemi sonrası deney numuneleri farklı soğuma ortamlarında soğutulmuştur. Soğutma ortamlarına ait detaylar, östenitleme sıcaklığında bekletme süresi ve östenitleme sıcaklıkları Tablo 6'da verilmiştir.

**Tablo 6.** Soğutma Ortamlarına Ait Detaylar

Soğutma Ortamı	Soğutmaya Ait Ekipmanlar	Kullanılan Şartlar ve Numune Sayısı	Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Bekleme Süresi (Dk)
Su	20°C şebeke suyu	3	940°C	38
Yağ	"Total Azolla ZS 68" marka yağ	3	940°C	38
Fan	25°C ortam havasında 1x3400 m <sup>3</sup> /h debili endüstriyel fan	3	940°C	38
Hava	25°C ortam havasında	3	940°C	38
Fırın	Protherm marka ısıtma fırını	3	940°C	38

### 2.3. Laboratuvar Çalışmaları

Isıl işlemden sonra farklı soğuma hızları ile soğutulan deney numunelerinin sertlik değişimlerinin belirlenmesi amacı ile deney numunelerine Qness marka Q10 model cihaz ile vickers-sertlik testi uygulanmıştır. Sertlik ölçümleri Şekil 6'da verilen doğrultuda 0,2 mm'lik aralıklar ile numuneye 1 kg yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Ölçüm öncesinde numuneler metalografik numune hazırlama yöntemi ile hazırlanmıştır.

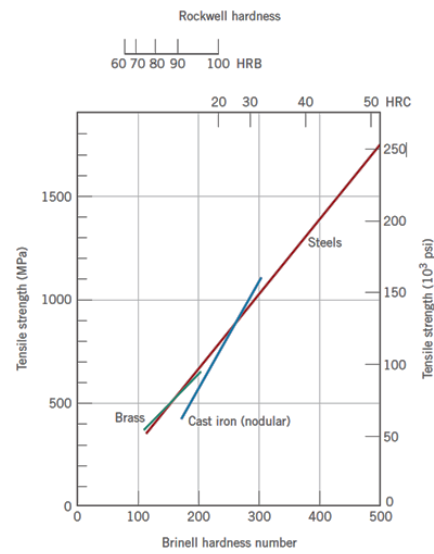


**Şekil 6.** (a) İnceleme yüzeyi ve (b) Sertlik ölçüm doğrultusu

Farklı soğuma hızlarının çekme mukavemetine etkisinin incelenebilmesi amacı ile sertlik-çekme mukavemetine ait verilen ilişkiden yararlanılmıştır. Bu kapsamda, elde edilen vickers sertlik değerleri sertlik dönüşüm tablosu kullanılarak brinell sertlik değerleri elde edilmiştir.

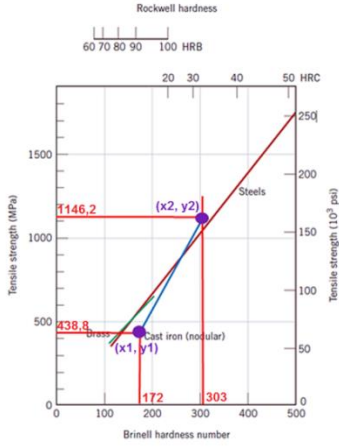
Şekil 7'deki grafikte görüldüğü gibi, brinell sertlik değeri çekme dayanımı ile orantılıdır. Birçok çelik için brinell sertlik-çekme dayanımı dönüşüm formülü aşağıda verilmiştir [21].

$$TS (MPa) = 3,4 \times HB \quad (1)$$



**Şekil 7.** Sertlik ve çekme dayanımı ilişkisi [22]

Denklemlerdeki formül çeliklere ait olduğundan dolayı, bu çalışmada dökme demirlerin sertlik-çekme mukavemeti dönüşümü hesabının yapılabilmesi amacı ile dökme demir için verilen eğriden, eğim elde edilmiştir. Dökme demirlere ait sertlik-mukavemet dönüşüm formülünün elde edilebilmesi amacı ile iki noktası bilinen doğrunun eğimi formülü kullanılmıştır. Formülde hesabın gerçekleştirilebilmesi amacı ile dökme demir için verilen eğrinin herhangi bir noktası ve elde edilen eğim kullanılmıştır. Burada kullanılan (x,y) noktası (200, 590) noktasıdır.



**Şekil 8.** Dökme demirlerin sertlik-çekme mukavemeti dönüşümü hesabı için gerekli noktaların gösterimi

Dökme demirler için eğimin hesaplanması;

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}$$

$$m = \frac{1146,2 - 438,8}{303 - 172} = 5,4$$

Dökme demir için sertlik- mukavemet dönüşüm formülünün bulunması;

$$y - y' = m(x - x')$$

$$y - 590 = 5,4(x - 200)$$

$$y = 5,4x - 490$$

$$TS(MPa) = 5,4 HB - 490 \quad (2)$$

Farklı soğuma hızlarında soğutulan küresel grafitli dökme demirlerin soğuma hızına bağlı olarak faz dağılımında ve mikroyapısındaki değişimlerin belirlenmesi amacı mikroyapısal incelemeler yapılmıştır. Mikroyapısal inceleme öncesinde numuneler sırası ile, sıcak bakalitleme cihazında bakalite alınmış, parlatma cihazında 120, 240, 320, 600, 800 ve 1200 grid'lik zımparalarda zımparalanmış ve sonrasında 3µm'luk alümina pasta ile parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonrasında numuneler %2 nital çözeltisinde dağlanmıştır. Numune hazırlama işlemlerinden sonra mikroyapı görüntüleri optik mikroskop ile Şekil 10'da verilmiş olan bölgelerden 100x büyütme yapılarak alınmıştır.



