



**T.C.**  
**NECMETTİN ERBAKAN NİVERSİTESİ**  
**FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**



**TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN  
ÇELİK MALZEMEDE MİKROYAPI VE DARBE  
TOKLUĞUNUN İNCELENMESİ**

**Hacer TAŞDÖĞEN**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

**Temmuz-2019**  
**KONYA**  
**Her Hakkı Saklıdır**

## TEZ KABUL VE ONAYI

Hacer Taşdöğen tarafından hazırlanan “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Hazırlanan Çelik Malzemede Mikroyapı Ve Darbe Tokluğunun İncelenmesi” adlı tez çalışması 01/07/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı’nda YÜKSEK LİSANS Tezi olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Doç. Dr. Murat MAYDA

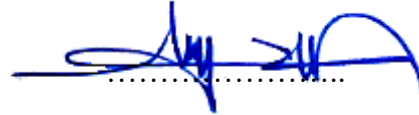
#### Danışman

Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE

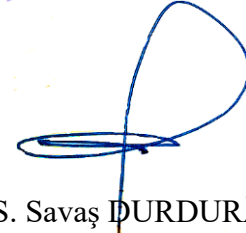
#### Üye

Dr. Öğr. Üyesi Şaban BÜLBÜL

### İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.



Prof. Dr. S. Savaş DÜRDURAN  
FBE Müdürü

Bu tez çalışması BAP tarafından 181351004 nolu proje ile desteklenmiştir.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

İmza



Hacer TAŞDÖĞEN

Tarih:01.07.2019

# ÖZET

## YÜKSEK LİSANS TEZİ

### TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE HAZIRLANAN ÇELİK MALZEMEDE MİKROYAPI VE DARBE TOKLUĞUNUN İNCELENMESİ

Hacer TAŞDÖĞEN

Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Makine mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE

2019,106

Jüri

Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE

Doç. Dr. Murat MAYDA

Dr. Öğr. Üyesi. Şaban BÜLBÜL

Yüksek karbon içeren ve toz metalurjisi yöntemi kullanılarak üretilen çeliklere farklı küreselleştirme ısıl işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan ısıl işlemler sonucunda küresel sementit yapısının oluşumu incelenmiştir. Bu ısıl işlemler sonrası yüksek karbonlu toz metal çeliklerin darbe tokluğu, sertlik değişimi ve mikroyapıları incelenmiştir. Deneysel çalışmalar için, gaz atomizasyon yöntemiyle üretilmiş, Höganäs firmasından temin edilen ABC.100.30 marka %99.9 saflıkta Fe tozlarına ağırlıkça Alfa Aesar firmasından temin edilen %1,2 grafit tozu eklenmiştir. Ağırlıkları ölçülen tozların homojen olarak karışması için, gezegen tipi karıştırıcıda bilyesiz olarak 50 rpm hızda 30 dk boyunca karıştırma işlemi uygulanmıştır. Karıştırma işlemi tamamlanan tozlar, mikroyapı incelemeleri ve darbe deneyleri için presleme kalıplarında 850 MPa basınç altında preslenmiştir. Presleme işlemi oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Presleme işlemi takiben toz metal çelik numuneler, 1180°C'de 20 dk boyunca sinterlenmiştir. Sinterleme işlemi tamamlanan numunelere sırasıyla 3 farklı ısıl işlem metodu uygulanmıştır. İlk olarak Demir -Karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında olan 700 °C sıcaklıkta, 5-10-20-40 saat klasik küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. İkinci olarak; Demir-Karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında ve üstünde (700 °C ve 740°C) 5-10-20-40 saat salınımlı küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Son olarak endüstriyel uygulamaların dışında, asıl çalışma amacı olarak, numunelere su verme işlemi takiben küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu ısıl işlemde numuneler 900 °C sıcaklıkta 5 dk bekletilmiştir. Tamamen östenit yapı sağlandıktan sonra, suda su verme işlemi uygulanarak martenzit yapısı elde edilmiştir. Bu işlem sonrasında demir-karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında 700 °C sıcaklıkta 5-10-20 saat olarak küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Üçüncü yöntem kullanılarak üretilen numunelerde oluşan küreselleşme davranışının ilk iki yöntem kullanılarak uygulanan ısıl işleme kıyasla daha kısa sürelerde oluştuğu gözlemlenmiştir. Küreselleştirme ısıl işlemleri sonunda artan küreselleştirme ısıl işlem zamanına bağlı olarak küreselleşme eğiliminin arttığı belirlenmiştir. Küreselleşme eğiliminin artmasıyla birlikte darbe tokluklarında bir artış gözlemlenmiştir. Ancak sertlik değerlerinin artan küreselleşme zamanına bağlı olarak azaldığı tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** toz metalurjisi, küreselleştirme ısıl işlemi, mikroyapı, darbe tokluğu, sertlik

## ABSTRACT

### MS THESIS

## INVESTIGATION OF MICROSTRUCTURE AND IMPACT TOUGHNESS IN STEEL MATERIAL PREPARED BY POWDER METALLURGY METHOD

Hacer TAŞDÖĞEN

THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
NECMETTİN ERBAKAN UNIVERSITY  
THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE / DOCTOR OF PHILOSOPHY  
IN MECHANICAL ENGINEERING

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE

2019,106

Jury

Assoc. Prof. Dr. Hakan GÖKMEŞE  
Assoc. Prof. Dr. Murat MAYDA  
Assist. Prof. Dr. Şaban BÜLBÜL

Different spheroidizing heat treatments were applied to the steels containing high carbon and produced by powder metallurgy method. As a result of applied heat treatments, the formation of spherical cementite structure was investigated. After these heat treatments, impact toughness, hardness change and microstructures of high carbon powder metal steels were investigated. For experimental studies, 1,2% graphite powder obtained from Alfa Aesar was added to 99.9% purity Fe powders of ABC.100.30 obtained by Höganäs and produced by gas atomization method. For the homogeneous mixing after weight measurements of powders, powders were mixed in a planetary type mixer at 50 rpm for 30 minutes. Mixed powders were pressed under pressure of 850 MPa in pressing molds for microstructure investigations and impact tests. Pressing was carried out at room temperature. Following the pressing process, powder metal steel samples were sintered at 1180 °C for 20 minutes.

Three different heat treatment methods were applied to samples after sintering process respectively. Firstly, in the Iron-Carbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) equilibrium diagram, the classical spheroidizing heat treatment was applied to samples for 5-10-20-40 hours at 700 °C which is below the Ac<sub>1</sub> temperature line (723°C). Secondly; cyclically spheroidizing heat treatment as below and above Ac<sub>1</sub> temperature line (723°C) (700 °C and 740°C) 5-10-20-40 hours in Iron-Carbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) equilibrium diagram was applied to samples. Finally, spheroidizing heat treatment was applied to the samples after quenching process in addition to industrial applications as the main purpose of the study. In this heat treatment, samples were kept at 900 °C for 5 minutes. After providing austenite structure, martensite structure was obtained by applying quenching process in water. After this process, spheroidizing heat treatment was applied to samples at 700 °C for 5-10-20 hours below Ac<sub>1</sub> temperature line (723°C) on the iron-carbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) equilibrium diagram.

It was observed that the spheroidizing behavior of the samples produced by the third method occurred in shorter periods compared to the heat treatment applied using the first two methods. At the end of the spheroidizing heat treatment, spheroidizing tendency was increased due to the increasing spheroidizing heat treatment time. An increase in impact toughness was observed with increasing of spheroidizing tendency. However, decreasing hardness values were confirmed depending on increasing spheroidizing time

**Keywords:** powder metallurgy, spheroidization heat treatment, microstructure, impact toughness, hardness

## ÖNSÖZ

Proje sürecince etkin bir biçimde destek sağlayan ve bu konuda büyük faydaları olan danışman hocam Doç. Dr. Hakan GÖKMEŞE 'ye ve çalışmalarım boyunca yardımlarını esirgemeyen bilgi ve birikimlerini paylaşmaktan çekinmeyen Dr. Öğr. Üyesi Hakan Burak KARADAĞ'a en içten dileklerle teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım ile ilgili son derece özverili çalışarak bana yardımcı olan Mak.Müh. Ömer Faruk ÖZCAN'a ve çalışmalarım boyunca her zaman yanımda olan kıymetli arkadaşım Mak. Müh. Ayşe Büşra Yıldız'a teşekkür ederim.

Son olarak eğitim hayatım boyunca maddi ve manevi olarak hiçbir zaman desteğini esirgemeyen aileme teşekkürü borç bilirim.

Hacer TAŞDÖĞEN  
KONYA-2019

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET</b> .....	<b>iv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÖNSÖZ</b> .....	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER</b> .....	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR</b> .....	<b>ix</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b> .....	<b>x</b>
<b>ÇİZELGE LİSTESİ</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1. GİRİŞ</b> .....	<b>1</b>
<b>2. TOZ METALURJİSİ</b> .....	<b>3</b>
1.1. Toz Metalurjisi Tarihçesi .....	3
1.2. Toz Metalurjisine Bakış .....	4
1.3. Toz Metalurjisinin Uygulamaları .....	5
1.4. Toz Üretimi .....	6
2.4.1. Mekanik Yöntemler .....	7
2.4.2. Kimyasal Yöntemler .....	10
2.4.3. Elektroliz Yöntemi .....	11
2.4.4. Atomizasyon Yöntemi .....	12
1.5. Toz Metalurjisi Parça Üretimi .....	14
2.5.1. Karıştırma .....	15
2.5.2. Presleme .....	15
2.5.3. Sinterleme .....	16
<b>3. ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMLERİ</b> .....	<b>18</b>
3.1. Çeliklere Isıl İşlem Uygulama Amaçları .....	18
3.2. Demir-Karbon Denge Diyagramı .....	19
3.3. Çeliklerde Faz Dönüşümleri .....	20
3.3.1. Sabit Sıcaklık Dönüşümü .....	20
3.3. Sürekli Soğuma Dönüşümü .....	23
3.4. Tavlama Isıl İşlemleri .....	24
3.4.1. Tam Tavlama .....	25
3.4.2. Küreselleştirme .....	25
3.4.3. Normalizasyon .....	25
3.4.4. Yeniden Kristalleşme .....	26
3.4.5. Gerilim Giderme .....	27
3.4.6. Homojenleştirme (Difüzyon) .....	28
3.5. Sertleştirme Isıl işlemleri .....	28
3.5.1. Su Verme .....	28
3.5.2. Menevişleme(Temperleme) .....	28

3.5.3. Martemperleme .....	29
3.5.3. Ostemperleme .....	30
<b>4. KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ.....</b>	<b>31</b>
<b>5. LİTERATÜR TARAMASI.....</b>	<b>33</b>
5.1. Küreselleştirme Isıl İşlemi Üzerine Yapılan Literatür Çalışmaları .....	33
5.2 Toz Metalurjisi Literatür Çalışmaları .....	39
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>41</b>
6.1. Tozların Hazırlanması.....	42
6.2. Presleme İşlemi.....	44
6.3. Sinterleme İşlemi .....	46
6.4. Yoğunluk Ölçüm İşlemleri .....	47
6.5. Uygulanan Isıl İşlemler.....	48
6.6. Metalografik İncelemeler.....	50
6.7. Darbe Deneyi .....	51
6.8. Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri .....	52
6.9. Sertlik Ölçümleri.....	53
6.10. XRD Analizleri .....	55
<b>7. DENEYSEL SONUÇLAR .....</b>	<b>56</b>
7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları .....	56
7.2. Mikroyapı Sonuçları .....	57
7.2.1. Optik Mikroskop Görüntüsü İncelemeleri .....	57
7.2.2. SEM Görüntüleri İncelemeleri.....	59
7.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları.....	66
7.3.1. Mikro Sertlik Ölçümleri.....	66
7.3.2. Makro Sertlik Ölçümleri.....	69
7.4. Darbe Test Sonuçları .....	72
7.4.1. Darbe Enerjileri Sonuçları .....	72
7.4.2. Kırık Yüzey İncelemeleri.....	76
7.5. XRD Sonuçları.....	80
<b>8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....</b>	<b>85</b>
8.1. Sonuçlar .....	85
8.2 Öneriler .....	88
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>89</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>93</b>

## SİMGELER VE KISALTMALAR

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
Fe	Demir
Fe <sub>3</sub> C	Sementit
$\alpha$	Ferrit
$\gamma$	Östenit
Ac <sub>1</sub>	Alt kritik sıcaklık
Ac <sub>3</sub>	Üst kritik sıcaklık
mm	Milimetre
N	Newton
g	Gram
WC	Tungsten karbür
CO <sub>2</sub>	Karbondioksit
CO	Karbonmonoksit
K	Kelvin
Cr	Krom
Nb	Niobyum
Si	Silisyum
Mo	Molibden

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
TM	Toz metalurjisi
KK	Klasik küreselleştirme
SK	Salınımlı küreselleştirme
MSK	Martenzit sonrası küreselleştirme
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
XRD	X-ışınları difraksiyonu
HB	Brinel Sertliği
HV	Vickers sertliği
MPa	Megapascal

## ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Toz metalurjisi ile üretilmiş dişliler.....	5
Şekil 2.2 Çeşitli üretim teknikleri ile üretilmiş toz şekilleri .....	6
Şekil 2.3 Mekanik yöntemlerle tozun hazırlanmasında kullanılan genel kuvvetler .....	7
Şekil 2.4. Bilyalı öğütme .....	8
Şekil 2.5 Mekanik alaşımlama yöntemi.....	9
Şekil 2.6 Mekanik alaşımlama tekniği ile MgB <sub>2</sub> tozu üretim .....	10
Şekil 2.7 Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi .....	11
Şekil 2.8 Elektrolitik Toz Üretimi .....	11
Şekil 2.9 Yatay gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi.....	12
Şekil 2.10 Düşey gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi .....	13
Şekil 2.11 Toz metalurjisi işlem basamakları (metal dünyası dergisi).....	14
Şekil 2.12 Presleme basamakları .....	16
Şekil 2.13 Sinterleme aşamaları.....	17
Şekil 3.1. Demir karbon denge diyagramı .....	19
Şekil 3.2. Östenit-perlit dönüşümünü içeren izotermal dönüşüm diyagramı .....	21
Şekil 3.3. Östenit-perlit ve östenit beynit reaksiyonlarını içeren izotermal dönüşüm diyagramı .....	22
Şekil 3.4. Tam İzotermal Dönüşüm Diyagramı .....	23
Şekil 3.5. İzotermal ve sürekli soğumada dönüşüm çizgilerinin birleştirilmiş durumu .	24
Şekil 3.6. Tavlama ısıl işleminin şematik gösterimi .....	24
Şekil 3.7. Alaşımsız çeliklere uygulanan yumuşatma, normalizasyon, küreselleştirme ve sertleştirme işlemleri için tavlama sıcaklık aralıkları .....	26
Şekil 3.8. Yeniden kristalleşme ısıl işlem mekanizması.....	27
Şekil 3.9. Martemperleme ısıl işleminin şematik gösterimi .....	29
Şekil 3.10. Ostemperleme ısıl işleminin şematik gösterimi.....	30
Şekil 4.1. Küreselleştirme ısıl işlemi a) Şematik gösterimi b)öncesi ve sonrası mikroyapılar.....	31
Şekil 5.1. Farklı zamanlarda 1073 K'da yeniden ısıtma yapıldıktan sonra numunelerin mikroyapıları.....	33
Şekil 5.2. (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 numunelerinin SEM mikroyapı görüntüleri .....	34
Şekil 5.3. Numunelerin SEM mikrografları 770 ° C'de (a) 10 dak (b) 20 dak .....	35
Şekil 5.4. Su verme sonrası 700 oC'de küreselleştirme işlemi yapılmış numunelerin SEM mikroyapıları (a) 15dk, (b) 60dk .....	36
Şekil 5.5. Küreselleştirme ısıl işlemi sırasında mikroyapı oluşumunu gösteren SEM görüntüleri:a) Cr içeren mikroalyaj çeliği 8 saat b) Nb içeren mikroalyaj çeliği 8 saat.	37
Şekil 5.6. 550°C ve 620°C sıcaklıklarda 4 saat sinterlenmiş numunelerin SEM görüntüleri a)550°Cb)620°C .....	39
Şekil 6.1.Deneysel çalışmalarda kullanılan tozlar; a) Fe Tozu b) Grafit tozu.....	42
Şekil 6.2. Cilas-1190 marka particle sizer .....	43
Şekil 6.3. Tozların karıştırılması; a) Hassas terazi b) Fritsch Pulverisette 5 marka gezegen tipi karıştırıcı.....	43
Şekil 6.4. MSE marka çift etkili pres cihazı .....	44
Şekil 6.5. Mikroyapı (silindirik) numuneleri için; .....	44
Şekil 6.6. Hürsan marka çift etkili pres cihazı .....	45
Şekil 6.7. Darbe numuneleri için; .....	45
Şekil 6.8. Atmosfer kontrollü sinterleme fırını.....	46

Şekil 6.9. Micromeritics-AccuPyc II 1340 marka piknometre cihazı .....	48
Şekil 6.10. Hardway marka MT 2 serisi çift diskli zımparalama ve parlatma cihazı.....	51
Şekil 6.11. Hardway marka JB serisi darbe test cihazı .....	52
Şekil 6.12. Optik mikroskop .....	52
Şekil 6.13. Hitachi marka SU 1510 model SEM cihazı.....	53
Şekil 6.14. Emcotest marka Durascan G5 sertlik ölçüm cihazı .....	54
Şekil 6.15. Hardway marka HV 1000 ZDT model sertlik ölçüm cihazı .....	54
Şekil 6.16. GNR marka APD 200 Pro model XRD cihazı .....	55
Şekil 7.1. Yoğunluk değerlerinin değişim grafiği.....	56
Şekil 7.2. Sinterleme sonrası (ısıl işlemsiz) optik mikroskop görüntüsü.....	58
Şekil 7.3. Su verme işlemi sonrası oluşan martenzitik optik mikroskop görüntüsü.....	58
Şekil 7.4. Sinterleme sonrası (ısıl işlemsiz) SEM görüntüsü.....	59
Şekil 7.5. Küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış KK numunesine ait SEM görüntüleri .....	60
Şekil 7.6. Küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış SK numunesine ait SEM görüntüleri (a) 5 saat (b) 10 saat (c) 20 saat (d) 40 saat .....	62
Şekil 7.7. Su verme işlemi sonrası martenzitik SEM görüntüsü .....	64
Şekil 7.8. Küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış MSK numunesine ait SEM görüntüleri;.....	65
Şekil 7.9. KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerleri grafiği .....	67
Şekil 7.10. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerleri grafiği .....	67
Şekil 7.11. MSK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerleri grafiği.....	69
Şekil 7.12. KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerleri grafiği.....	70
Şekil 7.13. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerleri grafiği .....	71
Şekil 7.14. MSK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerleri grafiği.....	72
Şekil 7.15. KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişim grafiği .....	73
Şekil 7.16. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişim grafiği .....	74
Şekil 7.17. Martenzit yapı ve martenzit yapı sonrası küreselleştirmeye bağlı darbe enerjisi değişim grafiği .....	75
Şekil 7.18. Sinterleme sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü .....	76
Şekil 7.19. KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı kırık yüzey SEM görüntüleri; .....	77
Şekil 7.20. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı kırık yüzey SEM görüntüleri; .....	78
Şekil 7.21. Su verme işlemi sonrası martenzitik yapı kırık yüzey SEM görüntüsü .....	79
Şekil 7.22. Martenzit sonrası 5 saat küreselleştirme kırık yüzey SEM görüntüsü .....	79
Şekil 7.23. Sinterleme sonrası (ısıl işlemsiz) numunesine ait XRD grafiği .....	81
Şekil 7.24. 5 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış KK numunesine ait XRD grafiği.....	81
Şekil 7.25. 40 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış KK numunesine ait XRD grafiği.....	82

Şekil 7.26. 5 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanmış SK numunesine ait XRD grafiği.....	82
Şekil 7.27. 40 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanmış SK numunesine ait XRD grafiği.....	83
Şekil 7.28. Martenzitik numuneye ait XRD grafiği.....	83
Şekil 7.29. 5 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanmış SK numunesine ait XRD grafiği.....	84



## ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 2.1. Toz metalürjisinin relatif üretimi.....	4
Çizelge 6.1. Uygulanan deneysel çalışmaların şematik gösterimi.....	41
Çizelge 6.2. Deney numunelerinin sinterleme grafiği .....	47
Çizelge 6.3. Klasik küreselleştirme ısı işlem grafiği .....	49
Çizelge 6.4. Salımlı küreselleştirme ısı işlem grafiği .....	49
Çizelge 6.5. Martenzit üretim sonrası küreselleştirme ısı işlem grafiği .....	50
Çizelge 7.1. Yoğunluk değerleri .....	56
Çizelge 7.2. KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerlerinin değişimi.....	66
Çizelge 7.3. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerlerinin değişimi.....	67
Çizelge 7.4. MSK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerlerinin değişimi.....	68
Çizelge 7.5. KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerlerinin değişimi.....	70
Çizelge 7.6. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerlerinin değişimi.....	70
Çizelge 7.7. MSK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerlerinin değişimi.....	71
Çizelge 7.8. KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişimi ....	73
Çizelge 7.9. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişimi.....	73
Çizelge 7.10. Martenzit yapı ve martenzit yapı sonrası küreselleştirmeye bağlı darbe enerjisi değişimi.....	75

## 1. GİRİŞ

Toz metalurjisi yöntemi toz haline getirilen malzemelerin kullanılmak istenen forma dönüştürülmesi işlemidir. Toz metalurjisi yöntemi ile nihai ürün elde edilir ve malzemelere talaşlı işlem uygulanması gerekmez. Toz metalurjisi yöntemi gelişen teknoloji ile birlikte uzay ve havacılık başta olmak üzere birçok alanda yaygın olarak kullanılmaya başlamıştır. Toz metalurjisi malzemelerin çeşitli yöntemlerle toz haline getirilmesi ve ardından üretilmek istenen malzemenin şekline uygun kalıplarda farklı basınçlar altında preslenmesi esasına dayanmaktadır. Presleme işlemi takiben elde edilen malzemelerin dayanımları arttırmak amacıyla farklı koşullarda sinterleme ısıl işlemi uygulanmaktadır. Uygulanan presleme ve sinterleme ısıl işlemi parametreleri malzemelerin mekanik özelliklerine doğrudan etki etmektedir [1].

Hakan ve arkadaşları, sinterleme gözenek-yapı etkileşimini incelemiştir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla gözeneklerin arttığını gözlemlemiştir [49]. Yapılan başka bir çalışmada, toz metalurjisi (TM) yöntemiyle üretilen alaşımsız çeliklerin mikroyapı mekanik özelliklerini presleme basıncıyla olan ilişkisi araştırılmıştır [41].

Toz metal çelikleri güçlendirmek amacıyla sinterlemeden sonra çeşitli ısıl işlemler uygulanır. Toz metal çeliklere uygulanan en yaygın ısıl işlem yöntemi de su verme ve temperleme ısıl işlemidir. Ancak bu ısıl işlem ise genellikle istenilen darbe özelliklerini azaltır. Yüksek karbonlu çeliklerin işlenebilirliğini, şekillendirilebilirliğini, sünekliğini ve darbe tokluk özelliklerini geliştirmek için küreselleştirme ısıl işlemleri uygulanmaktadır. Bu ısıl işlemin uygulandığı çelikte ferritik matriste ince dağılmış küresel sementit fazlarının dağılımı sağlanır. Küreselleştirme tava, daha çok yüksek karbonlu çeliklere uygulanır. Küreselleştirme ısıl işlemleri, düşük karbonlu çeliklere nadiren uygulanır. Çünkü bu tür çelikler küreselleştirme tava sonunda çok yumuşarlar ve bu aşırı yumuşama talaşlı işlem sırasında bazı zorluklara neden olabilir. Uygulanan ısıl işlem metodu, malzeme içerisinde bulunan kimyasal kompozisyon gibi parametreler küreselleşme davranışını etkilemektedir.

Çeliklere uygulanan küreselleştirme ısıl işlemi genellikle Ac1 sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklıkta uzun bir süre tavlansın ya da Ac1 sıcaklığının hemen altında bir süre tavlansın ardından hemen üstündeki sıcaklıklara tavlansın bu sıcaklıklar arasında tekrarlı olarak ısıtıp soğutma işlemleriyle gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada, saf demir tozlarından üretilen yüksek karbonlu toz metal çeliklerde sementit fazının küreselleştirilmesi üzerine bir çalışma yapılmıştır. Bu sayede yüksek karbon ihtiva eden toz metalurjisi çeliklerin darbe tokluklarının ve diğer mekanik özelliklerinin geliştirilebileceği amaçlanmıştır.

Bu düşünce ile hazırlanan yüksek karbonlu toz metalurjisi çeliklerde farklı küreselleştirme ısı işlem yöntemleri uygulanarak mikroyapı, sertlik ve tokluk özelliklerine etkileri incelenmiştir.



## 2. TOZ METALURJİSİ

### 1.1. Toz Metalurjisi Tarihçesi

Dünyanın birçok yerinde metalsel tozların çok önceleri kullanımı söz konusudur. Örneğin mısırlılar demir tozlarını M.Ö 3000 yıllarında kullanmışlardır. Daha sonraki yıllarda İnkalar da değerli metal tozlarını kullanarak çeşitli eşyalar yapmışlardır.