**Şekil 9.** Mikroyapı incelemeleri için hazırlanan numuneler

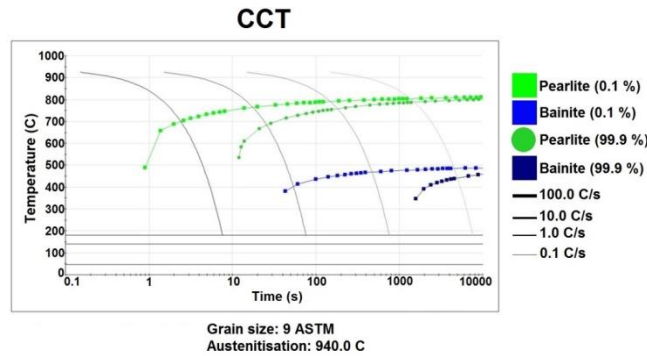


**Şekil 10.** Mikroyapı inceleme bölgeleri

### 3. Bulgular

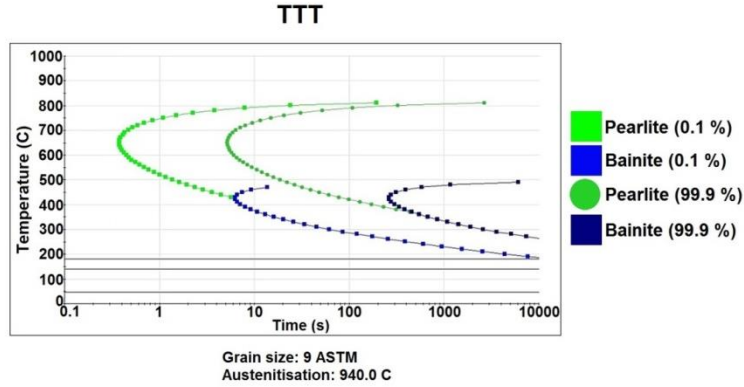
#### 3.1. Simülasyon Analizi Sonuçları

Farklı soğuma hızlarına ait yapılan simülasyon analizi sonucunda elde edilen TTT ile CCT diyagramları Şekil 11 ve 12'de verilmiştir.



**Şekil 11.** JMatPro yazılımı ile elde edilen CCT diyagramı





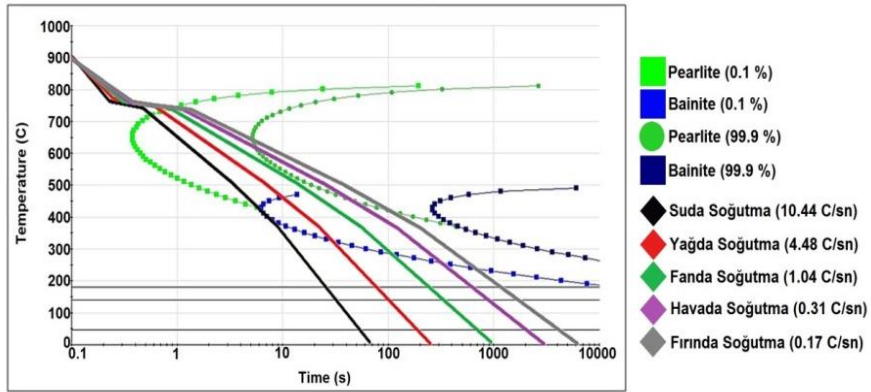
Şekil 12. JMatPro yazılımı ile elde edilen TTT diyagramı

### 3.1. Simülasyon Analizi Sonuçları

940°C sıcaklıkta östenitlenen parçaların farklı soğuma ortamlarına ait soğuma hızlarının belirlenmesi aşamasında pirometre ile sıcaklık ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Süreye bağlı olarak ölçülen sıcaklıklara göre hesaplanan soğuma hızları Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Soğuma hızları

Soğutma Ortamı	Su	Yağ	Fan	Hava	Fırın
Soğuma Hızı (°C/sn)	10,44	4,48	1,04	0,31	0,16



Şekil 13. Deney ile elde edilen soğuma eğrilerinin TTT üzerine çizimi

### 3.2. Laboratuvar Çalışma Sonuçları

940°C'de 38 dakika süre ile östenitlenen numuneler farklı soğuma hızlarında soğutulması akabinde yapılan vickers sertlik deneyleri sonucunda suda soğutulan numunelerin sertlik değerlerinin en yüksek olduğu belirlenmiş olup, soğuma hızının azalması ile sertlik değerlerinde düşüş

yaşandığı ve soğuma hızının artması ile sertlik değerlerinde artış yaşandığı belirlenmiştir.

Elde edilen vickers sertlik değerleri, sertlik dönüşüm tablosundan yararlanılarak brinell sertlik değerlerine dönüştürülmüştür. Farklı soğuma hızlarına ait elde edilen ortalama vickers ve brinell sertlik değerleri Tablo 8'de verilmiştir.