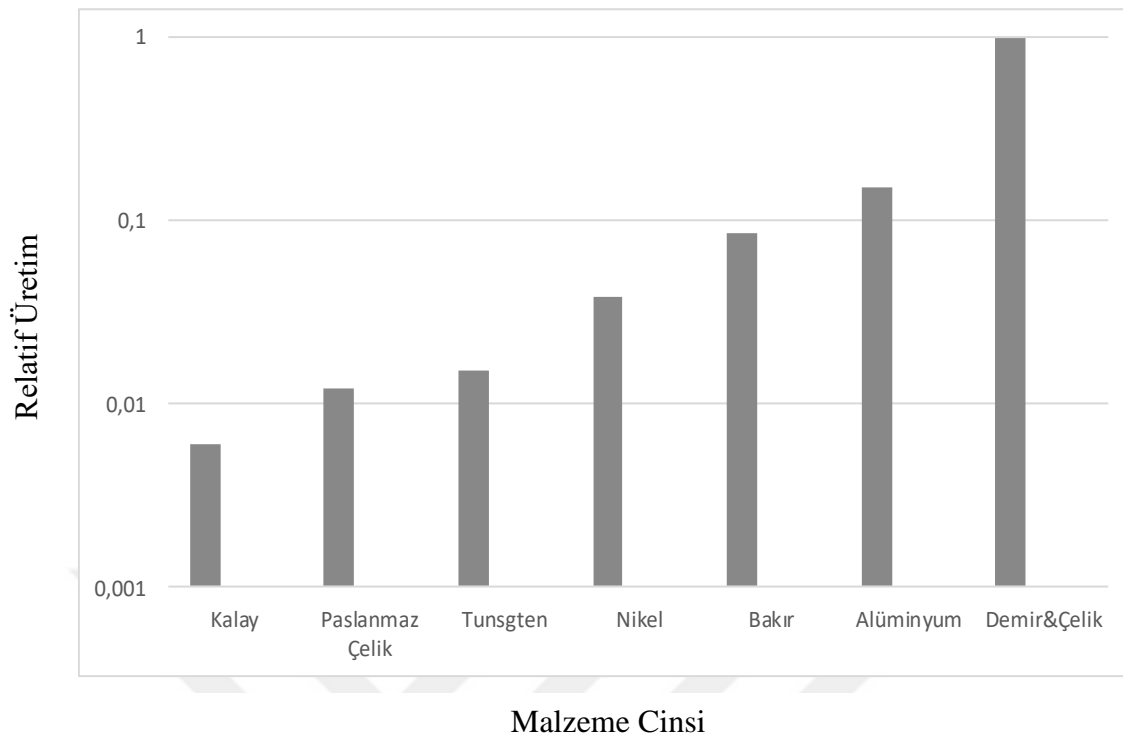
1800 yıllarında ise gerçek anlamda toz metalurjisi tekniklerinin kullanımı başlamıştır. Endüstri de platin ve iridyum gibi yüksek sıcaklıkta eriyen metallerin kullanımı yaygınlaşmıştır.

Toz metalürjisinin modern tarihçesi ise tungsten toz kullanarak dayanıklı lamba filamanları üreten Coolidge ile başlar. Coolidge 1900 başlarında lambalar için C filament yerine W filamentleri üretmeye başlamıştır. 1940'lı yıllarda WC-Co sermetlerin toz metalürjisi yöntemi kullanılarak kesici takımlar ve tel çekme kalıpları üretimi gerçekleştirilmiştir. Bunun devamında Fe esaslı metallere çeşitli dişliler kam mili ve diğer yapısal malzemeler üretilmiştir. 70'li yıllardan itibaren toz metalurjisi ile karmaşık şekilli parçaların üretiminde sıcak izostatik presleme kullanılmaya başlanmıştır. Bu yıllarda otomobil parçalarının toz metalurjisi yöntemiyle üretimine başlanmıştır. Aynı zamanda süper alaşım ve takım çeliklerinin üretimi gerçekleştirilmiştir. Uçakların türbin motor parçaları 1980'li yıllarda toz metalurjisi yöntemi ile üretilmeye başlanmıştır.

Bu gelişmeler göz önüne alındığında Çizelge 2.1'den de görüldüğü gibi özellikle toz metalürjisi uygulamaları arasında en büyük gelişim belki de demir esaslı malzemeler açısından gerçekleşmiştir.

Toz metalurjisi ile yüksek kalitede malzeme üretimi, günümüzün ve geleceğin üretim yöntemleri arasında yer alan önemli bir prosestir. Önceleri, toz esaslı parçalar sadece ucuzluk sebebi ile tercih edilirken, günümüzde tercih sebebi kalite, homojenlik, özellikler ve üretilebilirlik gibi hususları da içermektedir [1].

Çizelge 2. 1. Toz metalürjisinin relatif üretimi



## 2.2. Toz Metalürjisine Bakış

Toz metalürjisi, metal tozlarının belirli oranda karıştırılarak, oda sıcaklığında hassas kalıplarda istenilen teknik değerlere uygun basınçlarda sıkıştırılması ve sonrasında kontrollü atmosfer şartlarında fırınlanmasıyla parça üretme yöntemidir.

Toz metalürjisi çok çeşitli metalik ve alaşım malzemelerin, seramiklerin şekillendirilmesinde kullanılan hızlı ve pratik bir yöntemdir. Toz metalürjisi, demir ve demir olmayan metallerin üretiminde oldukça gelişmiştir. Toz metalürjisini cazip kılan çok yüksek hassasiyette karmaşık şekilli, yüksek kalitede parça üretiminin mümkün olmasıdır [14].

Uygulanan işlem adımları esnek, etkin, düşük maliyetli ve çevreye zararsız yöntemlerdir. Toz metalürjisinin diğer üretim tekniklerinden daha kısa imalat çevrim süresi vardır. Çünkü bazı işlem kademeleri uygulanmaksızın nihai ölçülerde, doğrudan yerine takılarak kullanmaya müsait parça üretimi mümkündür.

Ergime sıcaklığı yüksek olan metaller, toz metalürjisi ile kolaylıkla şekillendirilebilirler. Döküm, gibi alışlagelmiş üretim tekniklerinde yaşanan oksidasyon, segregasyon, gaz absorpsiyonu ve yüksek yoğunluk farkından dolayı alaşım oluşturmama gibi birçok problem toz metalürjisi yöntemi ile kolaylıkla ortadan kaldırılabilir [15].

### 2.3. Toz Metalurjisinin Uygulamaları

Toz teknolojileri, tekrar tekrar aynı ürünü kopyalamaya izin veren kalıp boşlukları sayesinde çok sayıda üretim yapılmasına imkân sağlarlar.

Serbest şekilli üretimlerde ise bu teknoloji tek bir ürünün elde edilmesine imkân tanır. Maliyet daima önemli aktörlerden biridir. Bundan dolayı karmaşık şekilleri son boyuta getirebilmek ve şekil verebilme özelliği önemli ölçüde ekonomik yarar sağlar. Ayrıca yüksek oranda malzeme kullanımı ve izafi olarak daha düşük enerji tüketimi sağlayan otomasyonun toz süreçlerinde kullanımı da ekonomik kazançlar sağlamaktadır.

Toz metalürjisi teknikleri ile üretilen ürünler her yerde kullanılır. Örneğin; yüksek şiddetli ışıklar, diş yenileme, yataklar, otomobil transmisyon milleri, zırh delici mermiler, elektrik temas elemanları, nükleer güç yakıt çubukları, ortopedik protezler, yüksek sıcaklık filtreleri, uçak fren balatları, yeniden doldurulabilen piller, saat gövdeleri, elektronik kapasitörler ve jet motoru türbinlerinde önemli bir alan teşkil etmektedir. Açıkçası, tozlar her alanda kullanılmaktadır [17].



Şekil 2.1 Toz metalürjisi ile üretilmiş dişliler

## 2.4. Toz Üretimi

Bir tozun üretim yönteminin bilinmesi tozun genel özelliklerinin başlangıçta tahmin edilmesini sağlar. Hemen hemen her malzeme toz haline getirilebilir ancak tozun geometrik şekli üretim yöntemine bağlı olarak küreselden, karmaşık şekle kadar çok farklı olabilmektedir. Tozun yüzey durumu da üretim yöntemine göre değişiklik göstermektedir. Malzemelerin çoğu, özelliklerine uygun bir teknik kullanılarak toz haline getirilebilir. Birçok toz üretim tekniği arasından, ticari olarak 4 teknik kullanılmaktadır [8].

- Mekanik yöntemler
- Kimyasal yöntemler
- Elektroliz yöntemi
- Atomizasyon yöntemleri



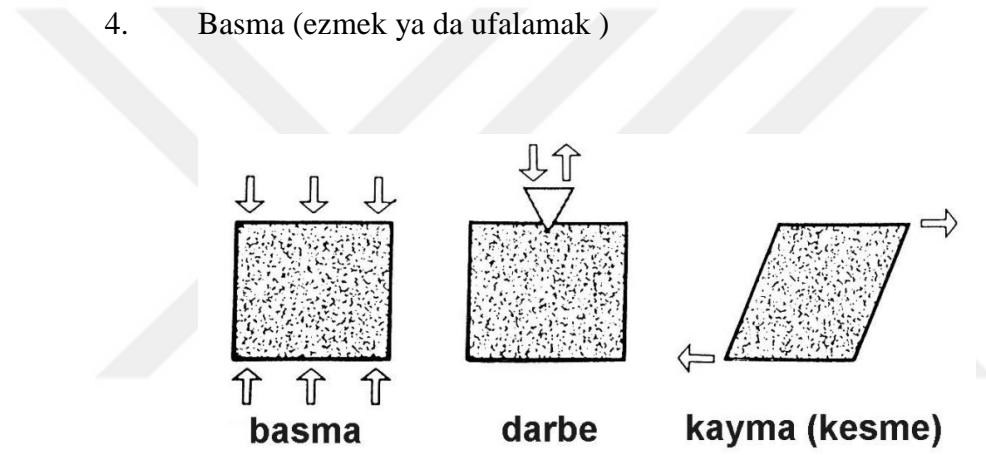
Şekil 2.2 Çeşitli üretim teknikleri ile üretilmiş toz şekilleri

### 2.4.1. Mekanik Yöntemler

Mekaniksel yöntemlerde temel prensip enerji kullanmak suretiyle yeni serbest yüzeylerin oluşturulmasıdır. Aslında yöntemin isminde de belirtildiği gibi darbeye dayalı yöntemlerdir. Darbe ile malzemeye ani bir kuvvet uygulanır ve böylece öncelikli olarak oluşan çatlak sonucu kırılma gerçekleşir,

Mekanik yöntemlerle toz üretmek için 4 temel mekanizma vardır;

1. Darbe (vurma)
2. Öğütme (küçük bilyelerin bulunduğu dönen bir sistem içerisinde öğütme yapmak suretiyle toz üretimi )
3. Kayma (kesme, kırılma)
4. Basma (ezmek ya da ufalamak )



Şekil 2.3 Mekanik yöntemlerle tozun hazırlanmasında kullanılan genel kuvvetler

Vurma-darbe ile toz üretimi; örneğin çekiçle vurmak gibi anlık ve hızlı bir işlemdir. Büyük parçaların küçük tanelere parçalanmasında hızlı ve etkili bir yöntemdir.

Öğütme, toz üretimi yapılacak malzemenin özelliklerinin bilinmesi gerekmektedir ve malzemeye uygun öğütme bilyeleri seçilmelidir. Yüksek enerjili sistemde malzeme ve bilyelerin çarpıştırılmasıyla parçaların ufalanarak toz üretimi gerçekleştirme işlemidir.

Aşındırarak öğütme, aşındırıcıların birbiri üzerinde devamlı sürtünme hareketi yapması sayesinde toz parçalarının boyutunun küçültülmesidir.

Kırpmak suretiyle toz üretimi ise daha çok talaşlı imalatta olduğu üzere malzemenin parçalanmasıdır. Ancak kesme ile üretimi yapılan tozların büyük olma ihtimali fazladır [1].

Basma kuvvetleri ile kırılma noktasına kadar deforme edilen malzeme toz haline gelmektedir. Yiyeceklerden örnek verecek olursak küp şeker basma kuvvetleri sayesinde toz haline gelebilmektedir.

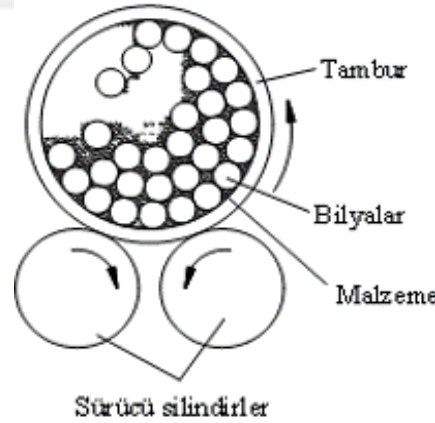
Mekanik yöntemleri ayrıca

- Öğütme
- Talaşlı üretim
- Mekanik alaşımlama

olmak üzere üç grupta inceleyebilmek mümkündür.

#### 2.4.1.1. Öğütme

Mekanik üretim tekniği olmasına rağmen diğer tekniklerle üretilmiş tozların kırılması için de kullanılan öğütme, genel olarak bilyalı değirmenlerde yapılmaktadır. Kırılğan malzeme tozlarının üretiminin yapıldığı bu yöntemde, temel prensip parçalanacak malzeme ile sert bir cisim arasında bir darbe meydana gelmesini sağlamaktır. Sünek malzemeler için kullanışlı değildir çünkü sünek malzemeler kırılarak ufalanma yerine şekil değiştirir veya topaklanır.



Şekil 2.4. Bilyalı öğütme

Şekil 2.4. de görüldüğü gibi bilya ve malzemenin bir arada bulunduğu tambur öğütme işleminin yapılacağı değirmendir. Tambur döndükçe içerisindeki malzemedan daha mukavemetli olan bilyalar malzemeye çarparak parçalanmasını sağlayacaktır. Gevrek malzemeler için toz üretmede kullanılan klasik bir yöntemdir ancak öğütülen malzeme sünek parçacıklardan oluşuyor ise, çarpışma sonucunda şekil değiştirerek yassılaşırlar [11].

### 2.4.1.2. Talaşlı İmalat

Bu mekanik yöntemde talaş kaldırma teknikleri kullanılarak oldukça büyük boyutta ve karmaşık şekilli tozlar üretilir. Üretilmiş olan tozlar isteğe bağlı olarak öğütülerek ince tozlar haline getirilebilir. Toz özelliklerinin kontrolünde genel olarak zorluk yaşanabilir. Yüksek karbonlu çelik tozların üretimi genellikle bu yöntemle üretilir [1,7].

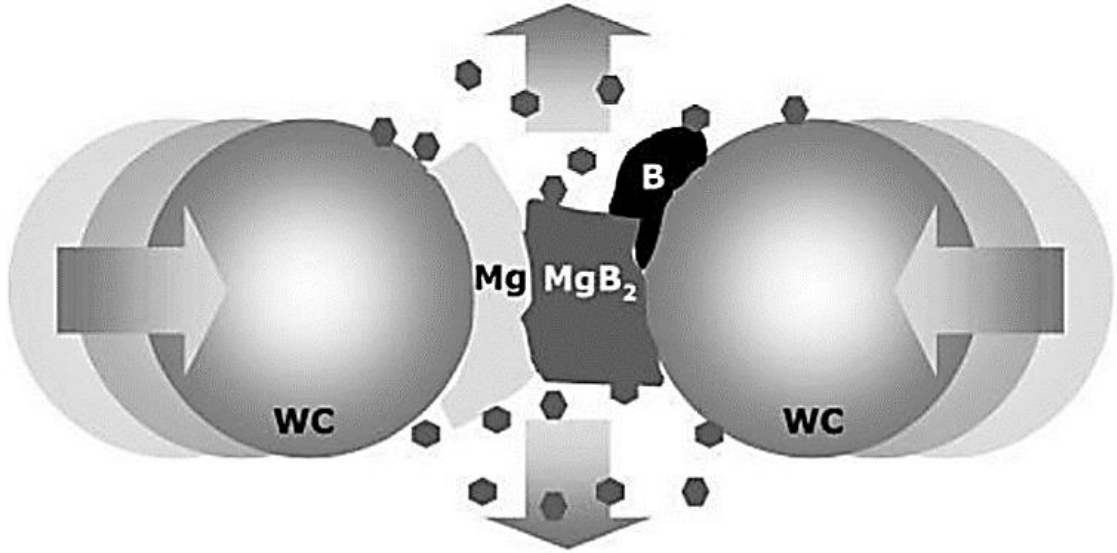
### 2.4.1.3. Mekanik Alaşımlama

Bu yöntemin amacı yüksek dayanımlı kompozit malzeme üretimi yapmaktır. Mekanik alaşımlama yönteminde katı ve kuru halde bulunan tozlar kullanılmaktadır. Tozların birbirlerine kaynaklanmasını ve tekrar bu kaynakların kırılmasını sağlayarak daha ince ve homojen bir mikro yapı oluşmaktadır [10].



Şekil 2.5 Mekanik alaşımlama yöntemi

M.A. yönteminde tozlar kapalı bir kap içerisine konular ve şaft döndürülür. Tozlar Şekil 2.5 te görüldüğü gibi şaft kolları ve bilyalar yardımı ile deforme edilir ve bu tozlarda kırılma ve soğuk kaynaklanmalar meydana gelir.



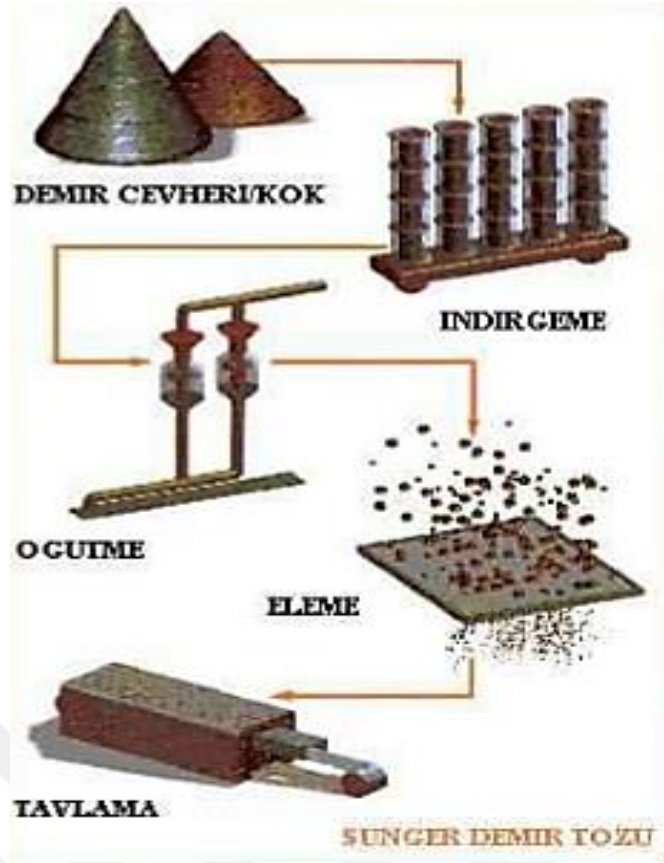
Şekil 2.6 Mekanik alaşımlama tekniği ile MgB<sub>2</sub> tozu üretim

#### 2.4.2. Kimyasal Yöntemler

Demir tozlarının üretiminde kimyasal yöntemler oldukça fazladır. Sünger-demir tozu bu yöntemin önemli bir uygulama örneğidir. İşlem sırasıyla;

1. Seçtiğimiz cevher kok veya kireç taşı ile karıştırılır.
2. Bu karışım indirgenme işleminin yapıldığı sürekli fırında bekletilir.
3. İsteddiğimiz sünger demir elde edilir.
4. Sünger demir öğütme işlemine girer.
5. Metal olmayan malzemelerden elenir ve tozlar hazırlanmış olur.

Seçtiğimiz malzemelerin tozların saflığına etkisi oldukça büyüktür. Kimyasal yöntemle üretilen tozlar genel yapı itibariyle süngerimsidir. Bu nedenle kolayla preslenebilir ve mukavemeti yüksek parçalar elde edilir [5].

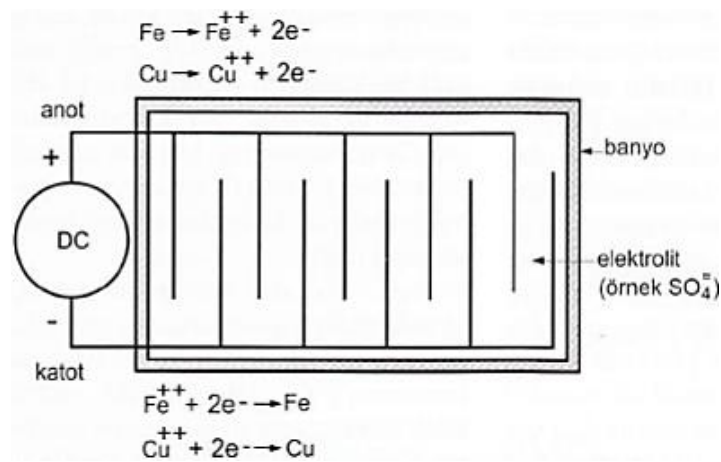


Şekil 2.7 Kimyasal yöntemle demir tozu üretimi



### 2.4.3. Elektroliz Yöntemi

Elektroliz sistemin çalışması Şekil.2.8 de şematik olarak gösterilmiştir.



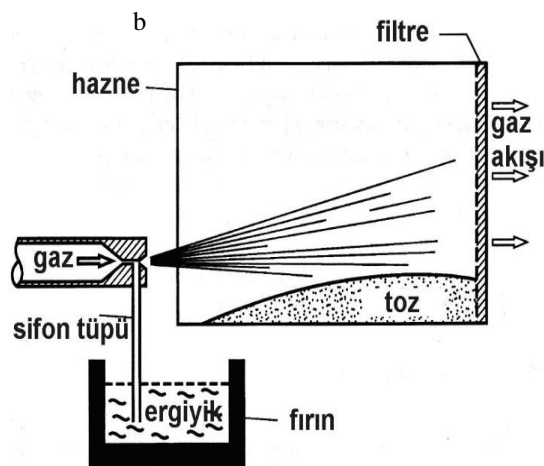
Şekil 2.8 Elektrolitik Toz Üretimi

Olay, elektrolitik bir hücre içerisinde uygulanan belirli bir gerilim altında anodun çözünmesi ile başlar. İlgili şekilde anot ve katot reaksiyonları bakır ve demir reaksiyonları olarak verilmiştir. Sülfat esaslı elektrolit üzerinden gerçekleşen madde taşımını ile katot üzerinde saf halde bir çökeltme gerçekleşir. Katot üzerinde oluşan bu poroz çökelti daha sonrasında haznedan alınarak sırası ile yıkama, kurutma, tavlama ve öğütme işlemlerinin uygulanması ile istenilen boyutta toz haline getirilir

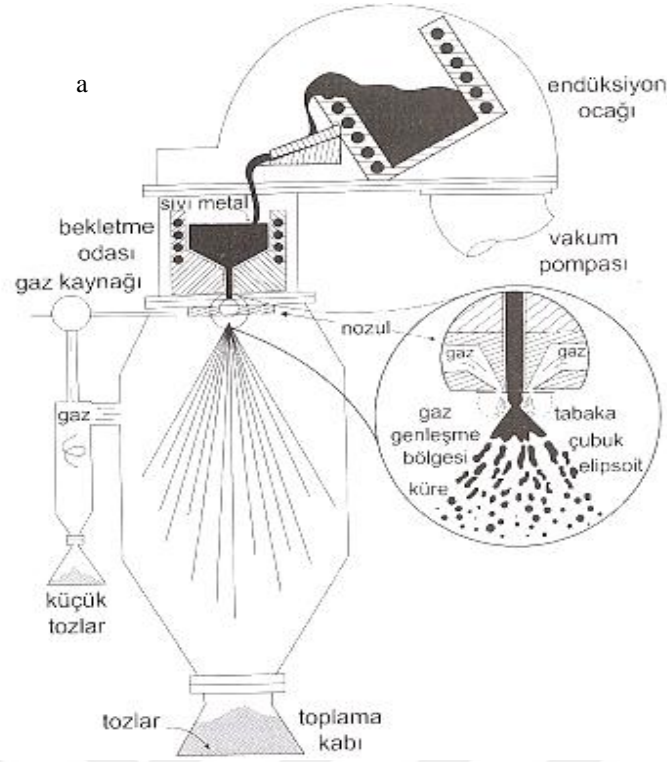
#### 2.4.4. Atomizasyon Yöntemi

Atomizasyon, ergimiş sıvı metalin farklı boyutlardaki çok sayıda damlacıklara ayrılmasıdır. Temel prensip, ergiyik haldeki sıvı metal bir şerit halinde akarken üzerine yüksek basınçlı gaz veya su püskürtülerek ile ufak parçalar halinde parçalanması ve soğutulmasıdır. Hava, azot ve argon sıklıkla kullanılan gazlardır ve su ise çok sık tercih edilen sıvıdır. Buna ek olarak gazyağı-parafin de tercih edilen sıvılardandır. Burada gaz veya sıvı, ergiyik haldeki sıvı metali farklı boyutlarda çok sayıda ufak parçalara ayırır. Bu parçalar daha sonra katılaşıp metal tozlarını oluştururlar. Bu üretim yöntemini inceleyecek olursak:

- Ergitme
- Atomizasyon
- Katılma ve soğuma olarak 3 ana bölüme ayrılır [2].



Şekil 2.9 Yatay gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi



Şekil 2.10 Düşey gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi

Atomizasyon genellikle metaller, alaşımlar ve intermetalikler için kullanılmasına rağmen son zamanlarda polimer ve seramiklere de uygulanmaktadır. Atomizasyon teknikleri ile istenen boyutta, kalitede ve şekilde toz üretimi mümkündür. Çoğu alaşım sistemi için uygulanabilir ve prosesin sürekli kontrol edilebilmesi bu yöntemi çekici diğer unsurdur. Tozun üretiminden sonra çoğu zaman yüzey oksitlerinin azaltılması, gazlardan uzaklaştırma ve toz boyutu dağılımı gibi ürünün istenen niteliklere getirilmesi için ek işlemler yapılabilmektedir.

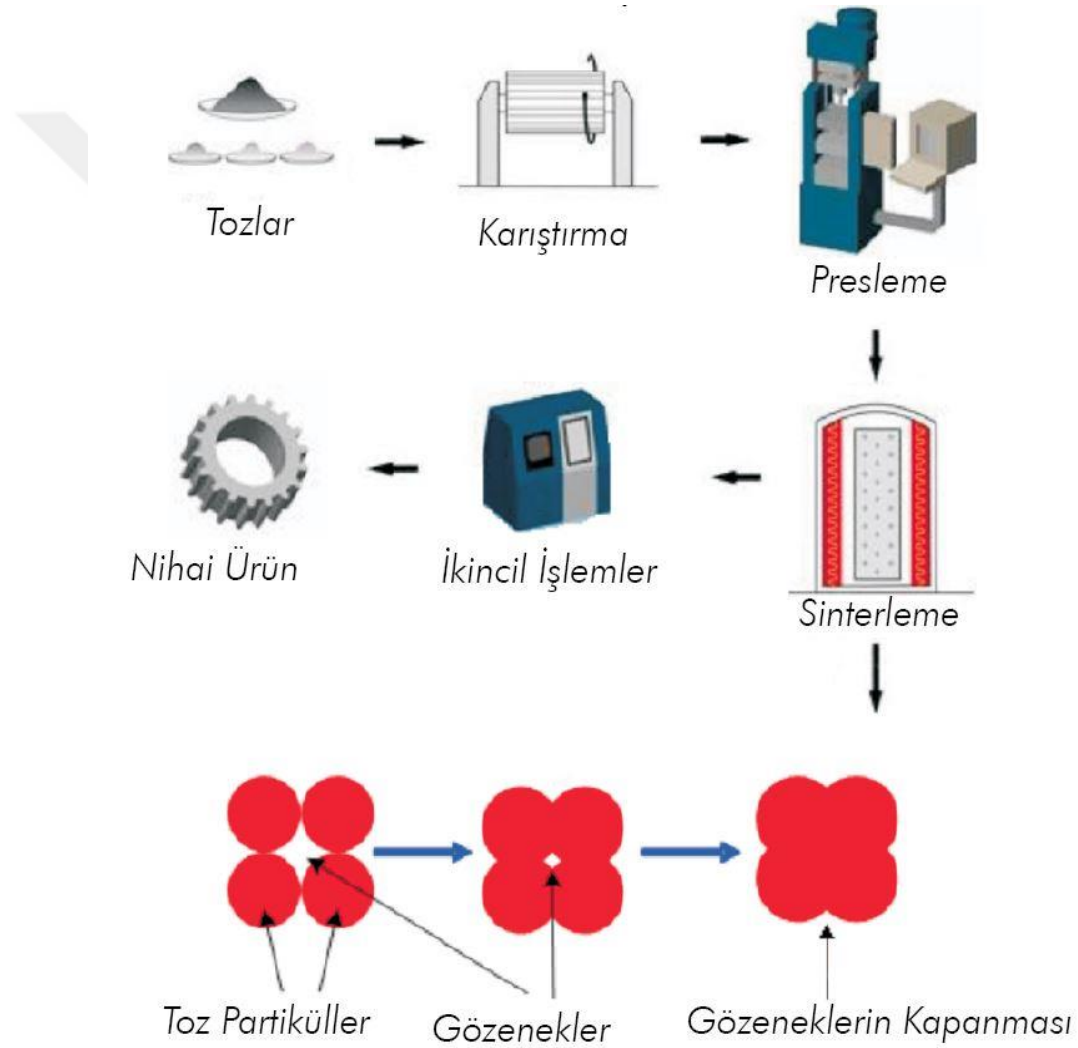
Ayrıca artan ihtiyaca göre ortaya çıkan uygulama alanı oldukça geniş olan atomizasyon yöntemleri bulunmaktadır. Bunlardan en çok kullanılanları; gaz atomizasyon yöntemi ve su atomizasyon yöntemidir. Bu yöntemlere ek olarak, döner disk yöntemi, döner elektrot yöntemi, vakum atomizasyon yöntemi örnek verilebilir [3,8].

## 2.5. Toz Metalurjisi Parça Üretimi

Toz metalurjisi ile parça üretimi genel itibari ile 3 temel aşamada meydana gelmektedir. Bu aşamalar şekil 2.10 da görüldüğü gibi;

- Tozların karıştırılması
- Karışımın şekillendirilmesi
- Sinterleme

şeklinde gerçekleşir.



Şekil 2.11 Toz metalurjisi işlem basamakları (metal dünyası dergisi)

### 2.5.1. Karıştırma

Metal tozlarının üretiminden sonra tozlar, yeni homojen bileşimler oluşturmak amacıyla karıştırılır. Buna ek olarak preslemeyi kolaylaştırması için yağlayıcılar eklenebilir. Karışımın içerisine ihtiyaç durumunda genelde %0.5-%1.5 arasında yağlayıcı eklenir. Yağlayıcı kullanımın en büyük amacı presleme esnasında toz kütleleri ile kalıp duvarındaki sürtünmeyi azaltmaktır. Böylelikle parçalar preslendikten sonra kalıptan çok daha kolay çıkarılır.

Ayrıca önceden alaşımlanmış tozlara alternatif olarak alaşım elementlerinin karıştırılması ile alaşım elementleri yağlayıcı gibi davranır. Bu durumda saf demirin yüksek olan basma kuvveti korunur ve alaşım elementleri demirin sertleşmesini önlenmiş olur. karbon ve grafit en çok kullanılan alaşım elementi olarak demir tozuna katılır

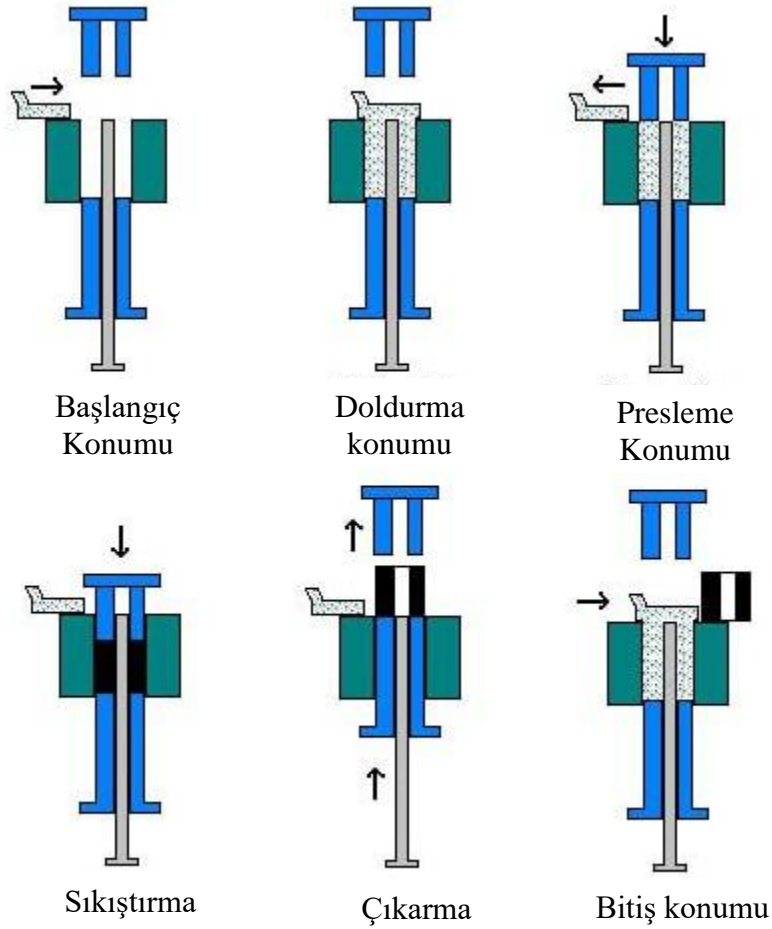
Karışma süresi ve karıştırıcı tipi de karışımın kalitesinde çok önemli rol oynar. Karışımın homojen olarak eldesi için karışım süresi büyük bir faktördür. Ancak belli bir süre karışım yapıldıktan sonra karışımın süresi etkili olmamaktadır [18,19.20].

### 2.5.2. Presleme

Presleme (sıkıştırma) bir yük altında serbest yapıda bulunan toz partiküllerinin istenilen şekle dönüştürülmesi için yoğunluk kazandırma işlemi olarak tanımlanabilir. Bu işlemdeki ana amaç ham yoğunluk ve dayanımın elde edilmesidir. Bu işlem için genellikle hidrolik, mekanik ve pnömatik presler kullanılmaktadır. Preslerin uyguladıkları ortalama basınç değerleri 300-800 MPa arasındadır. Parçalar sıkıştırma sonucu yeterli mukavemeti aldıklarında kalıptan çıkarılır. İyi bir sıkıştırma işlemi ile neredeyse teorik özgül ağırlığa yakın yoğunlukta parça üretimi mümkün olabilir. Örneğin 800 MPa basınçta, demir tozları 7.3 g/cm<sup>3</sup> gibi teorik özgül ağırlığın yaklaşık % 93 ü sağlanabilir. Yoğunlaşmayı daha da arttırabilmek için farklı presleme yöntemleri vardır ve bunlar;

- Soğuk presleme
- Ilık presleme
- Sıcak preslemedir.

Sıcak presleme işlemi yapılan parçanın özgül ağırlığı artar.(yaklaşık  $0,2\text{g/cm}^3$ ) Sıcak sıkıştırma işleminde toz karışımı özel bir yağlayıcı ile yağlanır ve kalıplar yaklaşık 130-150°C sıcaklığında işlem tamamlanır.



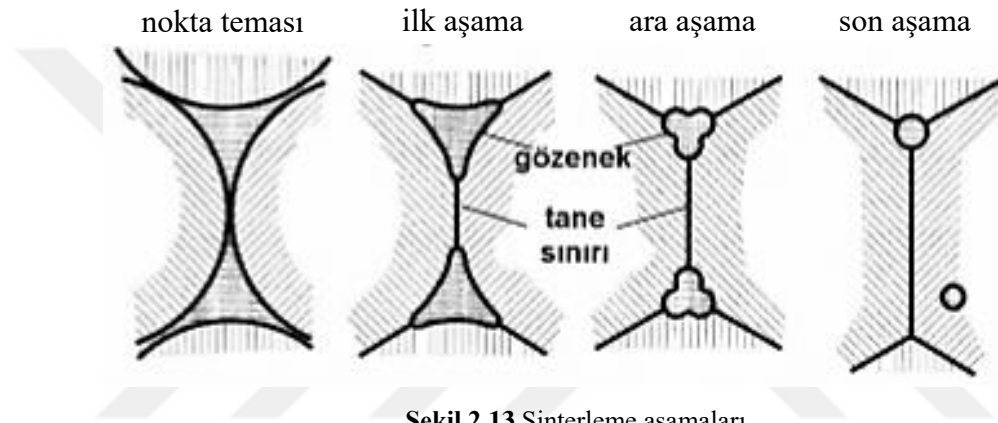
Şekil 2.12 Presleme basamakları

### 2.5.3. Sinterleme

Sinterleme, parçacıkların birbirine bağlanmasını sağlayarak önemli ölçüde mukavemet artışına ve özelliklerin iyileşmesine yol açan ısıtma işlemidir. Sinterleme, yüksek sıcaklıklarda atomların yayını ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Böylece yüzey enerjisi azalırken mukavemet artar. Birim hacimdeki yüzey enerjisi parçacık boyutu azaldıkça arttığından küçük boyuttaki parçacıklar daha hızlı sinterlenir.

Bu işlem yapılırken tek bileşenli sistemlerde; metalin mutlak ergime sıcaklığının 2/3 ve 4/5'i alınır. Birden fazla bileşenli sistemlerde ise ergime sıcaklığı en düşük olan bileşenin ergime sıcaklığının üstünde yapılır.

Sinterleme sıcaklığı kullanılan malzemeye göre değişim göstermektedir. Demir alaşımları 1000 – 1300 °C, refrakter metaller 2000 – 2900 °C arasındaki sıcaklıklarda sinterlenirler Sinterleme süresi de kullanılan malzemeye göre değişir. Sinterleme zamanı ve sıcaklığı arasında basit bir bağlantı vardır. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme zamanı kısalır; aksine olarak alçak bir sinterleme sıcaklığı sinterleme zamanının uzamasına sebep olur.



Şekil 2.13 Sinterleme aşamaları

Şekil 2.12 de tozların noktasal temasıyla başlayan sinterleme işlemi sırasında gözenek yapısının değişimi gösterilmiştir. Boşluklar giderek azalmış ve boşluklar daha küresel bir hale gelmiştir. Boşluklar küreselleşirken boşlukların yerini tane sınırları almıştır [6].

### 3. ÇELİKLERİN ISIL İŞLEMLERİ

#### 3.1. Çeliklere Isıl İşlem Uygulama Amaçları

Isıl işlem, genel çerçevesiyle, metal veya metal alaşımlarına kazandırılmak istenilen özellikler doğrultusunda uygun bir sıcaklığa ısıtılması, bu sıcaklık veya sıcaklık aralığında belirli bir süre tutulması ve ardından uygun bir soğutma hızı ve ortamında belirli bir sıcaklığa soğutulması olarak tanımlanabilir. Isıl işlemler metaller üzerine uygulandığında o metalin içyapısına etki eder ve mikro yapıda bazı değişimler meydana getirir. Meydana gelen bu değişimler ısıl işlemle elde edilmek istenen sonucunun oluşmasını sağlayan mekanizmanın temelini oluşturmaktadır.

Isıl işlem temel olarak;

- Malzemenin mekanik özelliklerini iyileştirmek
- Aşınma mukavemetini arttırmak
- Talaşlı işlenebilme işlemlerini kolaylaştırmak
- Bir önceki işlemde gelen kalıntı gerilmeleri vb. ortadan kaldırmak
- Tane yapısını inceltmek
- Sertliği arttırmak gibi amaçlarla uygulanmaktadır.

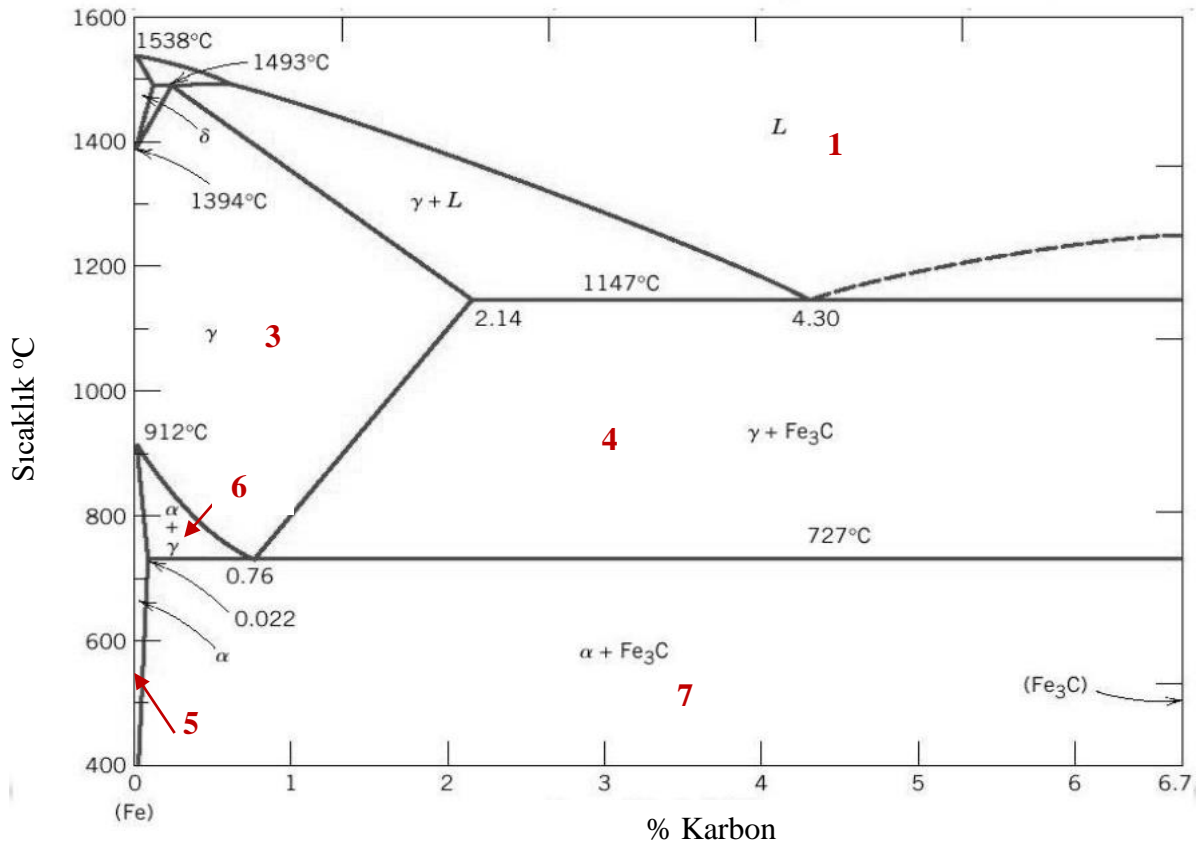
Malzemeye bu özellikleri kazandırabilmek için farklı yöntemler mevcuttur. Buna ek olarak bu işlemlerin gerektirdiği yöntem, materyal, sıcaklık değeri, süre gibi etmenler de değişebilmektedir [21].

### 3.2. Demir-Karbon Denge Diyagramı

Çelikler %2'ye kadar karbon içeren bileşik yapıya sahiplerdir. İçerdikleri karbon oranına göre üç gruba ayrılırlar.

1. Karbon Oranı 0,8 den küçük olan çelikler (ötektoidaltı çelikler)
2. Karbon oranı 0,8 olan çelikler (ötektoid çelikler)
3. Karbon oranı 0,8 den büyük olan çelikler (ötektoidüstü çelikler)

Şekil 3.1'de Demir-Karbon denge diyagramı gösterilmiştir. Bu diyagramda çelikler içerdiklerine karbon oranına göre 7 faza ayrılmışlardır.



Şekil 3.1. Demir karbon denge diyagramı

1. L : Eriyik Çelik
2.  $\gamma + L$  : Östenit + Eriyik Çelik
3.  $\gamma$  : Östenit
4.  $\gamma + Fe_3C$  : Östenit + Sementit
5.  $\alpha$  : Ferrit
6.  $\alpha + \gamma$  : Östenit + Ferrit
7.  $\alpha + Fe_3C$  : Ferrit + Sementit

### 3.3. Çeliklerde Faz Dönüşümleri

#### 3.3.1. Sabit Sıcaklık Dönüşümü

İzotermal dönüşüm sabit sıcaklıkta meydana gelen faz dönüşümü demektir. Demir-sementit denge diyagramı, yalnız denge koşulları için geçerli olduğundan hızlı soğutulan çeliklerin incelenmesinde doğrudan kullanılmaz. Hızlı soğutulan çeliklerde ostenitin ne zaman dönüşüme başlayacağı, dönüşümün ne kadar süre sonunda tamamlanacağı ve sonuçta hangi ürünlerin oluşacağı hususları izotermal dönüşüm diyagramları yardımıyla belirlenir.

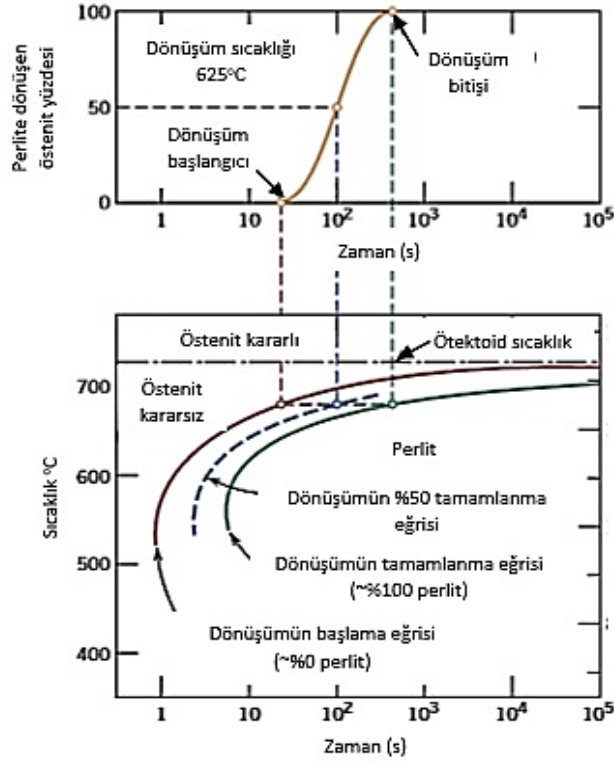
##### 3.3.1.1. Perlit Dönüşümü

723 °C derecenin üstünde östenit olan mikro yapı 723 °C'nin altında perlit adı verilen ferrit ve sementitten meydana gelen lamelli homojen bir mikro yapıdadır. Bu reaksiyona ötektik reaksiyon adı verilir.



Östenit tane sınırlarında ilk  $\alpha$  (alfa) veya  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Sementit) çekirdekleri meydana gelir. Çekirdeğin büyümesi sırasında ferrit oluşan bölgedeki karbon atomları sementit bölgesine doğru, sementit bölgedeki demir atomları da ferrit bölgesine doğru yayılması gerekir. Difüzyon için gerekli sıcaklık ve süre var ise, bir sıra sementit ve bir sıra ferritten oluşan perlit mikro yapısı meydana gelir.

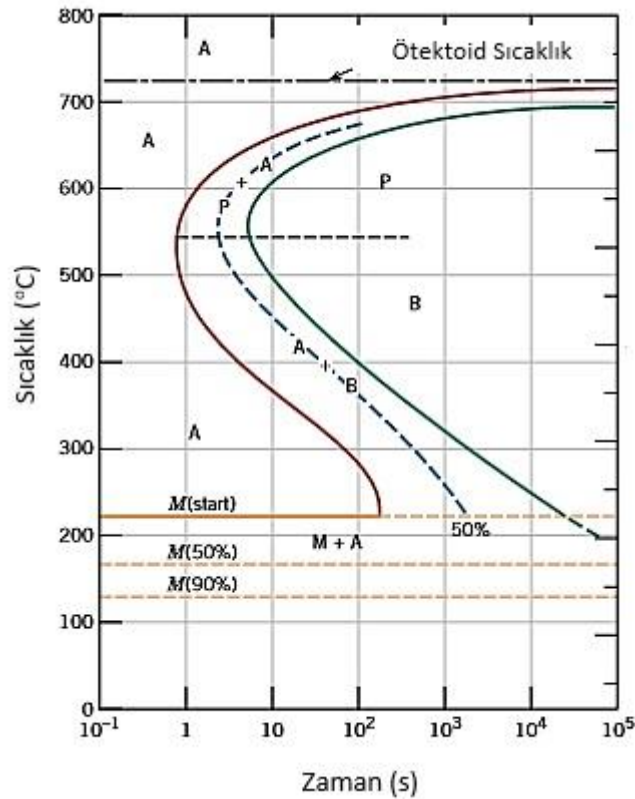
Östenitlenmiş çeliğin dönüşümünde ortam sıcaklığı, östenit- perlit dönüşüm süresi için çok önemlidir. Sıcaklığın etkisi şekil 3.2 de verilen grafikte gösterilmiştir. Eğrilerin her biri %100 östenit içeren bir sıcaklıktan ani olarak grafik üzerinde belirtilen sıcaklığa soğutulması ve bu sıcaklıkta sabit kalmasından sonra elde edilmiş verilerdir. Grafikte görüldüğü gibi sıcaklık düşükçe dönüşüm hızlanmaktadır. Sıcaklık arttıkça dönüşüm yapma isteği azalır, dönüşüm başlama zamanı ve uzar ve dönüşüm tamamlama süresi artar [21].



Şekil 3.2. Östenit-perlit dönüşümünü içeren izotermal dönüşüm diyagramı

### 3.3.1.2. Beynit Dönüşümü

Östenit fazının dönüşmesiyle oluşabilecek bir diğer mikro yapı beynittir. Şekil 3.2 de görüldüğü gibi perlit dönüşümü en hızlı 540 °C olmaktadır. Bu sıcaklığın altında demir atomları yayılmaz ve karbon atomları güçlükle yayılım gösterir. Mikro yapısı ferrit ve sementitten oluşan beynit ortalama 540 °C-225 °C lerde oluşmaktadır. Bu aralıkta nispeten daha yüksek sıcaklıkta oluşan beynitte sementit parçaları biraz daha kalın ve büyüktür ve bu yapıya üst beynit adı verilir. Düşük dönüşüm sıcaklıklarında düşük olan yayılma hızı nedeniyle sementitler çok büyük boyuttadır ve iğnemsî bir şekilde ferrit matrisi içerisine yayılmaktadır. Bu yapıya ise alt beynit adı verilmektedir. Beynit dönüşümü; Şekil 3.2. te gösterildiği gibi perlit dönüşüm grafiğinin eğrilerinin (Şekil 3.2) daha düşük sıcaklarda devam eden çizgileriyle gösterilmiştir [22].