**Tablo 8.** Farklı soğuma hızlarında elde edilen ortalama sertlik değerleri

Soğutma Ortamı	Soğutma Hızı (°C/sn)	Vickers Sertlik Değerleri			Brinell Sertlik Değerleri		
		Max.	Min.	Ort.	Max.	Min.	Ort.
Suda soğutma	10,44	678,33	396,33	518,49	644,80	376,74	492,51
Yağda soğutma	4,48	556,33	283,33	403,12	528,83	268,38	383,09
Fanda soğutma	1,04	355,33	235,67	290,99	337,77	224,02	276,61
Havada soğutma	0,31	305,00	173,00	219,25	289,92	164,45	208,41
Fırında soğutma	0,17	186,33	159,33	171,60	177,12	151,46	163,12

Tablo 8’de verilen değerler incelendiğinde, soğuma hızının artması ile sertlik değerlerinin arttığı ve bu durumun soğumaya bağlı olarak malzeme iç yapısında bey nitik fazın oluştuğu öngörülmektedir. Ayrıca buna etken diğer bir durum ise, soğuma hızına bağlı olarak küçülen tane boyutlarıdır. Tane boyutlarındaki küçülme sebebi ile tane sınırları artmakta ve artan tane sınırları dislokasyon hareketlerini zorlamaktadır. Bu sebeple tane sınırlarında dislokasyon yığılmaları görülebilir. Buna ek olarak sertliğin artması ile birlikte mukavemette de artış gözlemlenir.

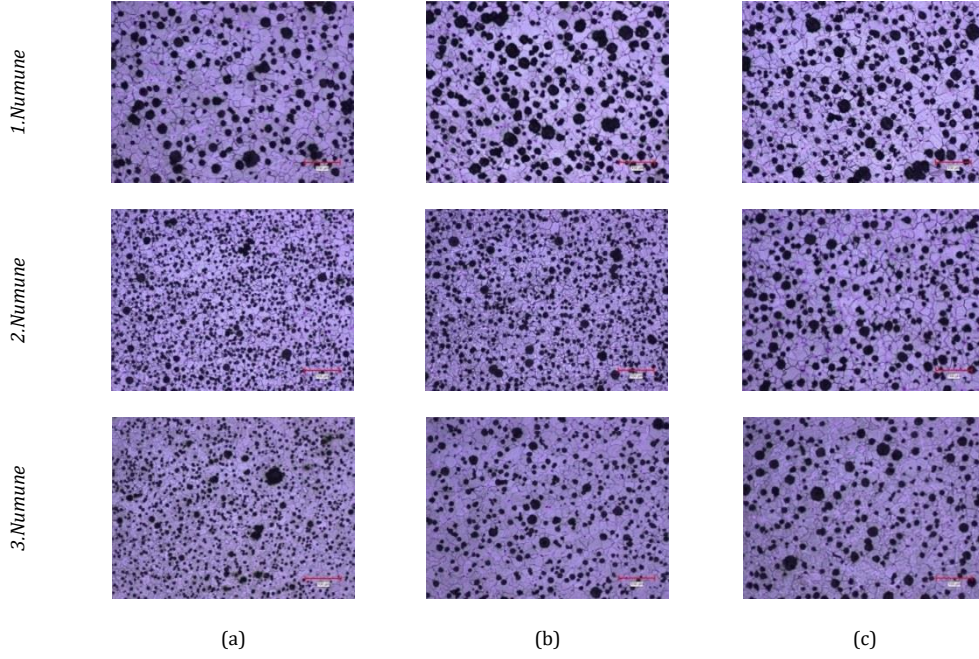
Yapılan vickers sertlik deneyinden elde edilen vickers sertlik değerlerinin brinell sertlik dönüşümünden sonra çekme mukavemetinin elde edilebilmesi amacı ile öncelikle Denklem 1’e göre hesaplama yapılmıştır. Ancak Denklem 1 genel olarak çeliklerde kullanıldığından dolayı, dökme demirler için elde edilen ve Denklem 2’de verilen sertlik-çekme mukavemeti formülü kullanılmış ve çekme mukavemeti değerleri elde edilmiştir. Elde edilen değerler Tablo 9’de verilmiştir.

**Tablo 9.** Sertlik değerleri kullanılarak formüle dayalı hesaplanan çekme mukavemeti değerleri

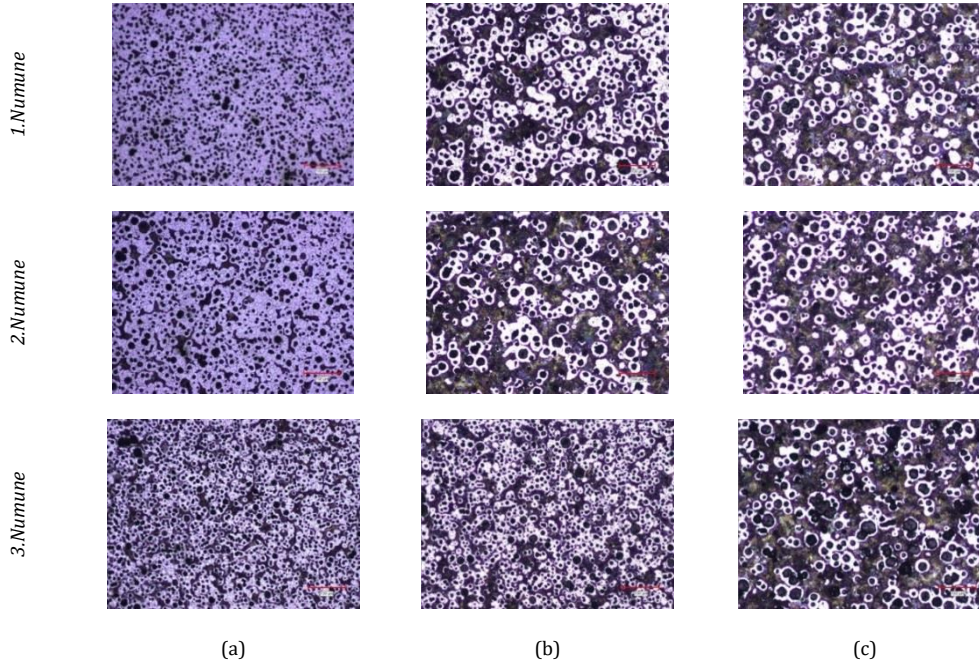
Soğutma Ortamı	Soğutma Hızı (°C/sn)	Çekme Muk. [TS(Mpa)=3,45 x HB]			Çekme Muk. [TS(Mpa)=(5,4 x HB) - 490]		
		Max.	Min.	Ort.	Max.	Min.	Ort.
Suda soğutma	10,44	2224,57	1299,76	1699,17	2991,94	1544,41	2169,56
Yağda soğutma	4,48	1824,47	925,90	1321,66	2365,69	959,24	1578,69
Fanda soğutma	1,04	1165,29	772,86	954,30	1333,94	719,70	1003,69
Havada soğutma	0,31	1000,24	567,35	719,01	1075,59	398,02	635,41
Fırında soğutma	0,17	611,07	522,53	562,75	466,46	327,87	390,83