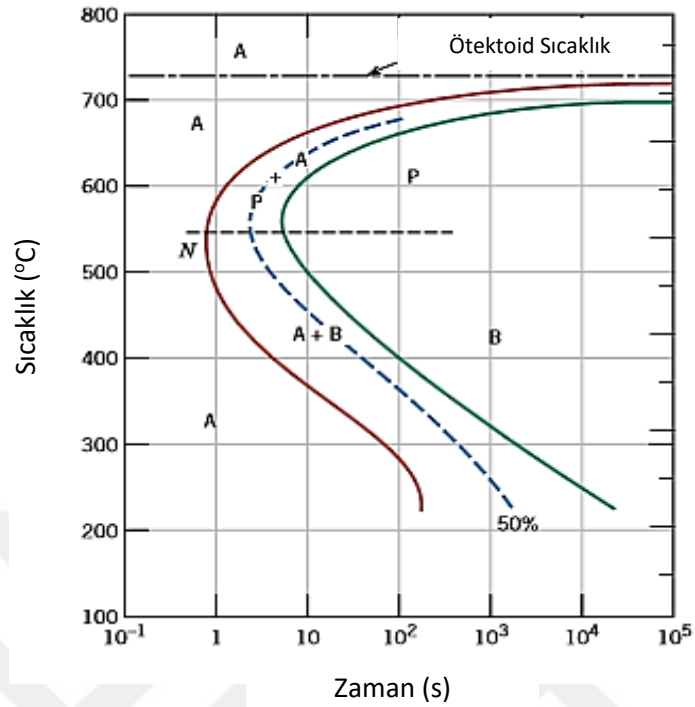
Şekil 3.3. Östenit-perlit ve östenit beynit reaksiyonlarını içeren izotermal dönüşüm diyagramı

### 3.3.1.3. Martenzit Dönüşümü

Östenit fazına, karbon atomlarının difüzyonuna izin vermeden hızlı soğutma yapılması durumunda martenzit adı verilen mikro yapı oluşur. Martenzitik dönüşüm difüzyonsuz olup, dönüşüm sırasında malzemenin kimyasal bileşiminde herhangi bir değişim meydana gelmez. Bu dönüşüm sırasında östenit fazı ikili kayma mekanizmasıyla aniden kafes yapısını HMK yapıdan HMT yapıya değiştirir.

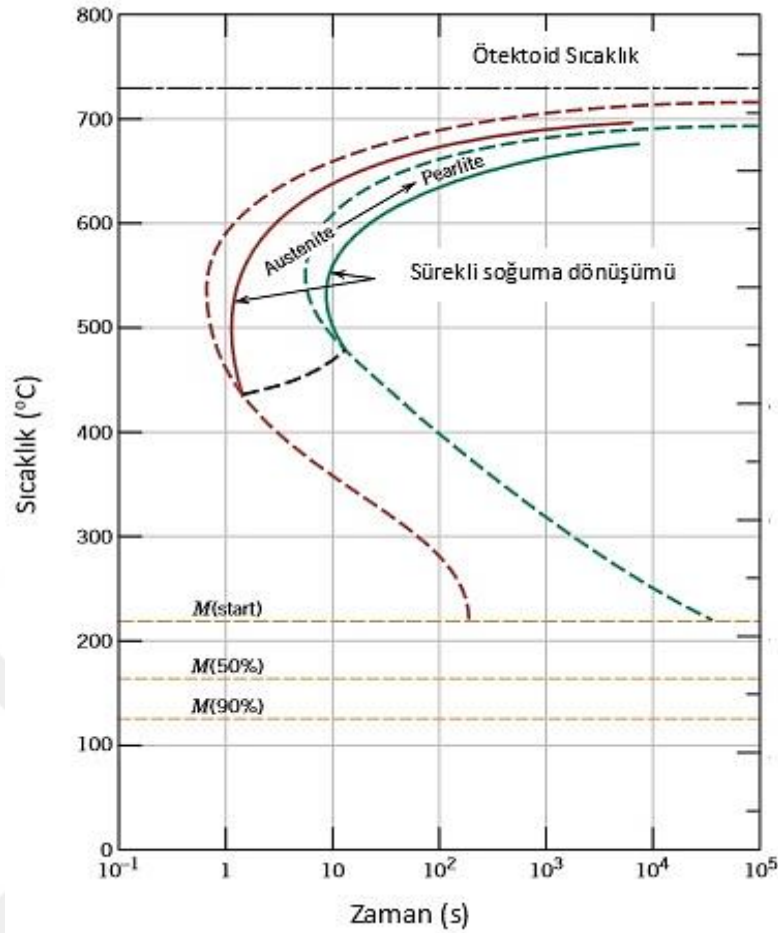
Martenzitik dönüşümde yayınma olmadığından martenzit taneleri östenit fazı içerisinde çok yüksek hızlarda çekirdeklenerek büyür. Bu nedenle söz konusu dönüşüm zamandan bağımsız olup, yalnız sıcaklığın azalmasına yani soğumaya bağlıdır. Dönüşüm başlangıcı; Şekil 3.3 te gösterilen M(başlangıç) ile temsil edilir. Grafikte bulunan M(50) ve M(90) çizgileri östenit martenzit dönüşüm oranını göstermektedir. Bu çizgilerin gösterdiği sıcaklıklar çeliklerin kimyasal bileşimine göre değişmektedir.

### 3.3. Sürekli Soğuma Dönüşümü



Şekil 3.4. Tam İzotermal Dönüşüm Diyagramı

Ötektoid üzerindeki alaşımı belli bir sıcaklığa soğutmak ve bu sıcaklıkta belirli bir süre tutmak oldukça zordur. Bu nedenle sabit sıcaklık dönüşümlerinin pratik olarak kontrol edilmesi son derece zordur. Isıl işlemler genel olarak numunelerin yüksek sıcaklıklara ısıtılıp daha sonra oda sıcaklığına kadar sürekli soğumasıyla gerçekleşir. Sürekli soğuma dönüşümlerinde sabit sıcaklık dönüşümlerinden farklı olarak Şekil 3.4 de görüldüğü gibi reaksiyonun başlaması veya tamamlanması için gerekli olan süre uzamaktadır.

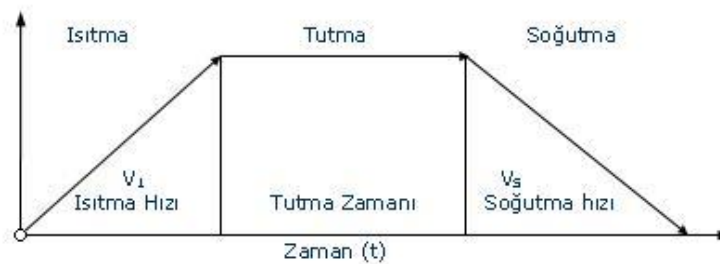


Şekil 3.5. İzotermal ve sürekli soğumada dönüşüm çizgilerinin birleştirilmiş durumu

Grafikte martenzitik dönüşümü temsil eden M(başlangıç), M(50) ve M(90) çizgileri sabit sıcaklık dönüşümleri ve sürekli soğuma dönüşümleri ile aynıdır [22].

### 3.4. Tavlama Isıl İşlemleri

Tavlama ısıl işlemi ile mikroyapının kararlı, denge durumuna yaklaşması sağlanır. Bu ısıl işlemde soğuma işlemi yavaş yapılır.



Şekil 3.6. Tavlama ısıl işleminin şematik gösterimi

### 3.4.1. Tam Tavlama

Tam tavlama ısıtılma işleminde genel olarak çeliğin mekanik özelliklerini iyileştirmek amaçlanır. Süneklik ve tokluğu artırarak malzemeyi yumuşatmak hedeflenir ve böylece malzeme endüstriyel olarak işlenmeye uygun hale getirilir. Buna ek olarak tam tavlama ısıtılma işleminde bir diğer amaç manyetik ve elektiriksel özellikleri iyileştirmektir.

Tam tavlama ısıtılma işleminde çelik östenit alanına kadar ısıtılır ve fırında yavaş soğuma uygulanarak kaba perlitik bir yapı meydana gelir. Tam tavlama sıcaklığı ötektoid altı ve üstü çelikler için değişmektedir. Sırasıyla bu çelikler için sıcaklıklar şu şekildedir;

1.  $Ac_3$  sıcaklığının 10-30°C üzerinde bir sıcaklık (ötektoid altı)
2.  $Ac_1$  sıcaklığının 10-30°C üzerinde bir sıcaklık (ötektoid üstü)

Tam tavlama ısıtılma işleminde alaşım elementi ilavesi oranına göre ısıtılma işlem süresi değişmektedir. Alaşımli çeliklerde alaşımısız çeliklere oranla düşük soğuma hızları kullanılır [24].

### 3.4.2. Küreselleştirme

Küreselleştirme ısıtılma işlemi çelikleri endüstriyel olarak işlenmeye en uygun şekilde yumuşatma işlemidir. Bu işlemi çelik malzemelerin sertliğini istenilen en minimum düzeye düşürmek olarak da tanımlayabilmek mümkündür. Küreselleştirme ısıtılma işleminin en yaygın uygulanma metodu  $Ac_1$  sıcaklığının altında bir sıcaklıkta belirli bir süre (uygulanan ısıtılma işlem süresi 5 saatten daha kısa olmamalı) ısıtılan numunenin fırında yavaş olarak soğutulmasıdır.

Bu ısıtılma işlem yönteminde sementit ağ yapılarının kırılarak küresel bir yapıya dönüştüğünü gözlemlemek mümkündür. Böylece malzeme daha sünek ve darbe tokluğu daha yüksek olur [53].

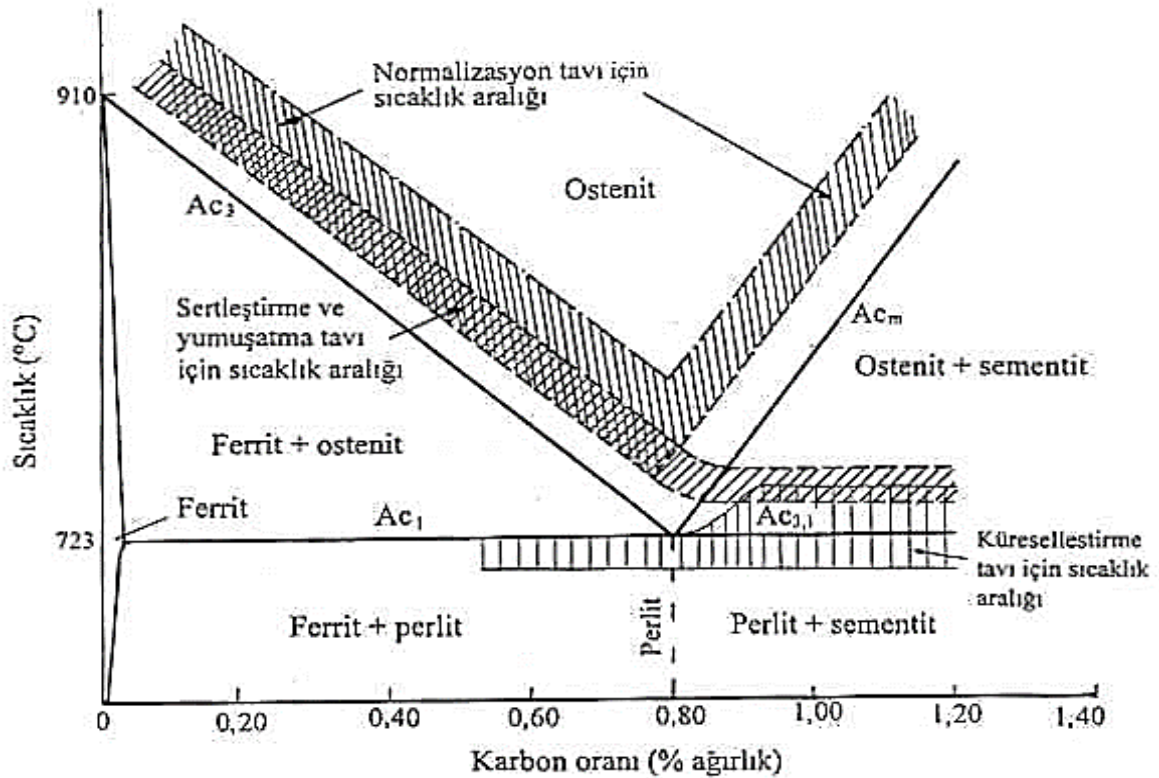
### 3.4.3. Normalizasyon

Normalizasyon ısıtılma işleminde soğuk şekil verme işlemleri ile döküm sonrası oluşan kaba taneli yapıyı gidererek üniform bir yapı elde etmek amaçlanmıştır. Normalizasyon ısıtılma işleminde malzeme östenit bölgesine kadar ısıtılır ve bu bölgede belirli bir süre tutulur ve sonra havada soğuma işlemi yapılır. Bu ısıtılma işlem türü küreselleştirme ısıtılma

işlem tavlama sıcaklığına benzemektedir. Ancak normalizasyon ısı işleminde küreselleştirme ısı işleminde havada soğuma yapılmaktadır. Bu soğuma türü nispeten daha hızlı gerçekleşmektedir. Normalizasyon ısı işleminde ötektoit altı ve ötektoit üstü çelikler için farklı sıcaklıklarda uygulanmaktadır [43].

1.  $A_{c3}$  sıcaklığının 30-50°C üzerinde bir sıcaklık (ötektoit altı)
2.  $A_{cm}$  sıcaklığının 30-50°C üzerinde bir sıcaklık (ötektoit üstü)

Normalizasyon ısı işleminde ötektoit altı çeliklerde küçük taneli, mekanik özellikleri iyileştirilmiş, düzgün dağılımlı ferritik+perlitik yapıda olmasını sağlar. Ötektoit üstü çeliklerde sürekli sementit ağını parçalar ve normalizasyondan sonra uygulanacak küreselleştirme işlemini kolaylaştırır. Bu ısı işlem çeliğin çekme ve akma dayanımı arttırmaktadır. Bu durumda kopma uzaması, kesit daralması ve darbe dayanımında düşüş oluşmaktadır [28].

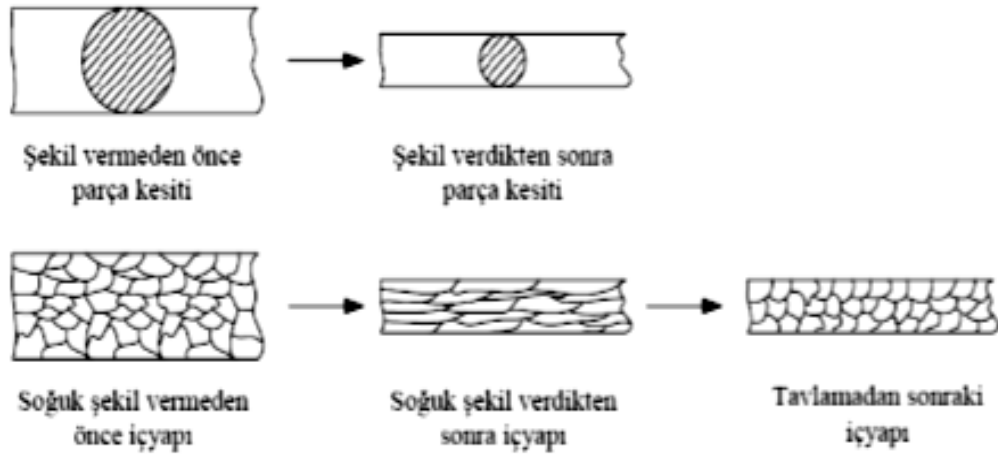


Şekil 3.7. Alaşımız çeliklere uygulanan yumuşatma, normalizasyon, küreselleştirme ve sertleştirme işlemleri için tavlama sıcaklık aralıkları

### 3.4.4. Yeniden Kristalleşme

Yeniden kristalleşme ısı işleminde malzeme üzerinde soğuk şekil verme işlemlerinin etkilerini ortadan kaldırarak işlenmeye daha elverişli bir hale gelmesi

amaçlanmaktadır. Yeniden kristalleşme ısı işlem tavlama malzemelerin kimyasal bileşimine göre değişse de genel olarak  $A_{c1}$  sıcaklığının altında  $600^{\circ}\text{C}$ - $700^{\circ}\text{C}$  sıcaklık aralığında uygulanmaktadır. Yeniden kristalleşme ısı işlem aşamaları sırasıyla toparlanma, tane oluşumu ve tane büyümesi olarak adlandırılmaktadır. Şekil 3.8'de yeniden kristalleşme ısı işlem mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Yeniden kristalleşme ısı işlem mekanizması

Yeniden kristalleşme ısı işlemi uygulanan malzeme soğuk şekil verme işlemlerinin etkilerine uğramadan önceki mekanik özelliklerine ulaşmaktadır. Soğuk şekil vermeden kaynaklanan ve işlenebilirliği zorlaştıran mekanik özellikler giderilerek daha sünek ve işlenmeye elverişli bir yapı elde edilir [42,46].

### 3.4.5. Gerilim Giderme

Metalik malzemelerde talaşlı işleme, şekil verme, döküm ve buna buna benzer birçok nedenden dolayı malzeme içerisinde gerilmeler oluşmaktadır. Oluşan bu gerilmeleri gidermek için gerilim giderme ısı işlemi uygulanmaktadır. Bu ısı işlem kritik altı tavlama olarak da adlandırılmaktadır. Bu ısı işlem uygulamaları malzemenin cinsine göre değişim gösterse de genel olarak  $A_{c1}$  sıcaklığının aşağısına ( $550$ - $570^{\circ}\text{C}$ ) ısıtılır, bütün kesitte uniform sıcaklık dağılımını elde edilene kadar bekletilir ve yeni bir iç gerilmeye neden olmamak için uniform ve yavaş bir şekilde oda sıcaklığına soğutulur.

### 3.4.6. Homojenleştirme (Difüzyon)

Homojenleştirme ısı işlemi uygulanarak malzeme içerisinde bulunan kimyasal kompozisyonların iç yapının her yerinde homojen olarak dağılması amaçlanır. Homojenleştirme ısı işlemi difüzyon hızının yüksek olduğu 1150-1250°C aralığında birkaç saat süre tutma ve yavaş soğutma ile gerçekleştirilir. Daha sonra malzemeye öncelikle yavaş ardından hızlı soğuma işlemleri uygulanmaktadır. Soğutma yüksek sıcaklıkta tutma süresinden sonra 850-800°C'e kadar 6-8 saat süre ile fırında soğutulup daha sonra hava ortamında soğutulabilirler. Bu işlem sonrasında tane büyümesi görülmektedir. Bu nedenle iri taneli yapıyı gidermek için normalizasyon işlemi uygulanmalıdır [22,24].

### 3.5. Sertleştirme Isıl İşlemleri

Sertleştirme ısı işlemleri ile malzemenin dayanımı ve sertliği en yüksek düzeye ulaşmaktadır. Ancak uygulanan bu işlem sonucunda süneklik son derece düşer. Ayrıca sertleştirme ısı işlemleri sonucunda malzemelerin soğuk şekil değiştirme özellikleri azalmaktadır [23].

#### 3.5.1. Su Verme

Çelik östenitleme sıcaklığındayken; havadaki soğuma hızından daha hızlı bir şekilde soğutulması işlemidir. Sertleşme kabiliyeti olan çeliklere martenzit veya bey nit oluşturmak için su verme işlemi yapılır.

Bir çeliğin sertleşme kabiliyeti; en büyük sertlik ve sertlik derinliği ile ifade edilir. Sertlik karbon oranına, sertlik derinliği ise alaşım elementlerine bağlıdır [44].

#### 3.5.2. Menevişleme(Temperleme)

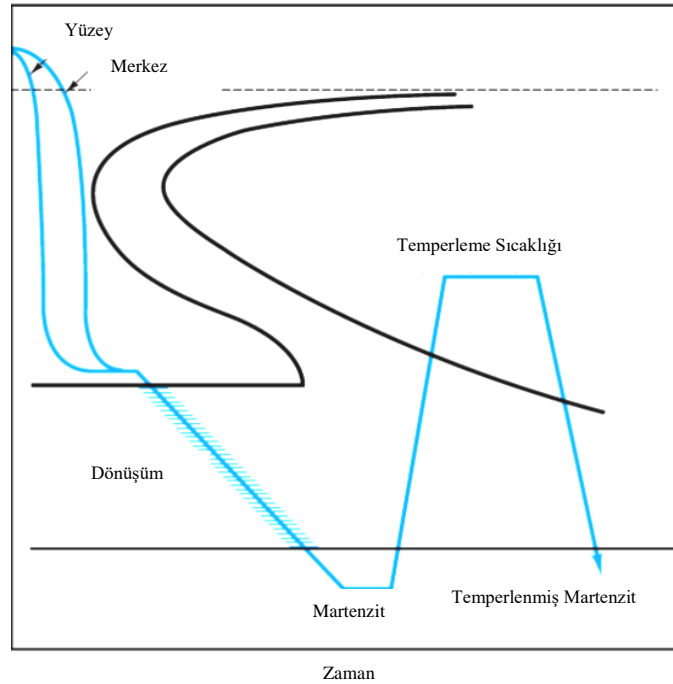
Temperleme sertleştirilmiş çeliğin süneklik ve darbe tokluğunu artırmak amacıyla  $A_{c1}$  alt kritik sıcaklığın aşağısında bir sıcaklığa ısıtılması ve ardından uygun hızda soğutulması olarak tanımlanan bir ısı işlem türüdür. Menevişleme genellikle 2 sıcaklık aralığında yapılır.

1. 300 °C ye kadar sıcaklıklarda yapılan düşük sıcaklık menevişlemesi
2. 500-700 °C ler arasında yapılan yüksek sıcaklık menevişlemesi

Menevişleme ısıl işleminin amacı; sertleştirme işlemi sonrası çeliğin iç yapısında bulunan kalıntı gerilmeleri yok etmektir. Buna ek olarak ve çeliğin süneklik değerini artırarak işlenmeye uygun hale getirmek amaçlanmaktadır. Su verilen çelikler menevişlendiklerinde süneklikleri artar, buna karşılık sertlik ve mukavemetleri azalır [22,45].

### 3.5.3. Martemperleme

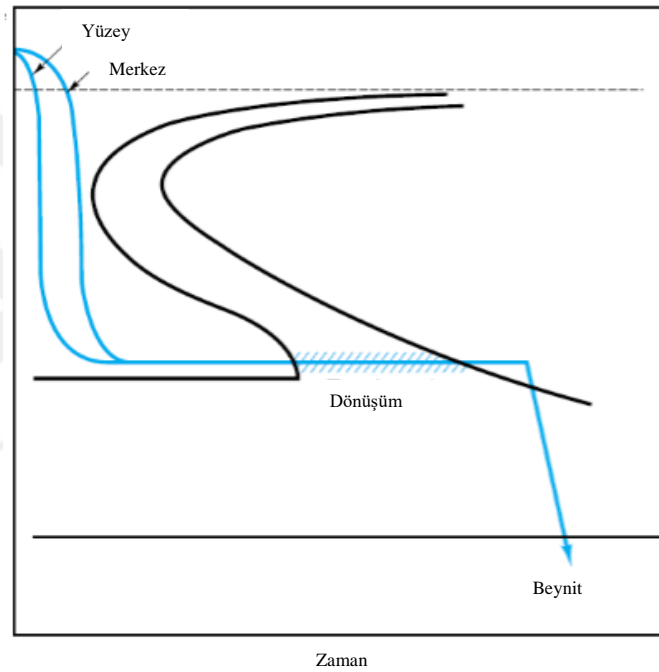
Sertleştirme ısıl işlemi sırasında oluşabilecek çatlama ve distorsiyonu yok etmek amacıyla martemperleme ısıl işlemi uygulanmaktadır. Özellikle yağda ve havada sertleşebilen çeliklere uygulanır Martemperleme işlemi bir sertleştirme işlemidir, temperleme değildir ve işlem sonrası temperleme yapılmalıdır. Gerilmeler büyük oranda azaltıldığı için temperleme öncesi zaman kritik değildir. Bu metotta parça çeliğin kritik soğuma hızından daha yüksek bir hızda Ms sıcaklığının biraz üzerindeki bir sıcaklığa (200°C-350°C) soğutulur ve daha yumuşak olan beynit oluşmayacak kadar bir süre beklendikten sonra parça havada ya da yağda soğutulur [21].



Şekil 3.9. Martemperleme ısıl işleminin şematik gösterimi

### 3.5.3. Ostemperleme

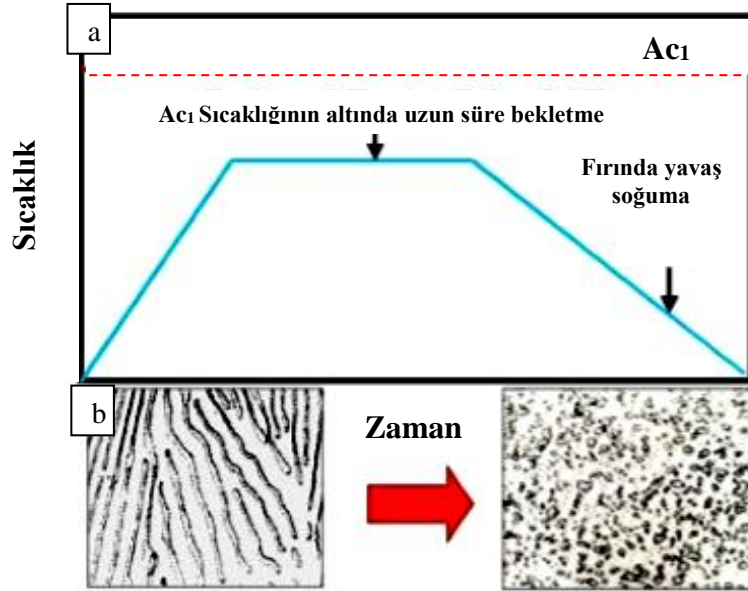
Ostemperleme ısı işlemleri daha çok düşük alaşım içeren çeliklere uygulanır. Yüksek alaşım içeren çeliklere uygulanmamasının nedeni, yüksek alaşım içeren çeliklerde dönüşüm tamamlanması çok uzun sürmektedir ve bu uzun süre ekonomik değildir. Ostemperleme ısı işleminde parça çeliğin kritik soğuma hızından daha yüksek bir hızda  $M_s$  sıcaklığının biraz üzerindeki bir sıcaklığa soğutulur ve ostenitin tamamı beynite dönüşümüne kadar beklenir ve havada soğutulur. Ostemperleme ısı işleminin sonra temperleme işlemi uygulanmasına gerek yoktur [25].