Uygulanan ısı işlemin sonrasında farklı soğutma hızlarında soğutulan numunelerde oluşan mikroyapı değişimlerinin incelenebilmesi amacıyla yapılan mikroyapı inceleme sonuçları Şekil 14 ile Şekil 18 aralığında verilmiştir. Mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, resimlerde açık renk ile belirtilen bölgeler ferrit fazını, koyu renk ile belirtilen bölgeler perlit fazını ve küre

formundaki yapılar ise grafit ifade eder. Artan soğuma hızı ile ferrit fazı azalırken perlit fazı artış eğilimindedir. Aynı zamanda soğuma hızına göre tane morfolojisinin değiştiği ve yapının iğnemi bir hale geçtiği tespit edilmiştir. Bu durum özetlenecek olursa, soğuma hızının artması ile yapı ferrit fazından ferrit+beynite doğru değişim göstermektedir.

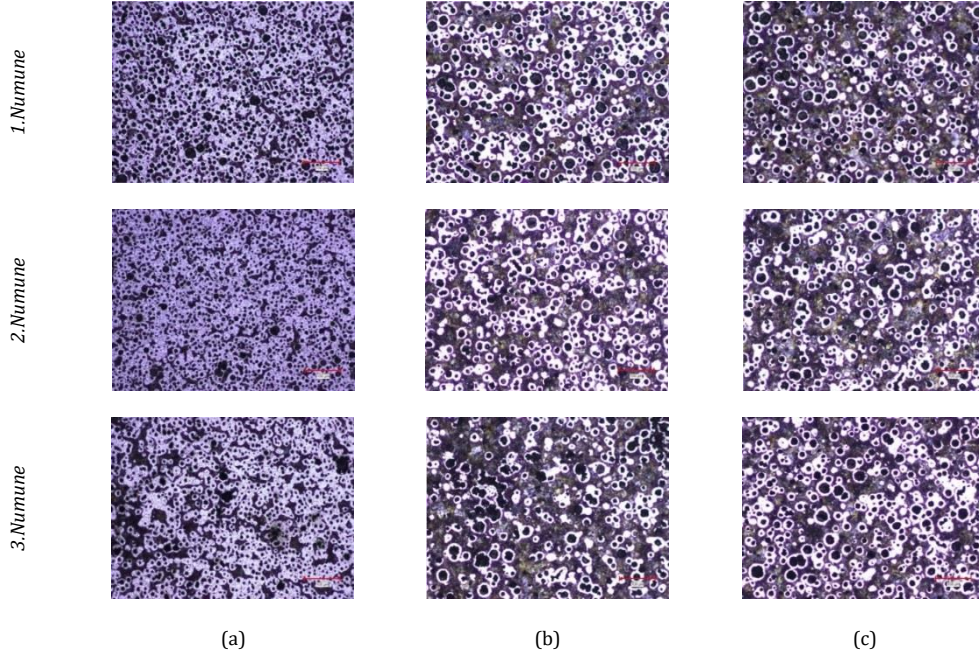


**Şekil 14.** Fırında soğutulan numunelerin dağlanmış yüzeyinden alınan 100x büyütmedeki görüntüleri; (a) 1.bölge, (b) 2.bölge ve (c) 3.bölge