**Şekil 3.10.** Ostemperleme ısı işleminin şematik gösterimi

#### 4. KÜRESELLEŞTİRME ISIL İŞLEMİ

Küreselleştirme ısıl işlemi çeliğin  $Ac_1$  kritik sıcaklığının hemen üzerinde ya da hemen aşağısında uzun süre tutulması ve yavaş soğutulmasıdır. Bu işlem ile çelik mümkün olduğu kadar yumuşatılmış olur. Bu tavlama işlemi lamelli perlitin karbürlerini ve ikincil sementiti küre haline getirir. Küreselleştirme ısıl işleminin amacı işlenebilirliği ve soğuk şekil verilebilirliği artırmaktır. Örneğin yüksek karbonlu takım çeliklerinin işlenebilirliği küresel durumda çok iyidir. Küreselleştirilmiş mikroyapı ferritik matriste küresel sementit / karbürlerden oluşur. Şekil 4.1’de küreselleştirme ısıl işlem grafiğine ek olarak küreselleştirme ısıl işlemi öncesi ve sonrası mikroyapılar verilmiştir.



**Şekil 4.1.** Küreselleştirme ısıl işlemi a) Şematik gösterimi b) öncesi ve sonrası mikroyapılar

Şekil 4.1 incelendiğinde  $Ac_1$  sıcaklığının altında uzun süre ısıl işlem uygulanan malzemenin artan zamanla beraber perlitik yapıların parçalanarak küresel sementit oluşma eğiliminin arttığı görülmektedir.

Küreselleştirme işlemi üç farklı şekilde gerçekleştirilebilir;

1.  $A_{c1}$  sıcaklık çizgisinin aşağısında tutma; Çelik  $A_{c1}$  sıcaklığının hemen aşağısındaki bir sıcaklığa ısıtılır, bu sıcaklıkta küresel sementit oluşumu için yeter süre bekletilir (15-25 saat).
2.  $A_{c1}$  sıcaklık çizgisinin etrafında çevrim; Küreselleştirme  $A_{c1}$  kritik sıcaklığının üzerine ve aşağısına dar bir sıcaklık aralığında tekrarlı ısıtma ve soğutma ile yapılır.  $A_{c1}$ 'in üzerine ısıtma sementit ya da karbürleri çözmeye soğutma ise yeniden oluşturmaya çalışır. Bu tekrarlı işlem karbürleri küresel forma getirir.
3.  $A_{c1}$  sıcaklık çizgisinin üzerinde tutma; Bu metotta çelik  $A_{c1}$  kritik sıcaklığının biraz üzerine ısıtılır ve bu sıcaklıkta bekletilir sonra ya fırında soğutulur ya da  $A_{c1}$  kritik sıcaklığının hemen aşağısında uzunca bir süre tutulur [26].

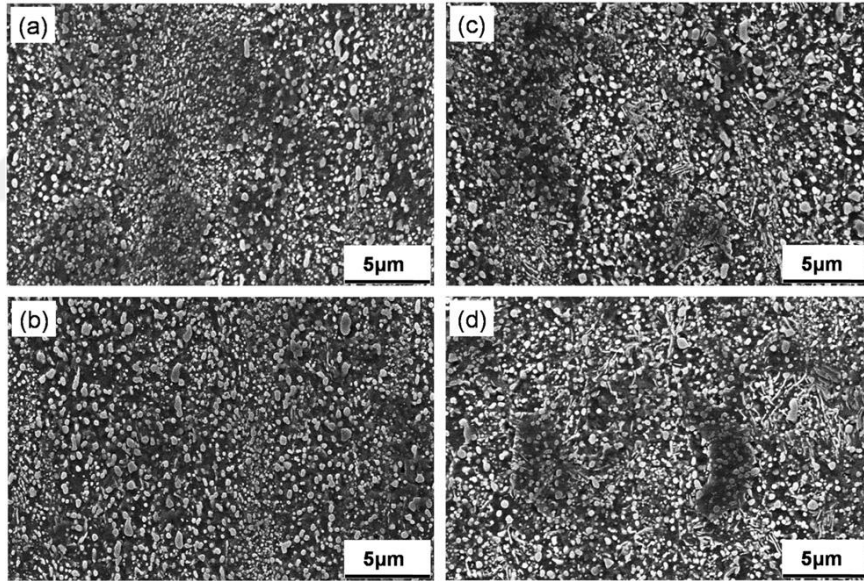
Küreselleşme oranı işlem öncesi yapıya bağlıdır. Orjinal yapıda daha ince karbür bulunması daha iyi küreselleştirme sağlar. Aynı şekilde ince perlit kaba perlitten, beynit ise ince perlitten daha iyi küreselleşme davranışı sergilemektedir. Soğuk işlem görmüş malzemenin de küreselleşmesi işlem sırasında sementitin kırılması ve daha üniform olarak dağıtılması ile küreselleşme işlemini kolaylaştıracaktır.

Küreselleştirme ısıl işlemi daha çok yüksek karbonlu çeliklere uygulanır. Sürekli sementit ağını parçalayarak işlenebilirliklerini sağlamaktadır. Düşük karbonlu çelikler çok nadiren küreselleştirme tavlmasına tabi tutulurlar. Küreselleştirme çok yumuşak bir yapı oluşturur ve bu da uzun ve sürekli talaşa neden olduğundan talaş kaldırmayı zorlaştırır. Orta karbonlu çelikler ise yeterli ölçüde süneklik kazanmaları için plastik şekil verme işleminden önce, bazen küreselleştirme tavlmasına tabi tutulurlar. Eğer çelik gereğinden uzun süre tavlınırsa sementit parçacıkları birleşerek uzama gösterirler ve bu durum çeliğin işleme kabiliyetini olumsuz etkiler [27].

## 5. LİTERATÜR TARAMASI

### 5.1. Küreselleştirme Isıl İşlemi Üzerine Yapılan Literatür Çalışmaları

Sun ve arkadaşları ultra ince taneli GCr15 çeliğinin perlitik dönüşüm mekanizmalarını araştırmışlardır. Ultra ince taneli çeliği, 873 K'da termo-mekanik işleme (sıcak haddeleme) hazırlamışlardır ve ardından 2 saat boyunca 923 K'de tavlamışlardır. Ultra ince taneli numunelerin farklı zamanlar boyunca 1073 K ve 1123 K'da (1.5, 2, 2.5, 3, 4, 5, 6, 7, 8 ve 9 dk) tekrar ısıtılması ve daha sonra havada soğutulması ile perlitik yapıların küreselleştiğini gözlemlemişlerdir. 1073 K de farklı zamanlarda yapılan ısıl işlemlerin SEM görüntüleri Şekil 4.1 de verilmiştir. Tanecik boyutunun ultra ince taneli çelikte karbon atomlarının difüzyon oranını artırarak perlitik dönüşüm üzerinde büyük bir etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir. Cr elementinin eklenmesinin bu perlitik faz dönüşüm kuralını değiştirmedğini belirlemişlerdir [29].

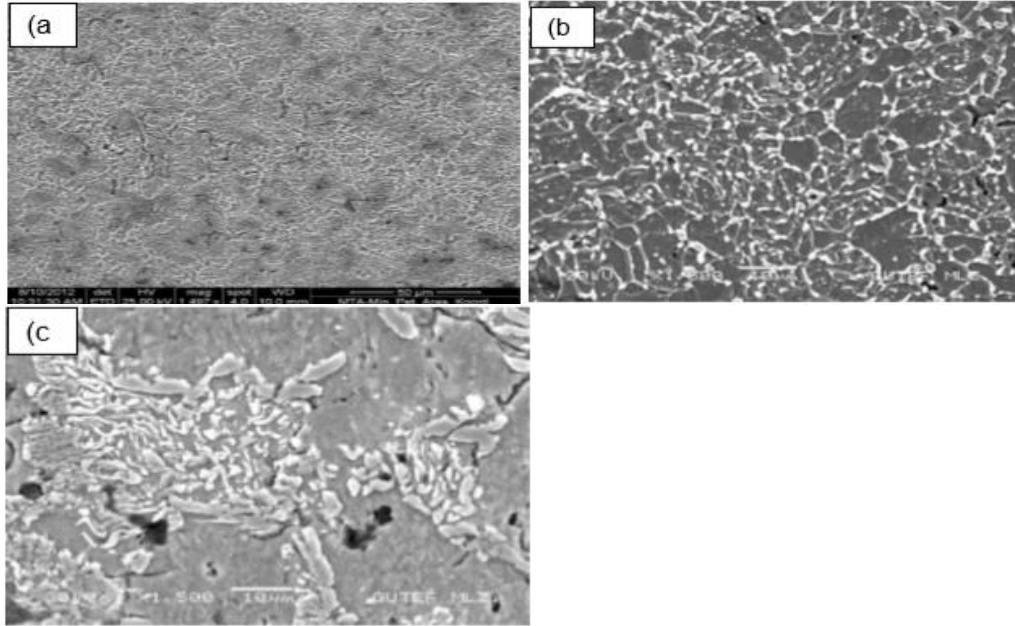


**Şekil 5.1.** Farklı zamanlarda 1073 K'da yeniden ısıtma yapıldıktan sonra numunelerin mikroyapıları  
a) 3 dak, (b) 5 dak, (c) 7 dak, (d) 9 dak.

Neri ve arkadaşları yüksek karbonlu ince şerit çeliğin endüstriyel işlenmesi sırasında sementit yapının küresel yapıya dönüşümü gözlemlemiştir. Soğuk haddelenmiş ve izotermal olarak tavllanmış çeliklerin numuneleri (AISI tip 1075 ve 1095) 20 ila 500 saat arasında değişen bir süre boyunca 560-680 ° C sıcaklık aralığında bir dizi izotermal tavlama işlemine tabi tutmuşlardır. Numunelerin yapıları, soğuk haddeleme için deforme olmuş bir ferritik matris içinde küreselleşmiş karbürler ve

altkritik tavlama deforme edilmemiş ferritte küreselleşmiş karbürler olarak elde edilmiştir. Grafitleşme oranının çeliğin tipine ve deformasyon derecesine bağlı olduğu bulunmuştur [30].

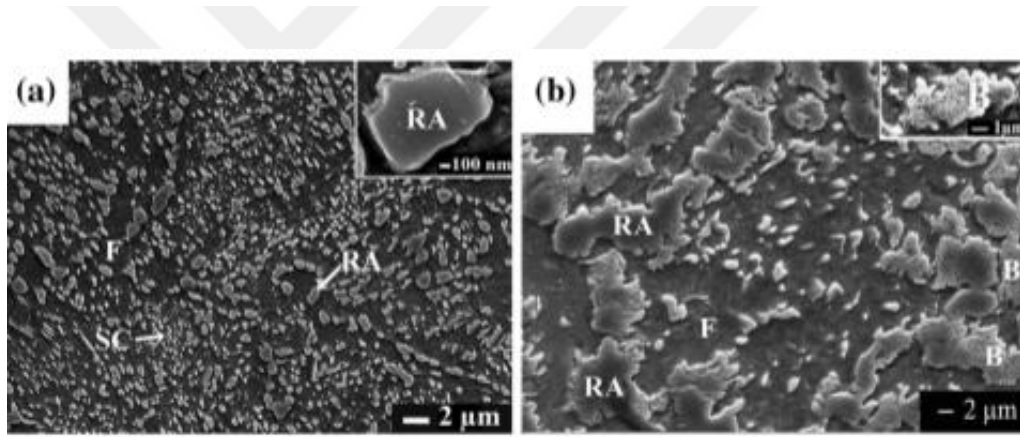
Onur ve arkadaşları yüksek karbonlu toz metal çeliklere iki farklı yöntemle küreselleştirme ısıl işlemleri uygulanmışlardır. İlk olarak, perlitik yapıdaki sementit fazlarının küreselleştirme işlemi  $Ac_1$  ötektoid sıcaklığının altında  $705\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 5 saat süreyle uygulanmışlardır. İkinci küreselleştirme yönteminde ise numuneler öncelikle  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 6 dk süreyle full östenitlendikten sonra martenzitik yapı sağlamak amacıyla su ortamında su vermişlerdir. Martenzitik yapı elde edilen numunelerde küresel sementit dağılımı sağlamak için, numuneler  $505\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $705\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 5 saat sürede ayrı ayrı tavllanmışlardır. Bu küreselleştirme işlemleri sonunda sertlik ve tokluk arasında doğrudan bir ilişki olmadığı, ancak tokluğun mikroyapıdaki sementit dağılımı ve morfolojisi ile daha ilişkili olduğunu anlamışlardır [31].



Şekil 5.2. (a) M-505, (b) M-705, (c) K-705 numunelerinin SEM mikroyapı görüntüleri

Cheng ve arkadaşları Kritik tavlama sıcaklığının  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $680\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $720\text{ }^{\circ}\text{C}$  ve  $745\text{ }^{\circ}\text{C}$  olarak değiştirilmesi ile SCM435 çeliğinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırmışlardır. Kritik tavllanmış örneklerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri analiz etmişlerdir. Alt kritik tavlama sıcaklığının  $660\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'den  $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye yükseltilmesiyle, küreselleşme oranı kademeli olarak artmış ve mekanik özellikler, şekillendirilebilirlik ve Vickers sertliği arttırılmıştır [32].

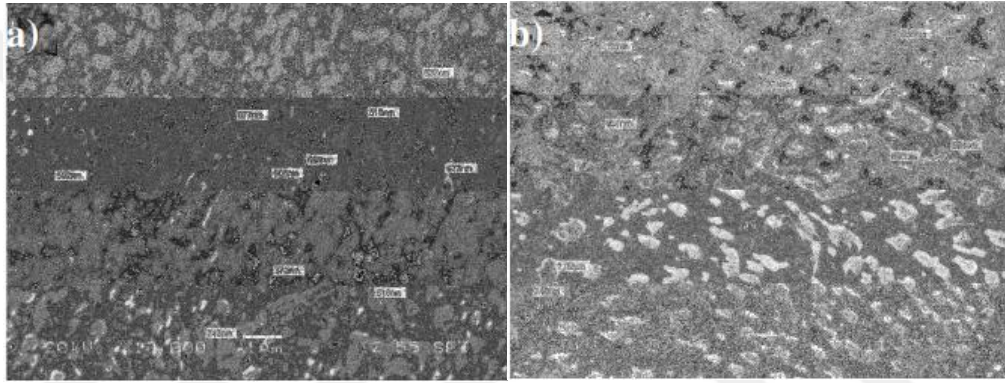
Monisa ve arkadaşları ısıl işleme yapılan mikroyapı değişiklikleriyle umut verici bir yüksek mukavemet ve süneklik kombinasyonu elde etmeye çalışmışlardır. Bir başlangıç ferrit perlit mikroyapısı elde etmek için yüksek karbonlu (ağırlıkça% 0.61) ve yüksek silisyum (ağırlıkça% 1.71) yay çeliğini (EN45) 900 ° C'de fırında östenitleştirmişler, ardından bir ilk ferrit perlit mikro yapısının elde edilmesi için fırının oda sıcaklığına soğutulması sağlamışlardır. Sonrasında numunelere % 10 oranında soğuk deformasyon uygulamışlar ve ardından 180 dakika boyunca Ac1'in hemen altındaki bir sıcaklıkta bekletmişlerdir. Daha sonra numuneleri, kısmi yeniden östenitizasyon için 10 ila 30 dakika arasında değişen farklı süreler için 770 ve 800 ° C arası sıcaklıklarda tuttuktan sonra 350 ° C'de tutulan bir tuz banyosuna bırakmışlar ve beynit dönüşümü için 10 dakika bekletmişlerdir. Kritik sıcaklık ve bekletme süresinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Daha beynitik dönüşümle birlikte, mukavemet önemli ölçüde artmıştır [33].



Şekil 5.3. Numunelerin SEM mikrografları 770 ° C'de (a) 10 dak (b) 20 dak

Zhang ve arkadaşları ultra yüksek karbonlu çelik üzerinde bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Numuneler 1150 °C'de 1 dakika boyunca full östenitlendikten sonra 700 °C sıcaklığa 20 °C / s hızında soğutmuşlardır. Bu işlemi takiben 700 °C sıcaklıkta %60 oranında deforme edilmiş ve 0.2 °C'lik bir oranda 550 °C'ye soğutulmasıyla, mükemmel küreselleştirilmiş yapı elde etmişlerdir. Bu çalışmada deformasyon sıcaklığı ne kadar düşüğe ve soğutma süresi ne kadar uzun olursa, küreselleşmiş yapının o kadar çok ve daha iyi elde edilebileceğini gözlemlemişlerdir.[34]

Şehmus ve arkadaşları orta karbonlu çeliğe farklı küreselleştirme ısıl işlemleri uygulamışlardır. Bu ısıl işlemler sonucunda mikroyapı farklılıkları ve sertlik değerlerini incelemiştirler. İlk olarak AISI 1050 malzemeye  $A_{c1}$  sıcaklığının altında  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 720 dakika klasik küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. İkinci olarak malzemeye  $850\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 15 dakika östenitleme işleminin ardından su verme işlemi uygulanmış ve daha sonra ayrı ayrı  $500$ ,  $600$  ve  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de 15 ve 60 dakika ile klasik küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Klasik küreselleştirme ısıl işleminin aksine su verme işleminde daha kısa zamanda küresel sementitlerin oluşumunu gerçekleştirmiştir. Küresel sementitlerin oranının artmasının sıcaklık değerine ve ısıl işlem süresine bağlı olduğunu gözlemlemiştirler. Sertlik değerlerinde ise bir düşüş görülmüştür.[35]

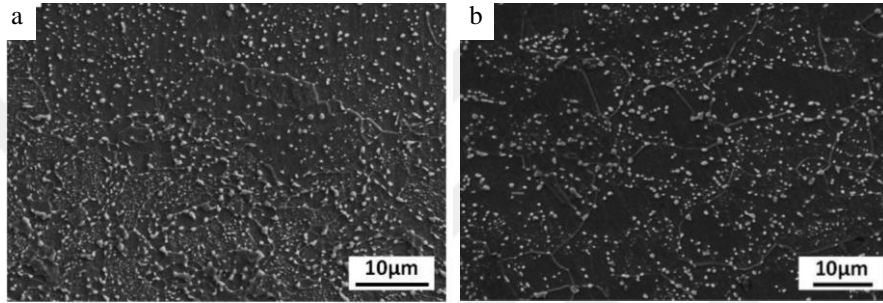


Şekil 5.4. Su verme sonrası  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de küreselleştirme işlemi yapılmış numunelerin SEM mikroyapıları (a) 15dk, (b) 60dk

Yaşar ve arkadaşları AISI/SAE 5140 kalite ıslah çeliğini  $870\text{ }^{\circ}\text{C}$  ye kadar ısıtmışlardır. Daha sonra tavlama ve su verme işlemleri uygulamışlardır. Su verme işlemi sonrası  $720 + 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ' da 2, 4, 8, 16, 24 saat süreyle küreselleştirme işlemi uygulamışlardır. Bu işlemler sonucu mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştirler. Yapılan incelemeler sonucunda su verme işlemi sonrası küreselleşme 2. saatte başlamaktadır ve 4. saatte tamamen yapı küresel forma ulaşmaktadır. Daha yüksek sürelerde yapının bozulma ya başladığı görülmektedir. Tavlama işlemi sonrasında küreselleşme 8. saatte başlamaktadır. En yüksek sertlik değerinin ve çekme mukavemetinin ısıl işlem görmemiş numune olduğunu gözlemlemiştirler [36].

Tao ve arkadaşları vakum indüksiyon eritme ile hazırlanan, 80 mm kalınlıkta plakalara dövülen ve sıcak haddeleme için tedarik edilen Cr mikro alaşımlı çelik ve Nb mikro alaşımlı çelik olarak adlandırılan iki orta karbonlu çelik kullanmışlardır. Bu çeliklere 2 saat boyunca  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de homojenleştirme ısıl işlemi uygulamışlardır.

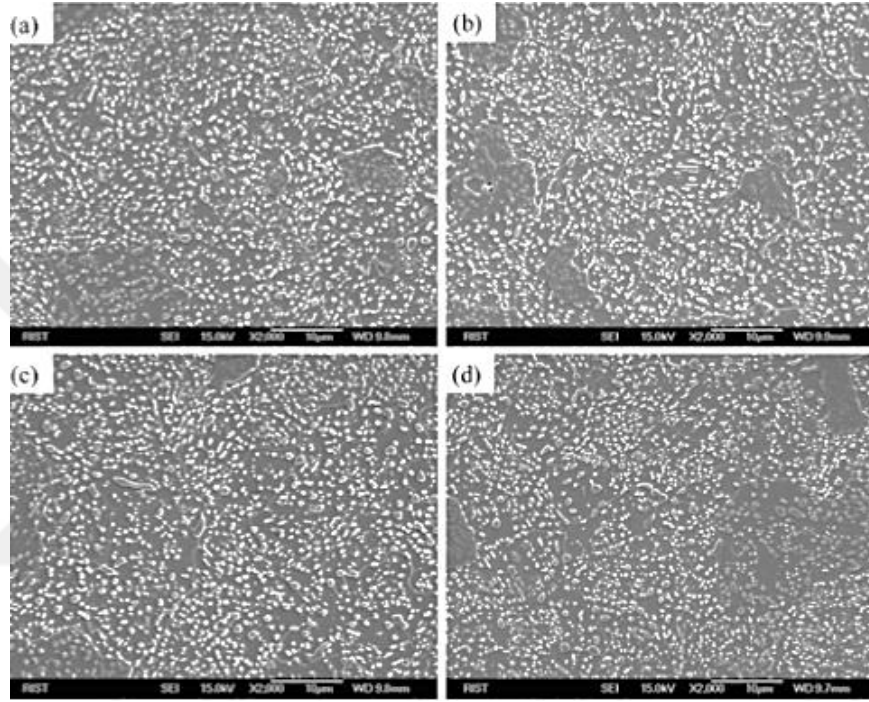
Homojenleştirmeden sonra, plakanın kalınlığını 8 mm'ye düşürmek için iki aşamalı bir sıcak haddeme yapmışlardır. Çelik plakayı son olarak 860°C de haddelenmiş ve daha sonra ilk ultra hızlı soğutma ve sonra yavaş hava soğutması kombinasyonu ile oda sıcaklığına soğutmuşlardır. Haddemeden sonra, küreselleştirme tavlamasını 680 ° C'de 0.5 ila 8 saat boyunca gerçekleştirmişlerdir. Cr mikro alaşımlı çelikte, Cr ve Mn'nin ikili bölünmesi ve sementit partikülünün yavaş büyüme davranışından dolayı, ferritin yeniden kristalleşmesininin engellendiğini gözlemlemişlerdir. Tersine, sementit partikülünün ve tamamen yeniden kristalize edilmiş ferritik matrisin düzgün bir şekilde dağılmasına yol açan hızlı bir küreselleşme davranışı, özellikle sıcak haddelenmiş beynit mikro yapısından dolayı Nb mikroalyaj çeliğinde gözlemlemişlerdir [37].



**Şekil 5.5.** Küreselleştirme ısıl işlemi sırasında mikroyapı oluşumunu gösteren SEM görüntüleri:a) Cr içeren mikroalyaj çeliği 8 saat b) Nb içeren mikroalyaj çeliği 8 saat

Guo ve arkadaşları 720 °C'de soğuk haddelenmiş 50CrV4 çeliğinin kritik altı küreselleşme ısıl işlemi üzerine bir inceleme yapmışlardır. Numunelere 720 °C'de küreselleştirme ısıl işlemi uygulamışlar ve ardından fırında dakikada yaklaşık 10 °C soğuma hızıyla oda sıcaklığına soğutmuşlardır. Isıl işlem süresi 2 ila 8 saat arasında değişmiştir, zamanla mikroyapı ve mekanik özellik değişikliklerini incelemişlerdir. Artan küreselleşme zamanına göre sementit plakaların çoğu nispeten küçük parçalara veya uzun dar şeritlere ayrıldığını ve mikro yapıda az miktarda sementit parçacıklarının oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Küreselleşme zamanının başlangıçta çeliğin sertliğini azalttığı ancak çeliğin sağlamlığı ve sertliği üzerinde 2 ila 8 saat arasında çok az etkisi olduğunu gözlemlemişlerdir [38].

Kwan-Ho ve arkadaşları yüksek karbonlu kromlu çeliklere silisyumun ilavesinin sementitin küreselleşmesine etkisini incelemişlerdir. Yüksek karbonlu kromlu çeliklere farklı oranlarda silisyum eklemişler ve farklı sıcaklıklarda küreselleşme davranışını gözlemlemişlerdir. Sonuçlar, yüksek karbonlu krom içerikli çeliklerde silisyum içeriğinin artmasının sementitin küreselleşme eğiliminin geciktirdiğini göstermiştir. Farklı silisyum oranlarına sahip çelik numunenin 830°C de 6 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanması sonrası mikroyapı görüntüleri Şekil 5.6 da verilmiştir [50].