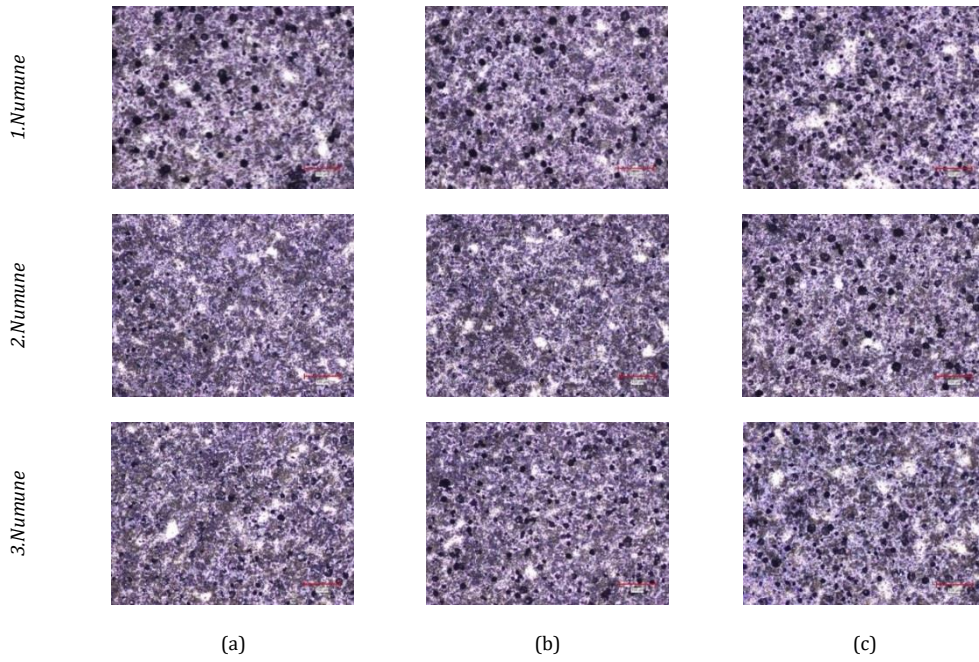


**Şekil 15.** Havada soğutulan numunelerin dağlanmış yüzeyinden alınan 100x büyütmedeki görüntüleri; (a) 1.bölge, (b) 2.bölge ve (c) 3.bölge

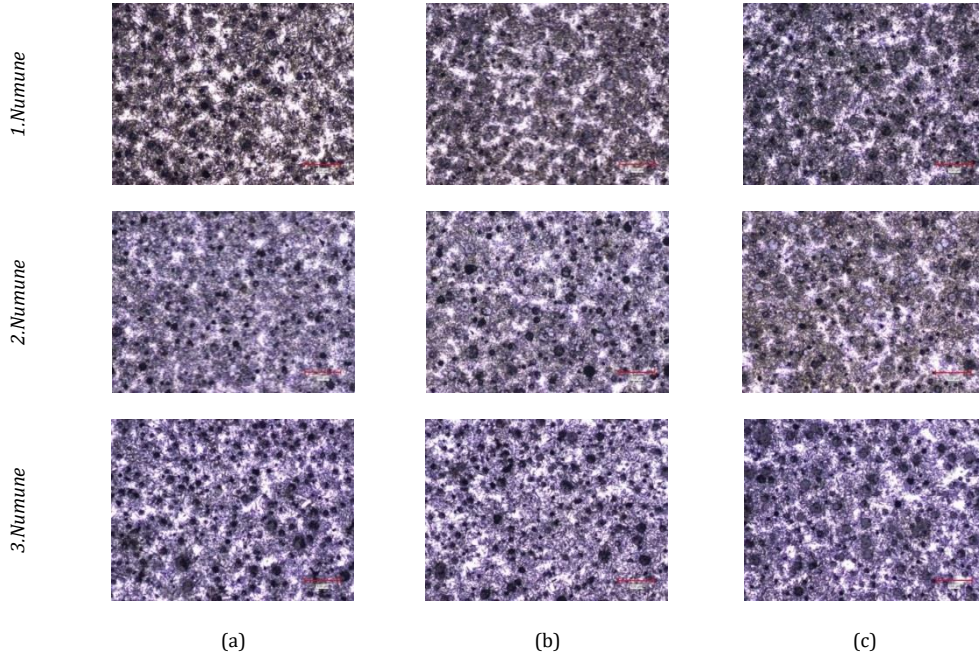




**Şekil 16.** Fanda soğutulan numunelerin yağlanmış yüzeyinden alınan 100x büyütmedeki görüntüleri; (a) 1.bölge, (b) 2.bölge ve (c) 3.bölge



**Şekil 17.** Yağda soğutulan numunelerin yağlanmış yüzeyinden alınan 100x büyütmedeki görüntüleri; (a) 1.bölge, (b) 2.bölge ve (c) 3.bölge



**Şekil 18.** Suda soğutulan numunelerin dağlanmış yüzeyinden alınan 100x büyütmedeki görüntüleri; (a) 1.bölge, (b) 2.bölge ve (c) 3.bölge

Faz dağılımının tespit edilmesi amacı ile mikroyapı incelemeleri sonucunda elde edilen görüntüler kullanılmış olup, faz dağılımları Material Plus yazılımı ile ölçülmüştür. Ancak program perlit fazı ile grafiti aynı faz olarak belirlediğinden dolayı, numunelerin parlatılmış yüzeyinden alınan görüntüler ile grafit yüzdeleri belirlenmiştir. Elde edilen bu değer, dağlanmış yüzeyden tespit edilen grafit+perlit yüzdesinden çıkarılarak gerçek perlit yüzdesi hesaplanmıştır. Yapılan ölçümler sonucunda elde edilen değerler yüzde olarak Tablo 10 ile Tablo 14 arasında verilmiştir.

**Tablo 10.** Suda soğutma ortamında 10,44 °C/sn hız ile soğutulan numunelere ait faz dağılımları

Faz	1.Nokta	2.Nokta	3.Nokta	Ortalama
Ferrit	34,00	33,55	32,78	33,44
Perlit+Grafit	66,00	66,45	67,22	66,56
Grafit	14,03	16,56	17,81	16,14
Perlit	51,97	49,89	49,41	50,42

**Tablo 11.** Yağda soğutma ortamında 4,48°C/sn hız ile soğutulan numunelere ait faz dağılımları

Faz	1.Nokta	2.Nokta	3.Nokta	Ortalama
Ferrit	35,94	35,40	34,98	35,44
Perlit+Grafit	64,06	64,60	65,02	64,56
Grafit	18,40	19,23	19,77	19,13
Perlit	45,66	45,37	45,25	45,43

**Tablo 12.** Fanda soğutma ortamında 1,048°C/sn hız ile soğutulan numunelere ait faz dağılımları

Faz	1.Nokta	2.Nokta	3.Nokta	Ortalama
Ferrit	51,43	39,59	41,25	44,09
Perlit+Grafit	48,57	60,41	58,76	55,91
Grafit	18,87	15,02	21,98	18,63
Perlit	29,70	45,39	36,77	37,29

**Tablo 13.** Havada soğutma ortamında 0,31°C/sn hız ile soğutulan numunelere ait faz dağılımları

Faz	1.Nokta	2.Nokta	3.Nokta	Ortalama
Ferrit	65,27	48,90	43,53	52,57
Perlit+Grafit	34,73	51,10	56,47	47,43
Grafit	19,14	16,60	18,64	18,13
Perlit	15,58	34,50	37,83	29,30

**Tablo 14.** Fırında soğutma ortamında 0,17°C/sn hız ile soğutulan numunelere ait faz dağılımları

Faz	1.Nokta	2.Nokta	3.Nokta	Ortalama
Ferrit	78,01	76,83	76,14	77,00
Perlit+Grafit	21,98	23,17	23,86	23,00
Grafit	16,51	19,53	20,70	18,91
Perlit	5,47	3,64	4,40	4,50

Malzeme tane boyutunun sayısal olarak tespit edilmesine ASTM E112 standardından yararlanılmıştır. Tespit edilen ASTM tane boyut numarası, tane büyüklüğü ile ilgili bilgi verir. Bundan dolayı, bu çalışmada mikroyapı incelemeleri neticesinde elde edilen görüntüler kullanılarak Material Plus yazılımı vasıtası ile ASTM tane boyutu numaraları hesaplanmıştır.

Elde edilen ASTM tane boyutu numaraları kullanılan 100x büyütmede 1 inch<sup>2</sup>'deki toplam tane sayısı tespiti için aşağıdaki formül kullanılarak toplam tane sayısı belirlenmiştir.

$$N = 2^{n-1} \quad (3)$$

Denklem 3'te; "n" ASTM tane boyutu numarasını, "N" 100x büyütmede 1 inch<sup>2</sup> 'deki toplam tane sayısını ifade etmektedir.

Gerçekleştirilen ölçümler ve hesaplamalar neticesinde elde edilen verilere ait ortalama değerler Tablo 15'deki gibidir.

**Tablo 15.** ASTM tane boyut numaraları ve 100x büyütmede 1 inch<sup>2</sup>'deki toplam tane sayıları

Soğutma Grubu	Soğutma Hızı (°C/sn)	ASTM Tane Boyutu Numaraları				100x Büyütmede 1 Inch <sup>2</sup> 'deki Toplam Tane Sayısı			
		1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	Ortalama	1. Nokta	2. Nokta	3. Nokta	Ortalama
Suda Soğutma	10,44	9	9	9	9	256	256	256	256
Yağda Soğutma	4,48	8	8	8	8	128	128	128	128
Fanda Soğutma	1,04	7	7	7	7	64	64	64	64
Havada Soğutma	0,31	6	6	6	6	32	32	32	32
Fırında Soğutma	0,17	4	4	4	4	8	8	8	8

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Çalışma kapsamında küresel grafitli dökme demir örneklerine farklı soğuma hızlarında gerçekleştirilen ısı işleminin akabinde yapılan incelemelerin sonuçları aşağıda belirtilmiştir:

- Farklı soğuma hızlarına ait soğuma eğrilerinin elde edilmesi amacı ile 940°C sıcaklıkta östenitlenmiş numunelerin soğutulması esnasında zamana bağlı olarak pirometre ile

sıcaklık ölçümü gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, fırında, havada, fanda, yağda ve suda soğutma olmak üzere sırası ile soğuma hızları 0,17°C/sn, 0,31°C/sn, 1,04°C/sn, 4,48°C/sn ve 10,44°C/sn olarak elde edilmiştir. JMatPro yazılımı vasıtasıyla ürüne ait oluşturulan TTT diyagramları üzerine, elde edilen soğuma eğrileri çizdirilmiştir. Yapılan metalografik incelemeler neticesinde elde edilen mikroyapıların, TTT diyagramı üzerine

çizdirilen soğuma eğrileri ile uygunluk gösterdiği belirlenmiştir.

- Farklı soğuma hızlarında ölçülen en yüksek sertlik değeri suda soğutulan numunelerde elde edilmiş olup, en düşük sertlik ise fırında soğutulan numunelerde ölçülmüştür. Bu kapsamda artan soğuma hızı ile birlikte sertliğin arttığı tespit edilmiştir. Bu durumun aynı zamanda artan soğuma hızının etkisiyle malzeme iç yapısında beynit fazının oluşum göstermesine bağlı olduğu öngörülmüştür. Aynı zamanda soğuma hızının artması tane boyutunun da küçülmesine neden olmaktadır, böylece artan tane sınırları ile birlikte dislokasyon hareketlerinde zorlanmalar oluşarak tane sınırlarında dislokasyon yığılmalarına neden olur. Bu nedenle sertliğin artmasının yanında mukavemette de artış yaşanmaktadır.

- Metalografik incelemeler sonucunda, soğuma hızının artması ile birlikte iç yapının iğnemsî bir hale dönüştüğü tespit edilmiştir. Fırında soğutulan numunelerin iç yapısı ferrit iken suda soğutulan numunelerin ise beynittir. Bunun yanı sıra, soğuma hızına bağlı olarak tane boyutlarında küçülmeler meydana geldiği tespit edilmiştir.

- Yeşiltepe ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada, küresel grafitli dökme demir örnekleri 1, 2, ve 4 saat olmak üzere farklı tavlama sürelerinde 900 ile 1000°C'de tavlama işlemine tabi tutulmuştur. Akabinde tüm numune örnekleri su ve havada soğutulmuştur. Tüm numunelerin metalografik incelemeleri gerçekleştirilmiş ve sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sonuç olarak mikroyapının, yavaş soğuma şartlarında ferritik, hızlı soğuma şartlarında ise perlitik ve martenzitik olduğu tespit edilmiştir. Buna ek olarak artan soğuma hızı ile sertliğinde arttığı belirlenmiştir [24].