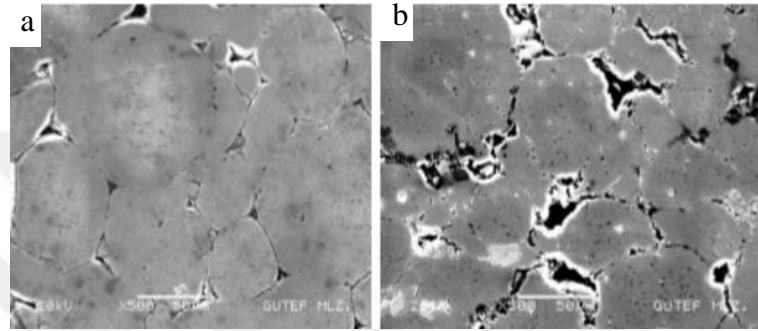


**Şekil 5.6.** 830 ° C'de 6 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanmış farklı Si oranlarına sahip çelik numunelerin SEM görüntüleri (a) 0.25Si, (b) 1.00Si, (c) 1.50Si ve (d) 2.00Si

Mustafa Çağrı yaptığı çalışmada; AISI 4140 çeliğine normalizasyon tavlaması, yumuşatma tavlaması ve sertleştirme tavlaması olmak üzere 3 farklı ısı işlem uygulamıştır. Bu ısı işlemler sonunda deney numunesinin mekanik özelliklerini incelemiştir. AISI 4140 çelik deney numunesinin çekme mukavemeti ve sertliği sertleştirme ve normalizasyon ısı işlemini sonrası arttığı, küreselleştirme ısı işlemi sonrası ise bu değerlerin azaldığını gözlemlemiştir [53].

## 5.2 Toz Metalurjisi Literatür Çalışmaları

Hakan ve arkadaşları, gaz atomizasyon yöntemi ile AA 2014 alaşımına ait tozları üretmişlerdir. Boyutu ortalama 90,66  $\mu\text{m}$  olan tozları 650MPa' da presleyerek, deney numunelerini üretmişlerdir. Preslenen numunelerin sinterleme sıcaklıklarını 550-620°C aralığında ve sırasıyla 1,2 ve 4 saat uygulamışlardır. Bu işlemler sonucunda, gözenek-yapı etkileşimini incelemişlerdir. Sinterleme sıcaklığının artmasıyla gözeneklerin arttığını gözlemlemişlerdir [39].



550°C ve 620°C sıcaklıklarda 4 saat sinterlenmiş numunelerin SEM görüntüleri a)550°Cb)620°C

Emre ve arkadaşları ham ve ön sinterlenmiş demir esaslı tozların mekanik geçme sonrası sinterleme işlemini incelemişlerdir. Deneylerde presleme basıncını olarak 600 MPa kullanılmışlar ve sinterleme işlemlerini 1120°C'de 45 dakika süre ile yapmışlardır. Sonuç olarak ham halde mekanik geçme yapılan parçaların sinterleme işlemi ile birleştirmede uygun oranda bağ dayanımı yaptığını gözlemlemişlerdir [40].

Yapılan bir başka çalışmada, toz metalürjisi (TM) yöntemiyle ile üretilen alaşımsız çeliklerin mikroyapı mekanik özelliklerini presleme basıncıyla olan ilişkisi araştırılmıştır. Numuneler 650, 700, 750, 800 ve 850 MPa presleme basıncılarında tek yönlü olarak preslenmiştir. Sonrasında numuneler 1200°C de 1 saat boyunca sinterlenmiştir. 750 MPa'da preslenen çeliklerin en yüksek akma ve çekme dayanımına sahip olduğu gözlenmiştir. Ancak presleme basıncının 850 MPa'ya artışı ile akma ve çekme dayanımı düşmüştür [41].

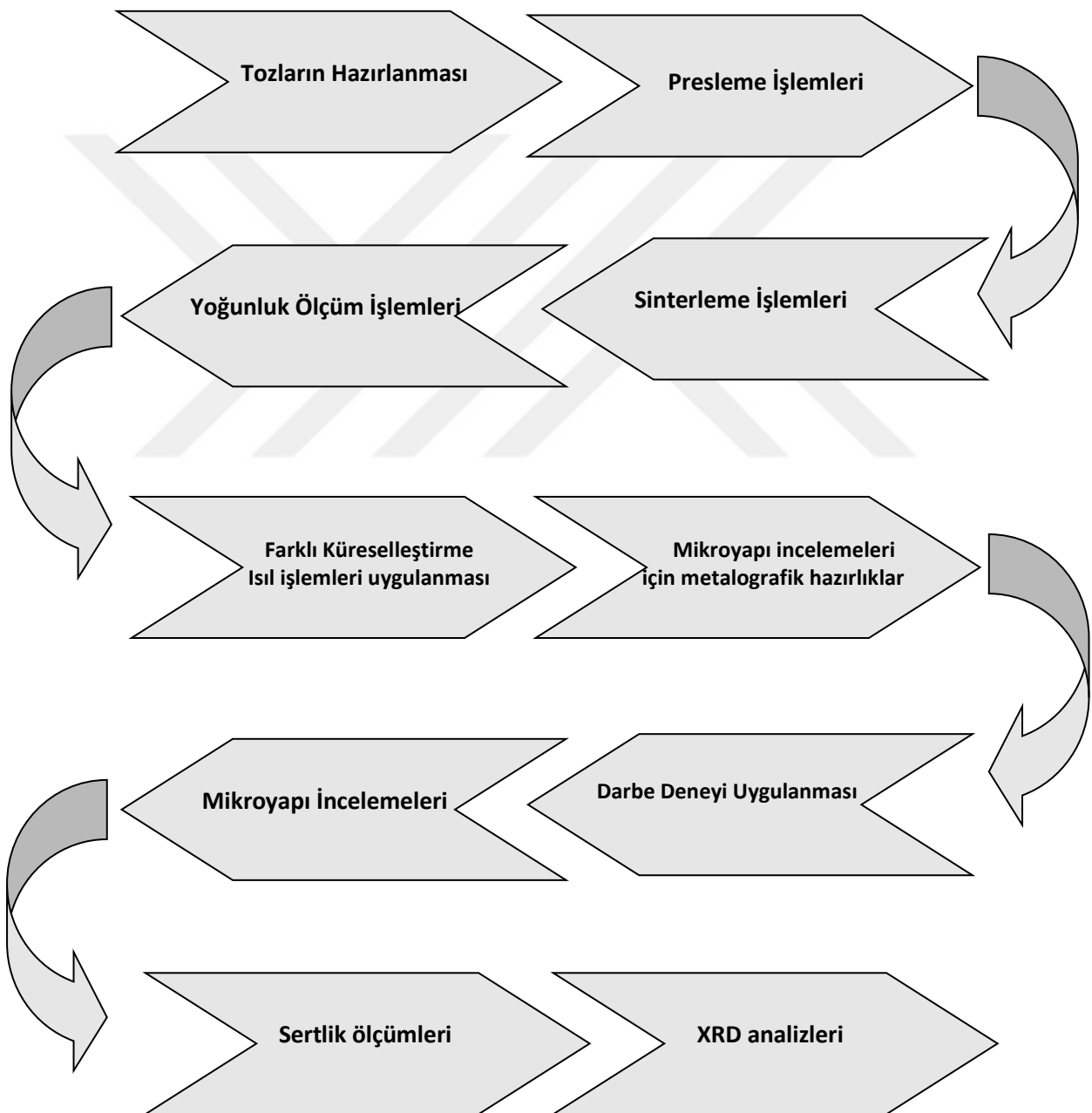
Wu ve arkadaşları yüksek mukavemetli toz metal çelikleri geliştirmek için, alaşım elementlerinin ve mikro yapının, darbe tokluğuna etkisini araştırmışlardır. İkili Fe-C alaşımlarının tokluğunun Mo ile azaldığını ve Ni ve Cr tarafından arttığını görmüşlerdir, ancak bu üç alaşım elementi gerilme mukavemetini arttırmıştır. Mo ayrıca, düşük tokluk perlit ve beynit oluşumuyla Fe – Ni – C alaşımlarının sağlamlığını da bozmuştur. Bununla birlikte, Fe – Ni-C alaşımlarına Cr ilavesi, tokluğa ödün vermeden çekme mukavemetini daha da arttırmıştır. Sonuç olarak, Fe – 1.5Cr – 0.2Mo – 4Ni – 0.5C çelik gibi, çekme dayanımı ve darbe dayanımının üstün bir kombinasyonu elde edilebilir [51].

Mehmet Akif yaptığı çalışmada toz metalurjisi yöntemi kullanarak farklı oranlarda titanyum, vanadyum, Ti-V, Nb-Al içeren mikro alaşım çelikleri üretmiş ve bu çeliklerin mikroyapı ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Üretilen numuneler göz önüne alındığında alaşım miktarının artmasıyla mukavemetin iyileştiği görülmektedir. Buna ek olarak bu alaşım elementlerinin ilavesi numunenin mekanik özelliklerine olumlu katkı sağlamıştır [52].

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

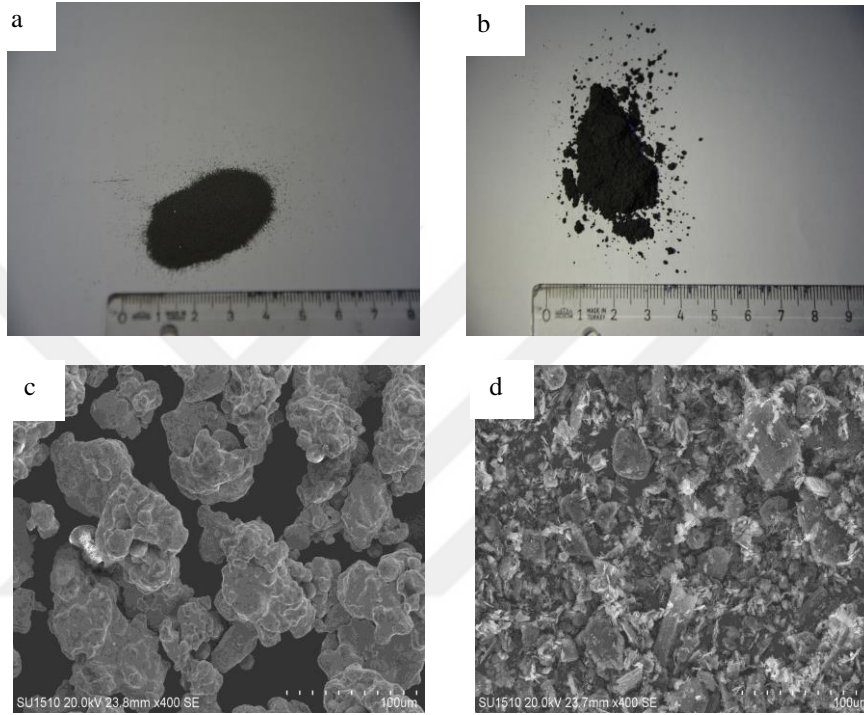
Yapılan çalışmada; toz metalürjisi yöntemi ile üretilen yüksek karbonlu çelik malzemeye farklı ısıl işlem metotları uygulanmıştır. Bu ısıl işlemler sonucunda küresel sementit yapısının oluşumu incelenmiştir. Gerçekleştiren deneysel çalışmalar sırasıyla Çizelge 6.1 de verilmiştir.

**Çizelge 6.1.** Uygulanan deneysel çalışmaların şematik gösterimi



## 6.1. Tozların Hazırlanması

Deneysel çalışmalar için, gaz atomizasyon yöntemiyle üretilmiş Höganäs firmasından temin edilen ABC.100.30 marka %99.9 saflıkta Fe tozlarına ağırlıkça Alfa Aesar firmasından temin edilen %1,2 grafit tozu eklenmiştir. Şekil 6.1’de kullanılan tozların SEM görüntülerine ek olarak tozların dağılım görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 6.1.** Deneysel çalışmalarda kullanılan tozlar; a) Fe Tozu b) Grafit tozu c) Fe tozu SEM görüntüsü d) Grafit tozu SEM görüntüsü

Tozların parçacık boyut analizleri; Necmettin Erbakan Üniversitesi Merkez BİTAM Laboratuvarında bulunan Cilas-1190 marka particle sizer cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan cihaz Şekil 6.2 te gösterilmiştir.



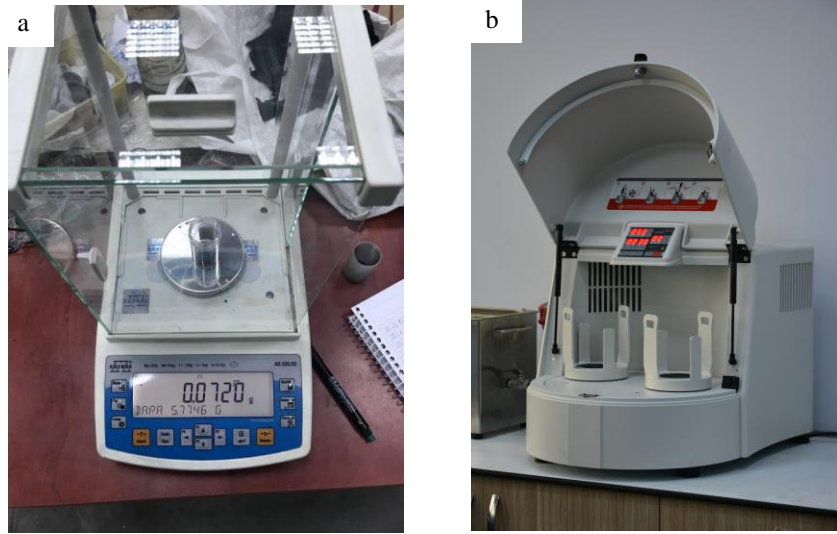
Şekil 6.2. Cilas-1190 marka particle sizer

Toz ağırlıkları numuneler için sırasıyla şu şekilde hesaplanmıştır;

- Mikroyapı (silindirik) numuneleri; 6,00 gr Fe tozu + 0,0720 gr grafit tozu
- Darbe numuneleri; 22,5230 gr Fe tozu + 0,2702 gr grafit tozu

Bu tozlar Necmettin Erbakan Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan  $1 \times 10^{-4}$  hassasiyetli elektronik terazide tartılmıştır. Kullanılan terazi Şekil 6.3'de gösterilmiştir.

Ağırlıkları ölçülen tozların homojen olarak karışması için; Necmettin Erbakan Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan ve Şekil 6.3'de gösterilen Fritsch Pulverisette 5 marka gezegen tipi karıştırıcıda bilyesiz olarak 50 rpm hızda 30 dk boyunca karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir.



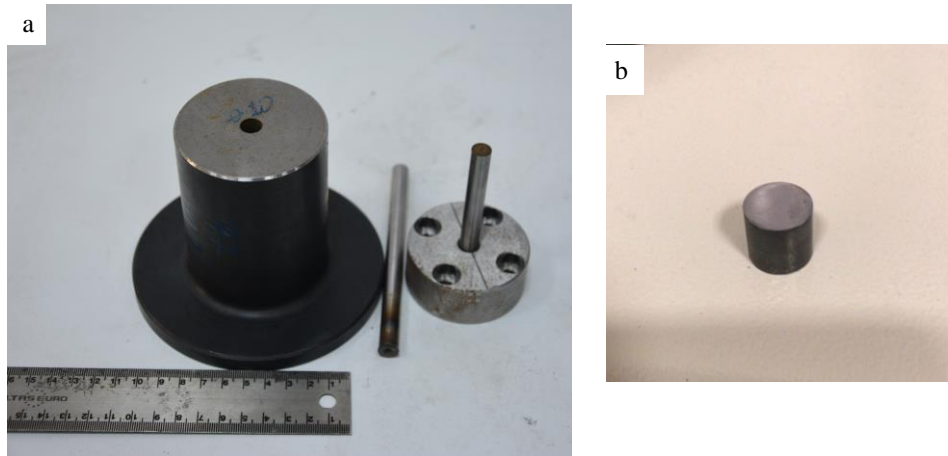
Şekil 6.3. Tozların karıştırılması; a) Hassas terazi b) Fritsch Pulverisette 5 marka gezegen tipi karıştırıcı

## 6.2. Presleme İşlemi

Ağırlıkları ölçülen ve karıştırma işlemi tamamlanan tozlar; mikroyapı (silindirik) numunelerini elde etmek için, Şekil 6.4'de gösterilen Necmettin Erbakan Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan MSE marka 25 ton çift etkili pres cihazı kullanılmıştır. Presleme işlemi; ön denemeler neticesinde farklı basınçlarda test edilmiştir ve optimum presleme basıncı 850 MPa olarak belirlenmiştir. Mikroyapı (silindirik) numuneleri için presleme işlemi Şekil 6.5'de gösterilen 10 mm çapa sahip kalıp ile gerçekleştirilmiştir. Kalıp içerisine yerleştirilen tozlar 850 MPa basınç altında 30 sn bekletilerek presleme işlemi yapılmıştır.



Şekil 6.4. MSE marka çift etkili pres cihazı

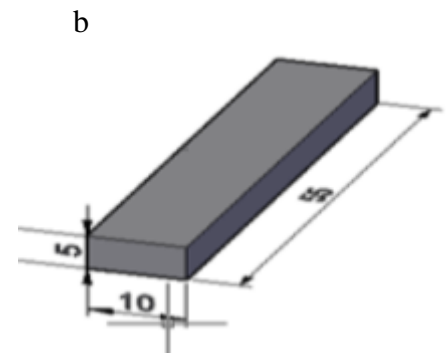
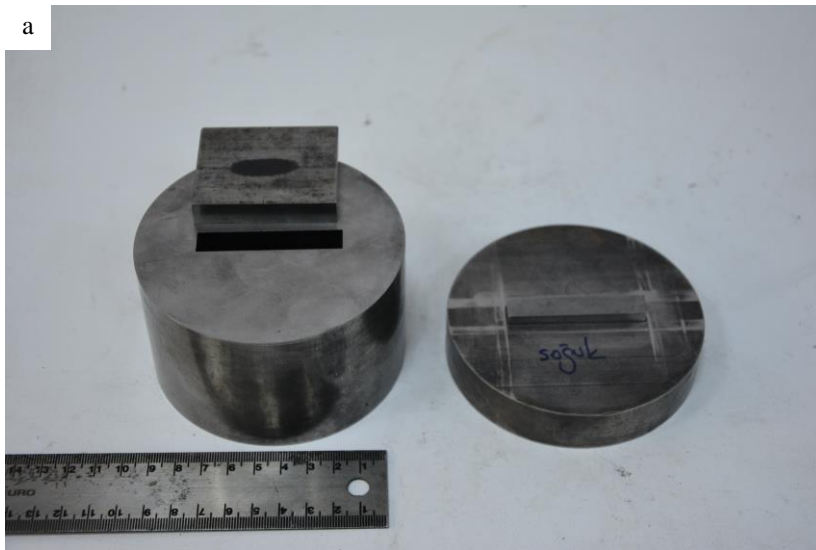


Şekil 6.5. Mikroyapı (silindirik) numuneleri için;  
a) Presleme kalıbı b) Mikroyapı (silindirik) numune

Darbe numunelerini elde etmek için Şekil 6.6’da gösterilen Necmettin Erbakan Üniversitesi Malzeme Laboratuvarında bulunan Hürsan marka 100 ton çift etkili pres cihazı kullanılmıştır. Presleme işlemi Şekil 6.7’de gösterilen kalıp ile gerçekleştirilmiştir. Darbe numuneleri ASTM E23 standartlarına uygun olarak hazırlanmıştır. Darbe numuneleri boyutları prizmatik şekilde, 5x10x55 mm olarak deneysel çalışmalarda kullanılmıştır.



Şekil 6.6. Hürsan marka çift etkili pres cihazı



Şekil 6.7. Darbe numuneleri için;  
a) Presleme kalıbı b) ASTM E23 standardına uygun deney numunesi

### 6.3. Sinterleme İşlemi

Presleme işlemini takiben, Şekil 6.8’de gösterilen Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Malzeme Laboratuvarında bulunan, Nevola marka atmosfer kontrollü tüp fırın kullanılarak sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir.

Sinterleme işleminde amaç; preslenmiş olan toz partikülleri arasında difüzyon bağı oluşturmak ve gözenekliliği azaltmaktır. Ayrıca sinterleme işlemi esnasında %99.99 saflıkta Argon gazı kullanılmıştır. Bunun nedeni numunelerin oksitlenmesine karşı koruyucu atmosfer tabakası oluşturmaktır.

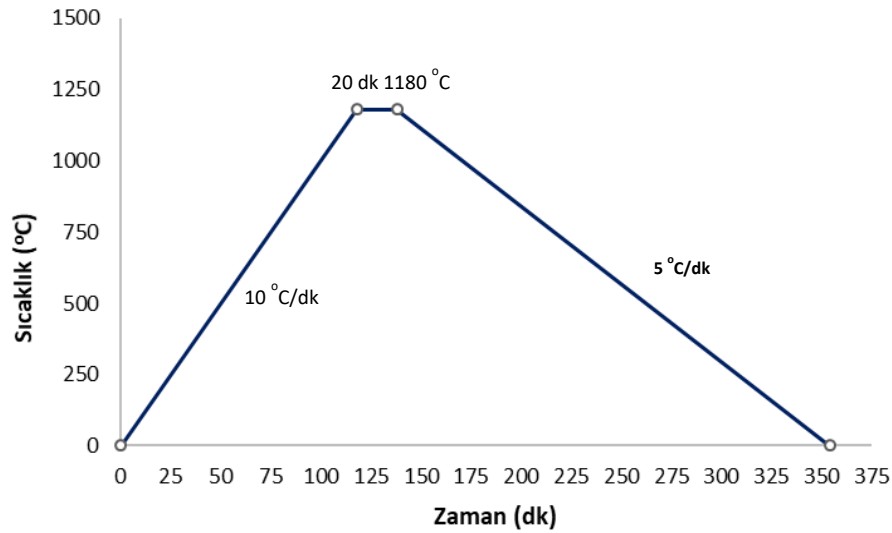
Sinterleme işlemi cam tüp içerisinde homojen sıcaklık bölgesinde 1180°C de 20 dk bekleyerek gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemleri öncesi numunelerin yerleştirileceği sinterleme bölgesi belirlenmiştir. Quartz tüpün 41,5 cm ve +5,-5 cm ilerisinde de homojen sıcaklık bölgesi olduğu belirlenmiştir. Numuneler homojen sıcaklık bölgesinde seramik kayıkçık üzerinde sinterlenmiştir.



Şekil 6.8. Atmosfer kontrollü sinterleme fırını

Sinterleme işlemi programı 1180°C ye kadar 10 °C dk<sup>-1</sup> ısıtma hızı, 1180°C de 20 dk bekleme ve 5 dk<sup>-1</sup> soğutma hızı olarak belirlenmiştir. Mikroyapı (silindirik) ve darbe numuneleri için sinterleme işlemleri bu program kullanılarak yapılmıştır. Sinterleme ısıtma işlem grafiği Çizelge 6.2’de gösterilmiştir.

**Çizelge 6.2.** Deney numunelerinin sinterleme grafiği



Sinterleme işlemi sırasıyla şu şekilde yapılmıştır;

- Oda sıcaklığında numuneler daha önceden tespit edilen homojen sıcaklık bölgesine yerleştirildi.
- Sonra quartz tüpün ön ve arka kısmı Ar gazının giriş ve çıkışına izin verilecek şekilde grafik kapaklarla kapatıldı.
- Quartz tüp temas ile eden kapakların bağlantıları yapılarak kontrol edildi ve sızdırmazlık sağlandığından emin olundu.
- Sinterleme programı daha önceden belirlenen şekilde hazırlandı ve gaz akışı sağlandıktan sonra program çalıştırıldı.
- Sinterleme işlemi tamamlanan numuneler fırın soğuduktan sonra fırından çıkarıldı.
- Fırında soğuma işlemi sırasında gaz akışı ve yalıtım devam etmiştir.

#### 6.4. Yoğunluk Ölçüm İşlemleri

Presleme ve sinterleme işlemini takiben numunelere yoğunluk ölçümü yapılmıştır. Yoğunluk ölçüm işlemleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan Micromeritics-AccuPyc II 1340 marka piknometre cihazı ile yapılmıştır. Kullanılan piknometre cihazı Şekil 6.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 6.9.** Micromeritics-AccuPyc II 1340 marka piknometre cihazı

Presleme işlemi sonrasında numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. Yoğunlukları belirlenen numunelere daha sonra sinterleme ısıl işlemi yapılmış ve sinterleme işlemi takiben numunelerin yoğunlukları tekrar ölçülmüştür. Bu şekilde sinterleme öncesi ve sonrası yoğunluk değerleri karşılaştırılmıştır.

### **6.5. Uygulanan Isıl İşlemler**

Sinterleme işlemi ve yoğunluk ölçümleri tamamlanan numunelere sırasıyla 3 farklı ısıl işlem metodu uygulanmıştır. Isıl işlemler Şekil 6.8 de gösterilen Nevola marka atmosfer kontrollü tüp fırın kullanılarak yapılmıştır. Tüp fırın içerisinde sinterleme işleminde olduğu gibi oksitlenmeyi önlemek amacıyla %99,99 saflıkta Argon gazı akışı sağlanmıştır. Uygulanan ısıl işlem metotları sırasıyla;

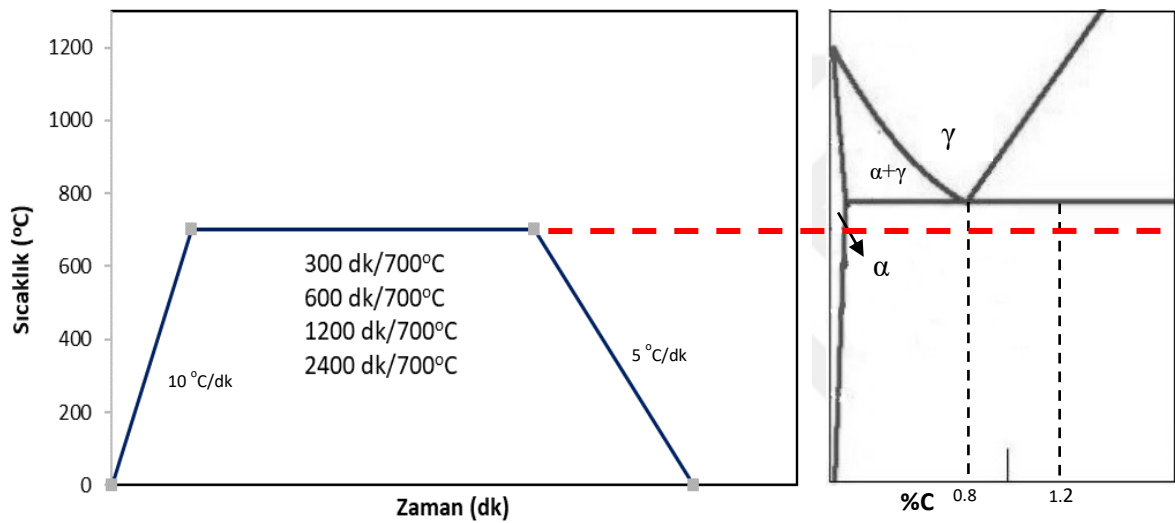
- Klasik küreselleştirme
- Salınlı küreselleştirme
- Su verme sonrası küreselleştirme

olarak belirlenmiştir.

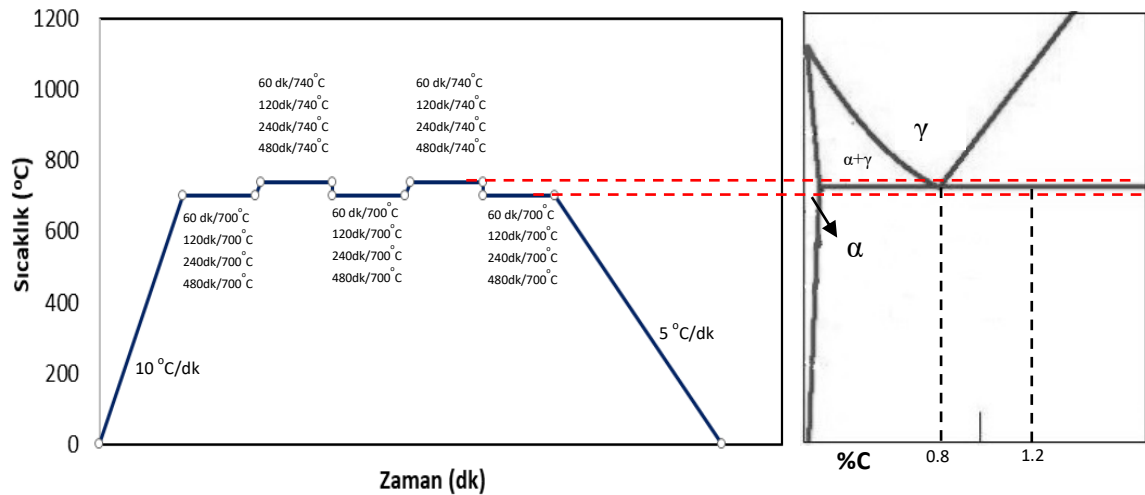
İlk olarak uygulanan klasik küreselleştirme ısıl işlemi; Demir-Karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında bulunan Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında olan 700 °C sıcaklıkta, 5-10-20-40 saat olarak uygulanmıştır. Klasik küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan numuneler KK olarak kodlanmıştır. Bu ısıl işlem metodunun şeması Çizelge 6.3'de gösterilmiştir.

Uygulanan salınımlı küreselleştirme ısıl işleminde ise, Demir-Karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında bulunan Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında ve üstünde (700 °C ve 740°C) 5-10-20-40 saat salınımlı olarak uygulanmıştır. Salınımlı küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan numuneler SK olarak kodlanmıştır. Bu ısıl işlem metodunun şeması Çizelge 6.4’de gösterilmiştir. Salınımlı küreselleştirme ısıl işlemi sırasında ısıl işlem fırını 5 aşamalı olarak programlanmıştır. Her kademede toplam sürenin 1/5’ i kadar bekletilmiştir.

Çizelge 6.3. Klasik küreselleştirme ısıl işlem grafiği



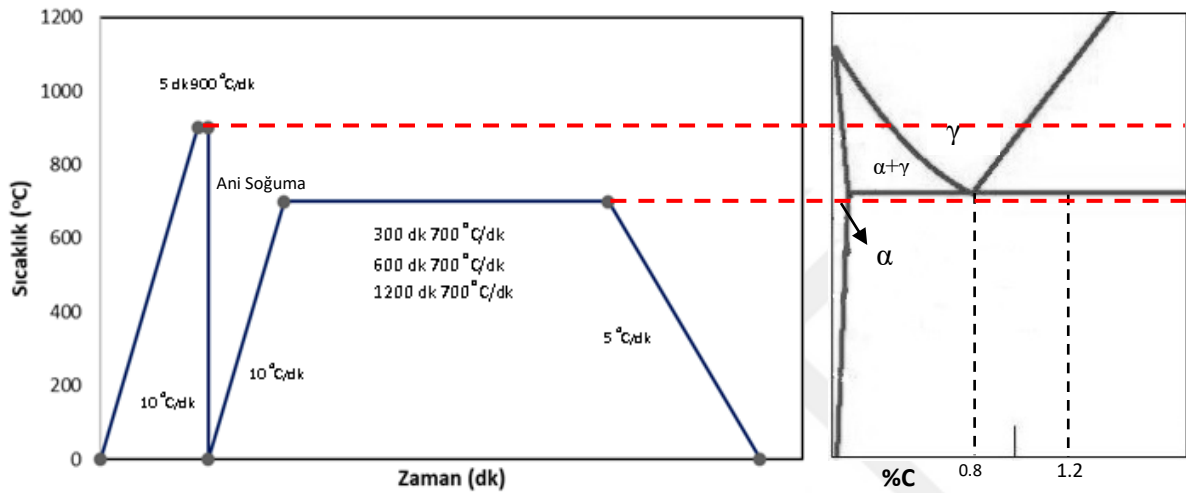
Çizelge 6.4. Salınımlı küreselleştirme ısıl işlem grafiği



Son olarak endüstriyel uygulamaların dışında, numunelere su verme işlemini takiben küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu ısıl işlemde numuneler 900 °C

sıcaklıkta 5 dk bekletilmiştir. Tamamen östenit yapı sağlandıktan sonra suda su verme işlemi uygulanarak martenzit bir yapı elde edilmiştir. Bu işlem sonrasında demir-karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında bulunan Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında 700 °C sıcaklıkta 5-10-20 saat olarak küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Martenzit sonrası ısıl işlem uygulanan numuneler MSK olarak kodlanmıştır. Bu ısıl işlem metodunun şeması Çizelge 6.5’de gösterilmiştir.

Çizelge 6.5. Martenzit üretim sonrası küreselleştirme ısıl işlem grafiği



## 6.6. Metalografik İncelemeler

Isıl işlemler öncesi ve sonrası numunelerin mikroyapı analizleri için, silindirik numuneler üzerinde metalografik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Numunelerin metalografik çalışmaları Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalürji Laboratuvarında bulunan Şekil.6.10’da gösterilen Hardway marka MT 2 serisi çift diskli zımparalama ve parlatma cihazında yapılmıştır. 600-800-1200 numaralı zımparalar sırası ile kullanılarak su altında zımparalama işlemi yapılmıştır. Zımparalama işlemi takiben parlatma cihazında, 3µm boyutunda parlatma keçesi kullanılarak, elmas solüsyon yardımıyla numune yüzeyleri parlatılmıştır. Son olarak %4’lük nital çözeltisi hazırlanarak, numune yüzeyleri 4-15 sn arasında dağlanmıştır. Dağlama işleminden sonra numune yüzeylerinden dağlayıcı çözeltiyi uzaklaştırmak için numuneler su ile temizlenmiştir. Ardından numuneler alkol ile kurutulmuş ve mikroyapı analizleri için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 6.10. Hardway marka MT 2 serisi çift diskli zımparalama ve parlatma cihazı

### 6.7. Darbe Deneyi

ASTM E23 standartlarına göre 5x10x55 boyutlarında prizmatik olarak hazırlanan numunelerin darbe testleri, Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalürji Laboratuvarında bulunan Şekil 6.11 de gösterilen Hardway marka JB serisi darbe test cihazında yapılmıştır. Darbe testleri için her ısıl işlem metodundan 3 er adet numune kullanılmakla birlikte, sinterleme sonrası ve martenzit sonrası referans numuneleri için de 3 er adet numune kullanılmıştır. Darbe deneyleri her numune için oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Darbe test numunelerini kırmak için 150 J kapasiteli çekiç kullanılmıştır. Tüm numuneler için deney şartları aynıdır. Deneysel sonuçlardan elde edilen veriler, 3 numune için ortalaması değer alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 6.11. Hardway marka JB serisi darbe test cihazı

## 6.8. Numunelerin Mikroyapı İncelemeleri

Metalografik çalışmalar sonrası numuneler; Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalürji Laboratuvarında bulunan Şekil.6.12’de gösterilen optik mikroskop kullanılarak 100x-200x ve 400x büyütmede optik görüntüleri alınmıştır.



Şekil 6.12. Optik mikroskop

Optik mikroskopla yapılan incelemeler numunelerin SEM incelemeleri için bir ön hazırlık olmuştur. SEM incelemelerinde numunelerin mikroyapı analizlerine ilaveten kırık yüzey görüntüleri de elde edilmiştir. Mikroyapı incelemeleri sonucunda numunelerin sementit ağlarının kırılıp küresel form oluşumları incelenmiştir. Kırık yüzey görüntüleri incelemeleri sonucunda numunelerin sünek-gevrek kırılma davranışları incelenmiştir. SEM incelemeleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 6.13’de verilen Hitachi marka SU 1510 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemeleri için görüntüler 500x- 1000x- 1500x -2000x büyütme oranlarında alınmıştır. Kırık yüzey incelemeleri için görüntüler 250x- 500x- 1000x- 2000x büyütme oranlarında alınmıştır.



Şekil 6.13. Hitachi marka SU 1510 model SEM cihazı

## 6.9. Sertlik Ölçümleri

Numunelere ısıtma işlemleri öncesi ve sonrası sertlik ölçümleri yapılmıştır. Uygulanan küreselleştirme ısıtma işlem şartlarına bağlı olarak arzu edilen küresel sementit yapısının malzeme sertliği üzerine etkisi incelenmiştir.

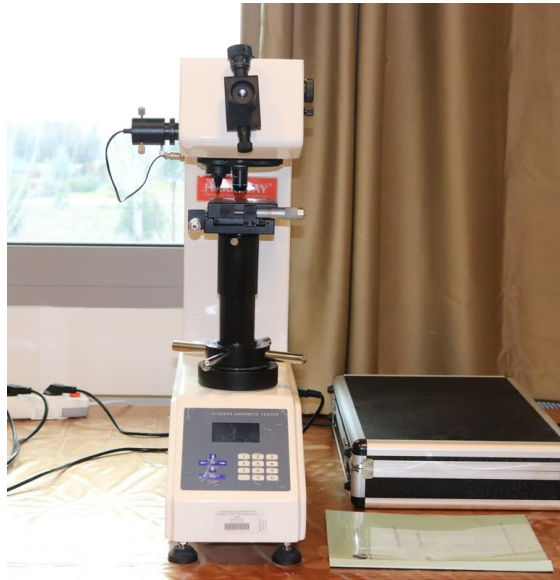
Numunelerin sertlik ölçümleri makro ve mikro sertlik olmak üzere 2 farklı yöntemle ölçülmüştür. Makro sertlik ölçümleri Necmettin Erbakan Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan Emcotest marka Durascan G5 sertlik ölçüm cihazında ölçülmüştür. Bilye çapı 2,5 mm olup 6,25 kg.f yükte, yükleme süresi 5 sn

olarak ölçüm işlemleri gerçekleştirilmiştir. Kullanılan makro sertlik cihazı Şekil 6.14’de gösterilmiştir.



**Şekil 6.14.** Emtotest marka Durascan G5 sertlik ölçüm cihazı

Mikro sertlik ölçümleri ise, Necmettin Erbakan Üniversitesi Seydişehir Ahmet Cengiz Mühendislik Fakültesi Malzeme ve Metalürji Laboratuvarında bulunan Şekil 6.15’de gösterilen Hardway marka HV 1000 ZDT model sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir. Mikro sertlik ölçümleri 0,2 kg yük kullanılarak uygulanmıştır. Numunelerin metalografik olarak hazırlanan yüzeylerinden 5 er adet ölçüm yapılarak ortalamasının alınmasıyla sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir.



**Şekil 6.15.** Hardway marka HV 1000 ZDT model sertlik ölçüm cihazı

## 6.10. XRD Analizleri

Deney numunelerinin XRD analiz çalışmaları ısıl işlemler öncesi ve sonrasında muhtemel faz ve faz dönüşümlerinin belirlenmesi açısından etkili olmuştur. Bu bakımdan deney numunelerinde XRD analiz çalışmaları, Necmettin Erbakan Üniversitesi Merkez Araştırma Laboratuvarında bulunan Şekil 6.16 'da gösterilen GNR marka APD 200 Pro model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz altında ölçümler  $\text{Cu-K}_\alpha$  radyasyonu  $10^\circ < 2\theta < 70^\circ$  aralığında, 40kV gerilim ve 40mA akım kullanılarak yapılmıştır.



Şekil 6.16. GNR marka APD 200 Pro model XRD cihazı

## 7. DENEYSEL SONUÇLAR

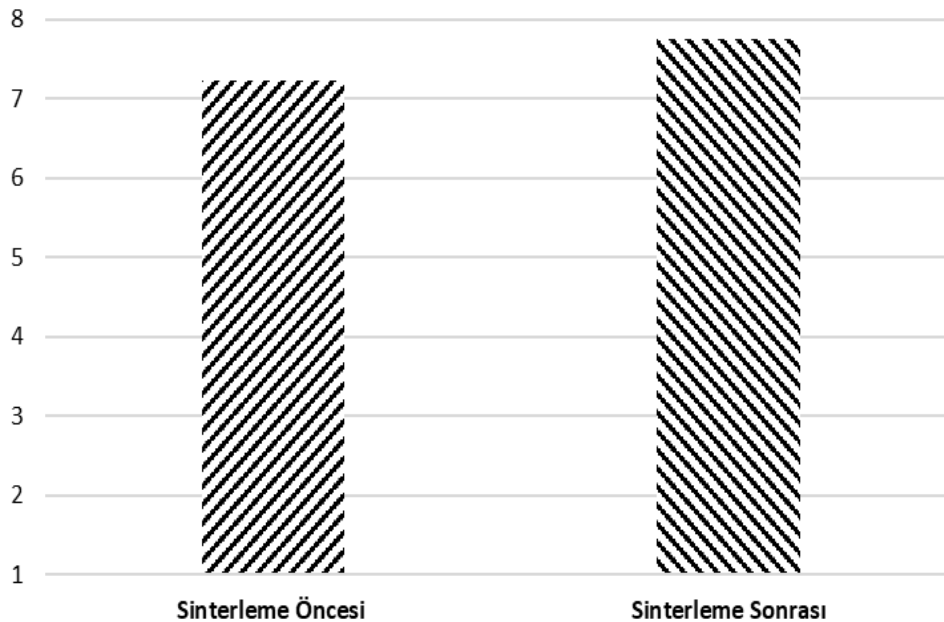
### 7.1. Yoğunluk Ölçüm Sonuçları

Deneysel çalışmalarda belirtildiği gibi presleme ve sinterleme işlemini takiben numunelerin yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Sinterleme işlemi sonrası numunelerde yoğunluk artışı sağlanması amaçlanmıştır.

Yoğunluk ölçümleri 33 adet numune üzerinden ölçülmüş ve ortalamaları alınmıştır. Numunelerin presleme sonrası (ham) yoğunluğunda ve sinterleme sonrası (nihai) yoğunluklarında değişim olduğu görülmüştür. Çizelge 7.1’de bu değerler verilmiştir ve değişimin daha net görülebilmesi için Şekil.7.1 de sütun grafik olarak sunulmuştur.

Çizelge 7.1. Yoğunluk değerleri

Presleme Sonrası Yoğunluk ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	7.22
Sinterleme Sonrası Yoğunluk ( $\text{g.cm}^{-3}$ )	7.74



Şekil 7.1. Yoğunluk değerlerinin değişim grafiği

Numunelerde presleme sonrası yoğunluğun sinterleme sonrası yoğunluğa oranla oldukça düşük olduğu görülmektedir. Bunun nedeni toz metalurji yöntemi ile üretilen numunelerde önemli oranda gözenekler (boşluklar) bulunmaktadır. Bu nedenle toz metal malzemelerin presleme sonrası yoğunlukları düşük olmaktadır.

Bu çalışmada 850 MPa basınçta tek yönlü presleme işlemi ile ortalama yoğunluk değeri  $7.22 \text{ g.cm}^{-3}$  olarak hesaplanmıştır. Bu durum göz önüne alındığında presleme basıncı arttıkça numunedeki gözenekliliğin azalacağı düşünülebilir ancak bunun çok etkili olmayacağı bilinmektedir.

Presleme basıncının artması tozlar arasında bir plastik deformasyon oluşturur. Bu deformasyon esnasında tozlar arasında kalan boşluklar presleme basıncının artmasıyla azalmaz aksine tozlarda hasar oluşumu gerçekleşebilir bu durumda doğrudan numuneye zarar vermektedir.

Sinterleme işleminde temel amacın tozların arasında bulunan gözeneklerin sıcaklığın etkisiyle birleşerek yoğunluğu arttırmak olduğu bilinmektedir. Birleşen bu gözenekler tane sınırlarını oluşturmaktadır. Grafiğin incelenmesi sonucunda numunelerde sinterleme işlemi sonrasında yoğunluk değerlerinin arttığı görülmektedir. Yoğunluk değerlerinin artması beklenen bir durumdur.

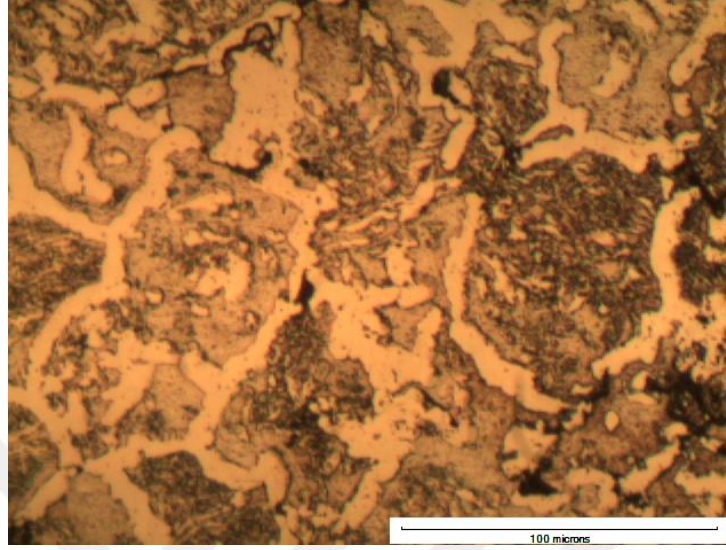
## **7.2. Mikroyapı Sonuçları**

### **7.2.1. Optik Mikroskop Görüntüsü İncelemeleri**

Presleme sonrası sinterleme işlemi tamamlanan toz metal çelik numunelere farklı küreselleştirme ısı işlemleri uygulanmıştır. Isıl işlemler sonrası genel olarak mikroyapılar incelendiğinde, farklı ısı işlem koşullarına ve sürelerine bağlı olarak sementit ağlarının küreselleşmesinde farklılıklar olduğu görülmüştür.

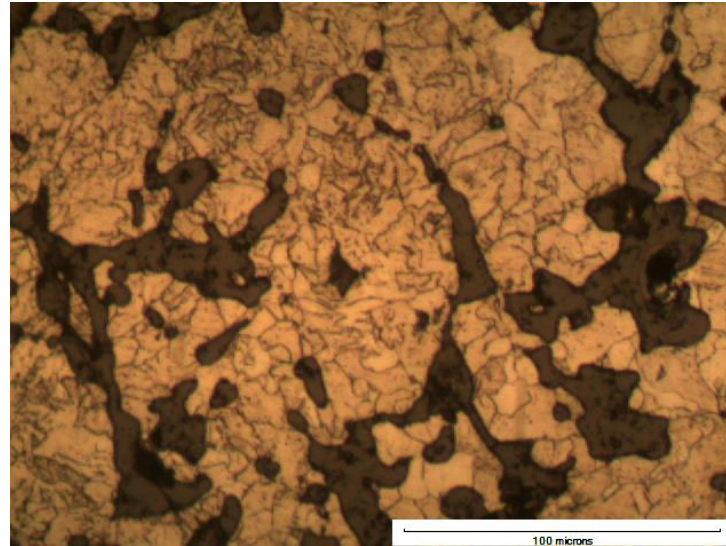
Isıl işlemler sonrası SEM görüntüleri için bir hazırlık aşaması olarak numunelerin optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Optik mikroskop görüntüleri numunelerin SEM görüntüsü elde etmek için dağlama işleminin yeterli olduğunu anlamak için kullanılmıştır.

Şekil 7.2 de sinterleme sonrası (ısıt işlemsiz) numunenin optik mikroskop görüntüsü verilmiştir. Optik mikroskop görüntüsü incelendiğinde sementit ağ yapısı ile çevrili perlitik yapıların varlığı görülmektedir.



Şekil 7.2. Sinterleme sonrası (ısıt işlemsiz) optik mikroskop görüntüsü

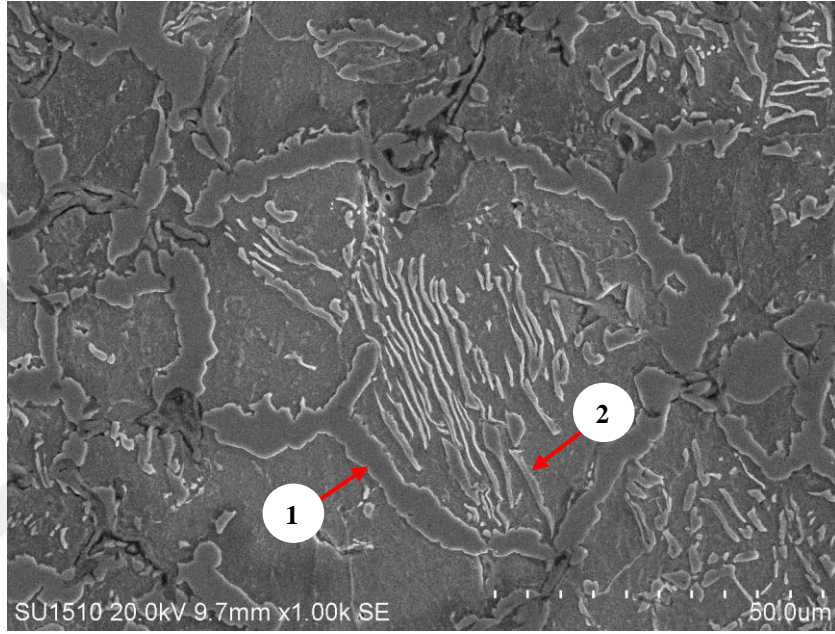
900°C de tamamen östenit yapıya ulaşan numuneye su vererek soğutma işlemi uygulanmıştır ve elde edilen martenzit yapının optik mikroskop görüntüsü Şekil 7.3' de verilmiştir. Bilindiği gibi martenzit yapı hızlı soğumadan dolayı son derece sert ve kırılıgandır.



Şekil 7.3. Su verme işlemi sonrası oluşan martenzitik optik mikroskop görüntüsü

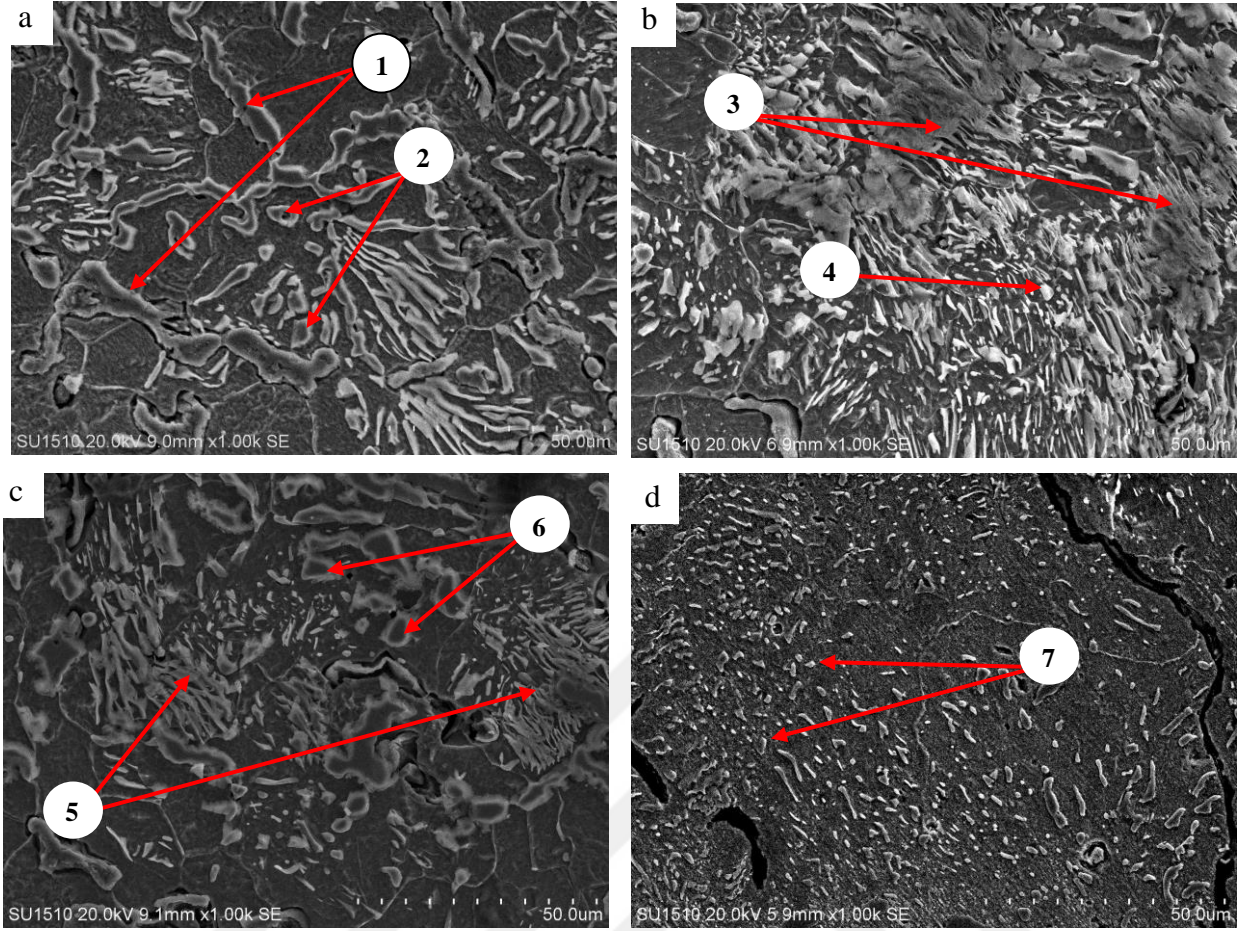
### 7.2.2. SEM Görüntüleri İncelemeleri

Presleme işlemi sonrası sinterleme (ısıl işlemsiz) uygulanan deney numunesinin SEM görüntüsü Şekil 7.4 de gösterilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, ferritik yapı üzerinde sementit ağlarının dağılım gösterdiği tespit edilmiştir (1 numaralı bölge). Aynı zamanda SEM görüntüsü incelendiğinde, sementit ağ yapısıyla çevrelenmiş bölge içerisinde kalan perlitik yapının varlığı görülmektedir (2 numaralı bölge).