- Yun-Cheng ve arkadaşları tarafından 2012 yılında yapılan çalışmada, soğutma hızının karbidik östemperli sünek demirin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, soğutma hızının artmasıyla birlikte, asiküler ferrit boyutunun kademeli olarak ince asiküler ferrit haline geldiğini, ostenit içeriğinin korunduğunu, darbe tokluğunun azaldığını ve numunelerin sertliğinin arttığını göstermektedir [25].

- M.Tartaglia ve arkadaşları tarafından 2015 yılında yapılan çalışmada, sfero dökümde grafit ve metal matris, alaşım içeriği ve gerilme özellikleri arasındaki ilişkileri karakterize ederek daha yüksek bir mukavemet ve süneklik kombinasyonu elde etmenin yollarının belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada, ayrıca tane boyutunu iyileştirmek ve bileşim-yapı-özellik ilişkilerini optimize etmek için katılaşma sonrası ısı işlemleri araştırılmıştır. Isıl işlem denemeleri, kritik olarak östenitize edilerek ve numunelerin durgun havada soğutma, basınçlı hava ile soğutma ve yağda soğutma gibi çeşitli soğutma hızlarına tabi tutulmasıyla gerçekleştirilmiş, ardından tavlama yapılmıştır. En iyi sonuçlar %50 ferrit ve %50 perlitten oluşan bir başlangıç mikro yapısı ile elde edilmiştir. Isıl işlemden sonra, ölçülen mekanik özellikler > 55 ksi akma dayanımı (YS), > 80 ksi maksimum çekme mukavemeti (UTS) ve > % 12 uzama'dır. Kritik östenitlemeden sonra havayla soğutma veya su verme ve tavlama ısı işlem sonrasında elde edilen mekanik özellikler ise, 65 ila 85 ksi akma mukavemeti, 110 ila 130 ksi maksimum çekme mukavemeti ve % 8 ila 9 uzama olarak elde edilmiştir [26].

- Kabnure ve arkadaşları tarafından 2017 yılında yapılan çalışmada ise, otomobil çark dökümü üzerinde araştırmalar gerçekleştirilmiştir. Küçük kısımların merkezi göbeğe bağlanmayacak bölümlerde kesit kalınlığında değişkenlik olduğundan otomobil çarkı tercih edilmiştir. Döküm uygulamalarının simülasyon analizleri yapılmıştır. Döküm işlemi sonucunda elde edilen numuneler değişken kesit kalınlıkları için mikroyapı ve sertlik bazında incelenmiştir. Belirlenen farklı kesit kalınlığındaki altı kritik bölgede soğutma oranı için yapılan ölçümler sonucunda; kesit kalınlığındaki azalış ile soğutma hızındaki artışla % perlitin arttığı ve sertliğin arttığı belirlenmiştir [27].

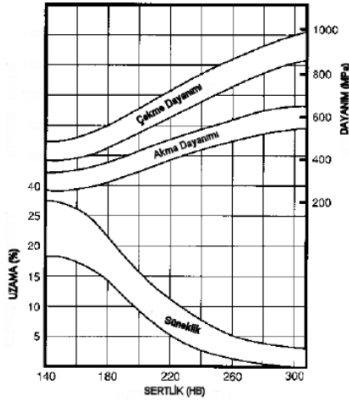
- Bu çalışmalara istinaden, bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçların tutarlılığı tespit edilmiştir.

- Ayrıca soğuma hızının mukavemete olan etkisinin incelenmesi amacı ile sertlik-çekme mukavemeti ilişkisinden yararlanılmıştır. Sertlik-çekme mukavemeti ilişkisini veren grafikten yararlanılarak dökme demirler için bir eğim bulunmuştur. İki noktası belli olan doğrunun eğimi formülü kullanılarak dökme

demirler için sertlik-mukavemet dönüşüm formülü elde edilmiştir. Bunun akabinde yapılan sertlik dönüşümü sonucunda elde edilen brinell sertlik değerleri kullanılarak sertlik-mukavemet dönüşümü yapılmış ve farklı soğuma hızlarındaki mukavemet değerleri belirlenmiştir. Yapılan hesaplamalar neticesinde, artan soğuma hızına bağlı olarak mukavemetinde arttığı sonucuna varılmıştır.

- Güzel tarafından 2012 yılında yapılan yüksek lisans tezinde, Şekil 19'da verilen küresel grafitli dökme demirlerin sertlik ve dayanımı arasındaki ilişkiyi gösteren grafikte, artan sertlik sonucunda çekme mukavemetinde arttığı görülmektedir [23].

Bu kapsamda, bu çalışmada formüle dayalı olarak hesaplanan çekme dayanımı değerlerinin, artan sertlik ile artacağı tespit edilmiş olup, Güzel'in tezinde yer alan grafik ile kıyaslandığında, bu çalışma sonucunda elde edilen sonuçların doğru olabileceği öngörülebilir.



**Şekil 19.** Küresel grafitli dökme demirlerde sertlik ve dayanım arasındaki ilişki [23]

- Ayrıca JMatPro yazılımı ile yapılacak olan farklı bir ısı işlem şartının doğruluk payının yüksek olacağı ve bu doğrultuda geliştirilebilecek kimyasal kompozisyonlara göre farklı ısı işlem parametrelerinin optimize edilebileceği açıktır.

### Teşekkür

Projedeki deney çalışmalarının gerçekleştirilebilmesi için laboratuvar olanaklarını kullanımımıza açan Kocaeli Çelik Sanayi ve Ticaret A.Ş.'ye teşekkürü bir borç biliriz. Bu vesile ile tüm Kocaeli Ar-Ge Merkezi personeline projemize verdikleri destek için de ayrıca teşekkür ederiz.

### Kaynakça

- [1] Stefanescu, D.M., 1990. Classification and Basic Metallurgy of Cast Iron, ASM Handbook, Cilt. 1. DOI: 10.1361/asmhba0001001
- [2] Aran, A., 1991. Lamel ve Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Isıl İşlemleri. <https://web.itu.edu.tr/~arana/dd.pdf> (Erişim Tarihi: 10.06.2020)
- [3] Karsay, I.S. 1990. Ductile iron-production practices. American Foundrymen's Society Inc., USA, 188s.
- [4] Sen, U. 1997. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Bor Kaplanması ve Kaplama Özellikleri. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 177s, İstanbul
- [5] ASM Metals Handbook, 1990. Properties and selection: irons, steels and high performance alloys, Vol.1. Tenth Edition, ASM International.
- [6] Budinski, K.G, Budinski, M.K. 2010. Engineering Materials: Properties and Selection. Prentice Hall, Upper Saddle River, N.J.490
- [7] Çelik, Ö. 2001. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin Aşınma Davranışları. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 115s, İstanbul.
- [8] Akman, C. 2006. GG 22 Lamel Grafitli Dökme Demirden Üretilen Motor Silindir Gömleklerinin CNC Torna Tezgahında İşlenebilirliğinin İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 119s, Balıkesir.
- [9] Söğüt, A. 1998. Küresel Grafitli Dökme Demirde Küreleşme Oranının Mekanik Etkisinin İncelenmesi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 111s, Ankara.
- [10] Larker, R. 2009. Solution Strengthened Ferritic Ductile Iron ISO 1083/JS/500-10 Provides Superior Consistent Properties In Hydraulic Rotators, China Foundry, Cilt. 6, s. 343-351.
- [11] Toptaş, M. 2009. Farklı Isıl İşlemlerin Küresel Grafitli Dökme Demirin Yorulma Davranışına Etkisi, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85s, Afyonkarahisar.
- [12] Döngel, A. 2008. Bortemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirin Yüksek Sıcaklık Aşınma Davranışının İncelenmesi. Afyon Kocatepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 96s, Afyonkarahisar.
- [13] Çelik, O. N. 1996. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Cu, Ni ve Mo Alaşım Elementlerinin Östempereleme Sonucu Beynit Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi ve Sinirsel Ağ Modeli İle Değerlendirilmesi. Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 129s, Eskişehir.
- [14] Ayday, A. 2013. Elektrolitik Plazma Teknolojisi İle Küresel Grafitli Dökme Demir Malzemesinin Yüzey Özelliklerinin Geliştirilmesi. Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi, 218s, Sakarya.
- [15] Çavuşoğlu, E. 1992. Döküm Teknolojisi I. Döküm Yöntemleri-Dökme Demirler. Ofset Atölyesi, İstanbul, 289-299s.
- [16] Yılmaz, F. 2003. İçme-Atık Su Ve Gaz Dağıtım Şebekelerinde Dökme Demirler ve Düktil Demir Uygulamaları. İstanbul Büyükşehir Belediyesi Su ve Kanalizasyon İdaresi Yayınları, İstanbul, 240s.
- [17] Elliot, R.1988. Cast iron Technology. Butterworths & Co Ltd., London, 247 s.



- [18] Koç, Ş. 2008. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde GGG50 Mekanik Özelliklerinin Isıl İşlem ile Sağlanması, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası Metalurji Dergisi, Cilt. 151, s. 20-27.
- [19] Karaman S. 2011. Küresel Grafitli Dökme Demirlerin (GGG40, GGG50, GGG60, GGG70) Üretim Sürecinin Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s, Edirne.
- [20] Topbaş, M. A. 1993. Isıl işlemler. Prestij Basın, İstanbul, 199s.
- [21] Callister, D. W. 2007. Materials Science and Engineering; an introduction. John Wiley & Sons, Inc. USA, 975s.
- [22] Hasırcı, H. 2000. Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Alaşım Elementlerinin (Cu Ve Ni) Ve Östemperleme Süresinin Mikroyapı Ve Mekanik Özellikler Üzerine Etkisi. Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 92s, Ankara.
- [23] Güzel, E. 2012. Rüzgar Türbini Dökümlerinde Hassas Metalürjik Değişkenlerin Optimizasyonu. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 164s, İstanbul.
- [24] Yeşiltepe S., Şeşen M.K. 2017. Heat treatment effect on spheroidal graphite, microstructure and mechanical properties of Ni-resist ductile cast iron. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, Cilt 5, s. 479 - 482.
- [25] Yun-Cheng, P., Hui-Jin, J., Jin-Hai, L., Guo-Lu, L. 2012. Influence of cooling rate on the microstructure and properties of a new wear resistant carbidic austempered ductile iron (CADI), Materials Characterization, Cilt 72, s. 53-58.
- [26] M.Tartaglia, J., B.Gundlach, R., M.Goodrich., G. 2015. Optimizing Structure-Property Relationships in Ductile Iron, International Journal of Metalcasting. Cilt 8, s. 7-38.
- [27] Kabnure, B.B., Shinde V.D., Kolhapure R.R. 2017. Property Optimization of Impeller Casting Using GRA. International Conference on Advances in Thermal Systems, Materials and Design Engineering (ATSMDE 2017), 21-22 Aralık, Hindistan, 1-7.