Şekil 7.4. Sinterleme sonrası (ısıl işlemsiz) SEM görüntüsü

Sinterleme işlemi sonrası küreselleştirme ısıl işlem şartları açısından KK olarak kodlanan ve  $A_{c1}$  sıcaklığının altında ( $700^{\circ}\text{C}$ ) uygulanan ısıl işlem sonrası deney numunelerini SEM görüntüleri Şekil 7.5 de verilmiştir.



**Şekil 7.5.** Küreselleştirme ısı işlemi uygulanmış KK numunesine ait SEM görüntüleri  
(a) 5 saat (b) 10 saat (c) 20 saat (d) 40 saat

Şekil 7.5 (a)'da KK numunesine ait 5 saat küreselleştirme ısı işlemi sonrası SEM görüntüsü verilmiştir. Deney numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde, Şekil 7.4'de görülen sinterleme sonrası sementit ağ yapısının tamamıyla küresel şekil morfolojisinde yer almadığı görülmektedir. Bu durumun sebebi küresel sementit yapısının oluşması için yeterli zaman olmadığı olarak belirtilebilir. Yine aynı SEM görüntüsü incelendiğinde, 1 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde sementit ağlarının tamamen kırılmadığı ve küresel bir yapı oluşmadığı açıkça görülmektedir. (Şekil 7.5(a)) 2 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde ise perlitik yapılar kırılmaya ve küresel yapılar oluşmaya başlamıştır. Küresel yapıların oluşumu numunenin her yerinde eşit oranda oluşmaya başlamamıştır. Bunun nedeninin presleme işlemi sırasında oluşan yoğunluk farkından kaynaklandığı düşünülmektedir.

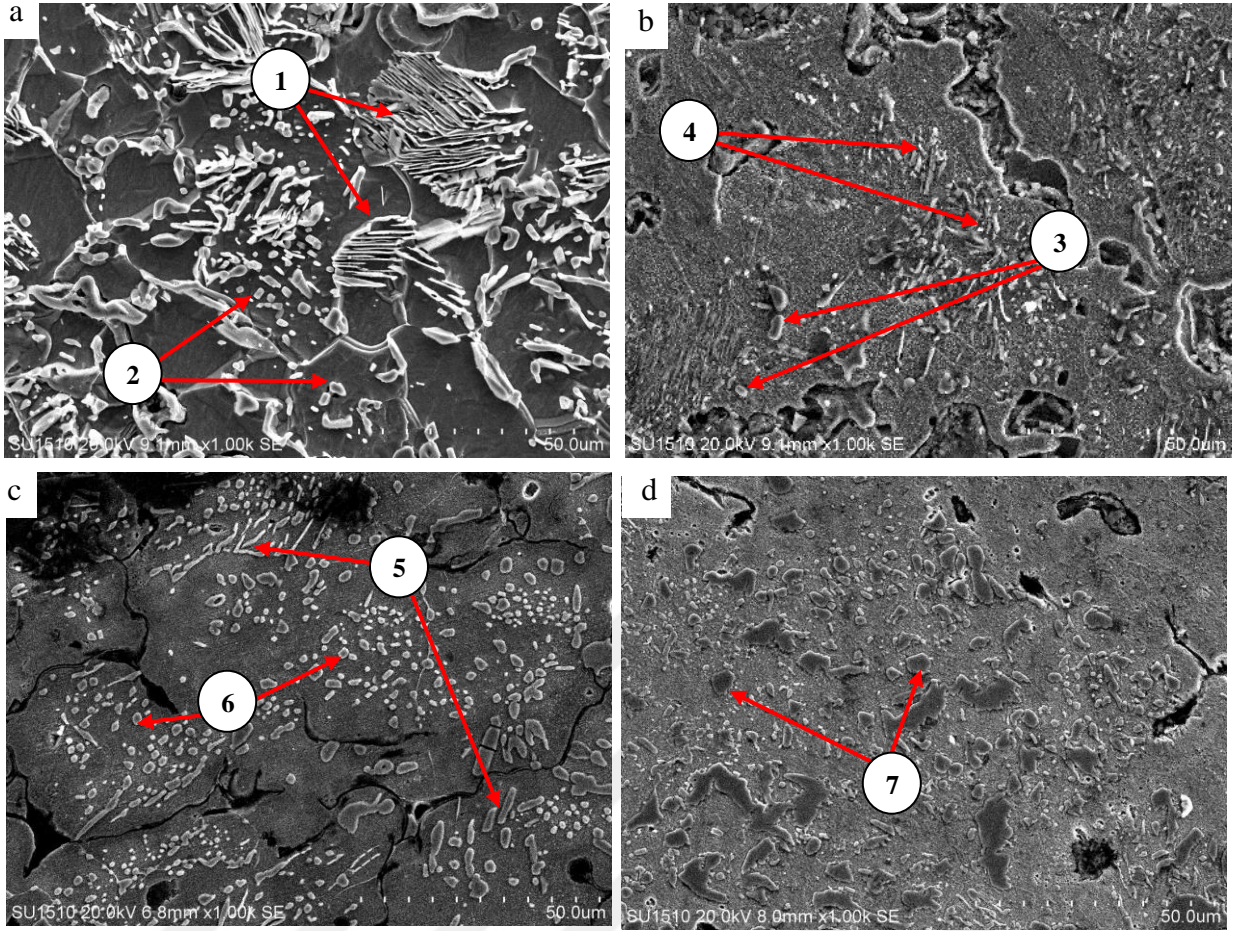
Şekil 7.5 (b)'de 10 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanmış KK numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu SEM görüntüsü incelendiğinde, 3 numaralı ok ile

gösterilen bölgelerde perlitik yapıların halen yer aldığı görülmektedir. 5 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış numuneye nazaran perlitik yapısındaki azalma görülmektedir. Ancak 4 numaralı ok ile gösterilen bölgede perlitik yapı, 5 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış numuneye kıyasla daha çok dönüşüme uğramış ve küresel şekil morfolojisi artmıştır. Fakat parçalanan perlitik yapılar yetersiz zamandan dolayı istenilen küresel bir morfolojiye ulaşamamıştır.

Şekil 7.5 (c)'de ise 20 saatlik küreselleştirme ısıl işlemi sonrası KK numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. Bu numunenin SEM görüntüsü incelendiğinde, azalan perlitik yapısı ve çoğunlukla dönüşüme uğrayan küresel sementit parçacıklarının yer aldığı görülmektedir. 5 numaralı ok ile gösterilen bölgede perlitik yapı durumunu korumaktadır ancak kısa sürelerde uygulanan ısıl işlemlere göre azalma eğilimi göstermiştir. 6 numaralı ok ile gösterilen bölgede ise küresel yapılar artış eğilimi gösterdiği tespit edilmiştir.

Klasik küreselleştirme ısıl işleminde işlenebilirliği iyileştirmek adına küresel sementit oluşumu için uzun ısıl işlem süreleri gerektiği bilinmektedir [26]. Bu nedenle 40 saatlik küreselleştirme sonunda küresel yapılar elde edileceği öngörülmektedir. Şekil 7.5 (d)'de 40 saatlik küreselleştirme ısıl işlemi sonrası elde edilen SEM görüntüsü incelendiğinde, 7 numaralı ok ile gösterilen bölgede küresel sementit oluşumunun ferritik yapıda çoğunlukla yer aldığı görülmektedir. Küresel yapıların boyutlarında farklılıklar vardır ancak ısıl işlem süresi artırılsa küresel yapıların homojen olarak dağıtılacağı düşünülmektedir.

SK olarak adlandırılan,  $A_{c1}$  sıcaklığının altında ve üstünde ( $700^{\circ}C-740^{\circ}C$ ) farklı sıcaklık ve sürelerde, salınımlı olarak küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan deney numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 7.6'te gösterilmiştir.



**Şekil 7.6.** Küreselleştirme ısısal işlemi uygulanmış SK numunesine ait SEM görüntüleri (a) 5 saat (b) 10 saat (c) 20 saat (d) 40 saat

Şekil 7.6 (a)' da 5 saat ısısal işlem uygulanan numunenin SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, bu ısısal işlem süresinde 1 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde perlitik yapıların tamamen küreselleşmediği görülmektedir. Buna ek olarak 2 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde perlitik yapıların kısmen parçalanmaya başlamasıyla, küresel sementit oluşumu görülmektedir.

SK numunesi göz önüne alındığında Şekil 7.6 (b)'de SEM görüntüsü verilen 10 saat salımlı ısısal işlem uygulanan numunede küresel yapıların 5 saatlik ısısal işlem süresine kıyasla artış gösterdiği tespit edilmiştir. 3 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde küreselleşme eğiliminin arttığı ve küresel yapıların oluştuğu görülmektedir. 4 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde ise perlitik yapıların küreselleşme eğilimine başladığı ancak tam olarak küreselleşemediği görülmektedir.

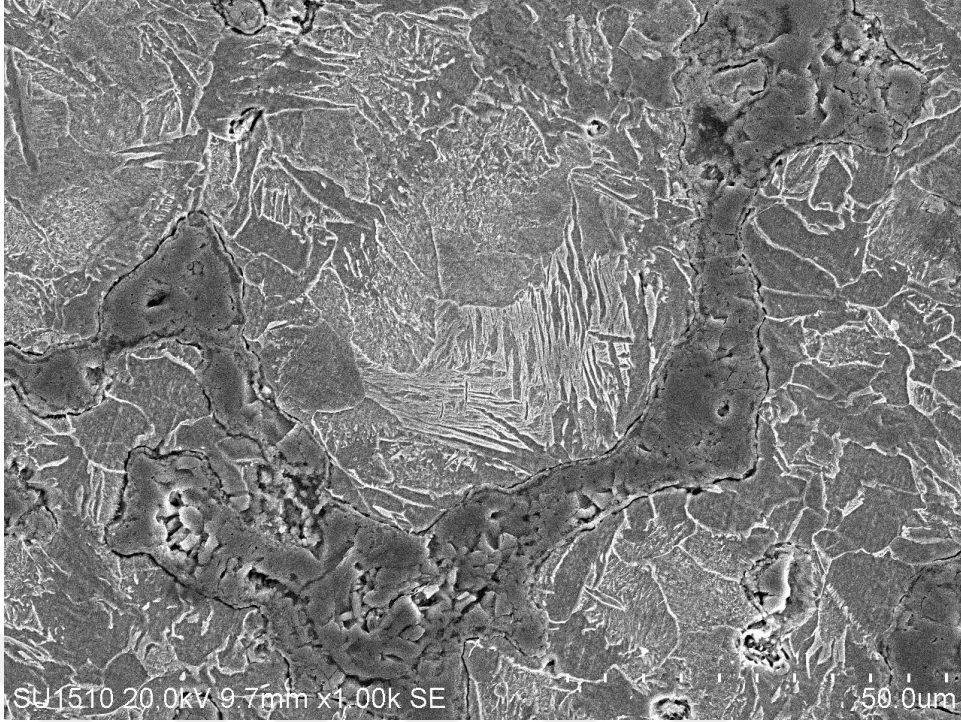
Şekil 7.6 (c)'de verilen SK numunesinin 20 saat uygulanan küreselleştirme ısısal işlemi sonrası SEM görüntüsü incelendiğinde, 5 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde

perlitik yapılar durumunu korumaktadır. 6 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde ise 10 saatlik küreselleştirme ısıl işlemine kıyasla küresel yapılarda artış olduğu görülmektedir. Ancak perlitik yapılar tamamen dönüşüme uğramamıştır. Ancak 10 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış numuneye nazaran perlitik yapısındaki azalma görülmektedir.

Son olarak 40 saatlik ısıl işlem uygulanan numunelerin SEM görüntüsü incelendiğinde (Şekil 7.6. (d)), ferrit yapısı üzerinde istenilen sementit küresel şekil morfolojisi dönüşümü ve dağılımı tespit edilmiştir. Yine aynı SEM görüntüsü incelendiğinde, 7 numaralı ok ile gösterilen bölgelerde sementit ağ yapısının tamamen parçalandığı ve bu parçalanmış sementit yapısının küresel form kazandığı görülmektedir. Ancak yapıların KK numunesinde olduğu gibi homojen olarak dağılmadığı görülmektedir. Bunun nedeninin 40 saatlik ısıl işlem süresinden kaynaklandığı bilinmektedir. Isıl işlem süresinin artmasıyla küresel yapıların homojen olarak dağılacığı öngörülmektedir.

KK ve SK numunelerinin SEM görüntüleri incelemeleri sonucunda, ısıl işlem süresinin artışıyla sementitlerin ağ yapısının küreselleşme eğiliminin arttığı görülmektedir. KK ve SK numunelerinde 40 saatlik ısıl işlem sonrasında ortaya çıkan SEM görüntüleri daha ayrıntılı incelendiğinde SK numunelerinde küreselleşme eğiliminin daha fazla olduğu görülmektedir. Bunun nedeni SK numunesinin  $Ac_1$  sıcaklığının altında ve üstünde sıcaklıkta ( $700^{\circ}C-740^{\circ}C$ ) belirli sürelerde tutulmasından kaynaklanmaktadır. Bu ısıl çevrimlerden dolayı sementit ağlarının yapılarının kırıldığı ve küresel sementit yapı oluşumunda artış olduğu gözlemlenmiştir.

Bir diğer uygulanan ısıl işlem türü ise, tamamen östenit yapı elde etmek için  $900^{\circ}C$  de bir süre bekletilerek su verme işlemi sonrası martenzitik yapıya  $Ac_1$  sıcaklığının altında ( $700^{\circ}C$ ) sıcaklıkta küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu yöntemde numune  $900^{\circ}C$  de tamamen östenit yapıya ulaştıktan sonra su ortamında malzemeye su verilerek Şekil 7.7' de gösterilen martenzit yapısı oluşturulmuştur. Çok hızlı soğutmadan dolayı C atomlarının yayınına fırsat verilmemiştir. Bu nedenle son derece sert bir yapıda ve işlenebilirlik oranı neredeyse yok denecek kadar azdır ve süneklik oranı neredeyse sıfır olarak kabul edilebilir.



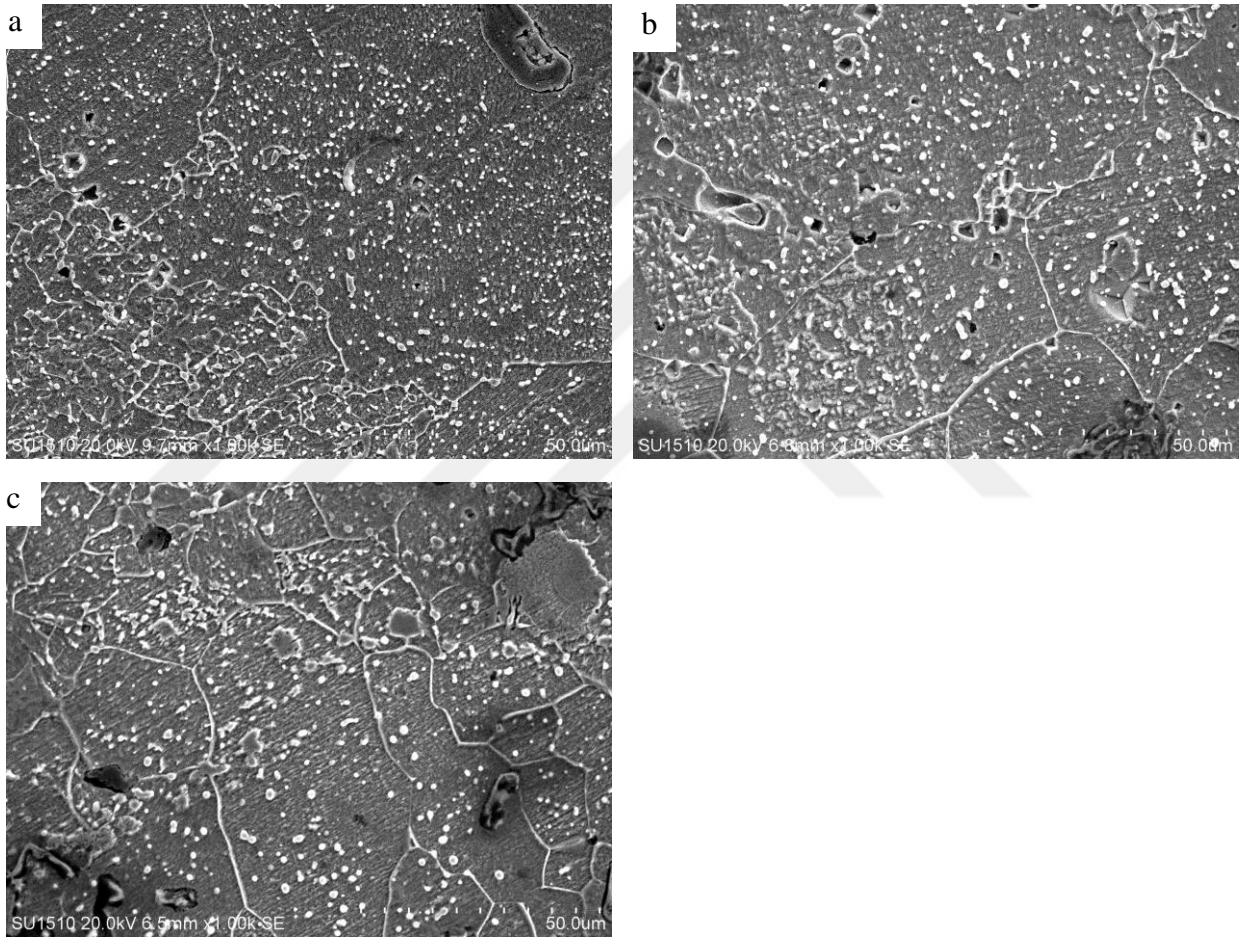
**Şekil 7.7.** Su verme işlemi sonrası martenzitik SEM görüntüsü

900°C sıcaklıkta tamamen östenit yapıya ulaşan numuneye su verme işlemi uygulanmıştır. Ardından  $A_{c1}$  sıcaklığının hemen altındaki bir sıcaklıkta farklı sürelerde ısı işlem uygulanan deney numunelerinin SEM görüntüleri Şekil 7.8’te verilmiştir. Bu numuneler MSK olarak kodlanmıştır.

Şekil 7.8 (a)’da 5 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanmış deney numunesinin SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelemelerinde, sementit ağ yapısının kırılarak ferrit matris içerisinde küresel şekil morfolojileri oluşumları görülmektedir. SEM görüntüsü SK ve KK numunelerinin 5 saat ısı işlem uygulanan SEM görüntüleriyle karşılaştırıldığında küreselleşme eğiliminin arttığı çok net olarak görülmektedir. Buna ek olarak küresel sementitlerin boyutlarının KK ve SK numunelerinin 40 saatlik görüntüsüne kıyasla daha homojen ve ince boyutlarda olması bu ısı işlem türü için önemli bir sonuç olabilir. Şekil 7.8 (b)’de verilen 10 saat küreselleştirme ısı işlemi sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde, küreselleşme zamanının artışıyla küresel sementitlerin boyutlarının artış gösterdiği görülmektedir. Buna ek olarak homojen boyut dağılımları durumunu korumaktadır.

20 saat uygulanan klasik küreselleştirme ısıl işlemi sonunda Şekil 7.8 (c)'de verilen SEM görüntüsü incelendiğinde 5 ve 10 saat uygulanan ısıl işlemlere kıyasla küresel sementitlerin boyutlarında kayda değer bir artış olduğu görülmektedir.

Kısa zamanlarda küresel yapıların varlığının artışı şu şekilde açıklanabilir; 900°C'de tamamen östenit yapıya ulaşan numunede su verme işlemi sonrası difüzyona izin verilmeden kafes yapısının çok hızlı distorsiyonundan dolayı yoğun dislokasyon varlığı mevcuttur. Bundan dolayı numune son derece karasız bir yapıya sahiptir. Bu nedenle bu martenzit yapıların küreselleşme sayısının artma eğilimleri oldukça fazladır.



**Şekil 7.8.** Küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış MSK numunesine ait SEM görüntüleri; (a) 5 saat (b) 10 saat (c) 20 saat

### 7.3. Sertlik Ölçüm Sonuçları

Küreselleştirme ısı işlemleri tamamlanan numunelerin sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümleri makro sertlik ve mikro sertlik olmak üzere 2 yöntemle incelenmiştir. Makro sertlik ölçümleri numunelerin mikroyapı için hazırlanan yüzey kısmından ölçülmüştür. 5 adet ölçüm yapılmıştır ve ortalaması alınmıştır. Mikro sertlik ölçümleri de aynı şekilde numunelerin mikroyapı için hazırlanan yüzey kısımlarından ölçülmüştür. Mikro sertlik ölçümlerinde gözenek olmayan kısımlardan ölçüm alınmasına dikkat edilmiştir ve 5 adet ölçüm yapılarak ortalaması alınmıştır.

#### 7.3.1. Mikro Sertlik Ölçümleri

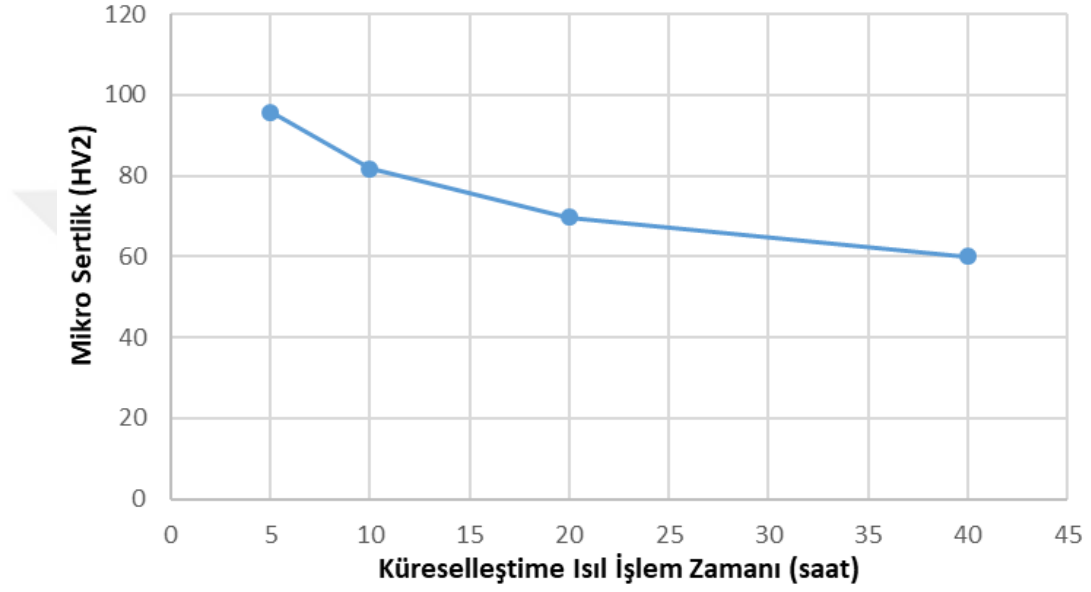
Toz metal numunelerin küreselleştirme zamanına bağlı olarak mikro sertlik değerleri ölçülmüştür. Sertlik değerleri malzemenin birçok mekanik özelliğine dair bilgi edinmemizde yardımcı olmaktadır ancak toz metal numunelerde mikro sertlik ve makro sertlik ölçümlerinde sonuçlarda farklılık olabilir. Bunun en belirgin nedenlerinden birisi ölçüm esnasında gözenekli kısımdan ölçüm yapılmış olmasından kaynaklanmaktadır. Çizelge 7.2 de KK numunesine ait küreselleştirme sürelerine bağlı olarak numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Isıl işlem süresine bağlı olarak değişimi daha net görmek için Şekil 7.9 de KK numunesine sertlik değerleri grafiği verilmiştir. Çizelge 7.3 de SK numunelerine ait küreselleştirme ısı işlem zamanlarına bağlı olarak numunelerin sertlik değerleri verilmiştir. Buna ek olarak değişimleri daha net görmek için Şekil 7.10 de mikro sertliklerin değişim grafiği verilmiştir.

**Çizelge 7.2.** KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerlerinin değişimi

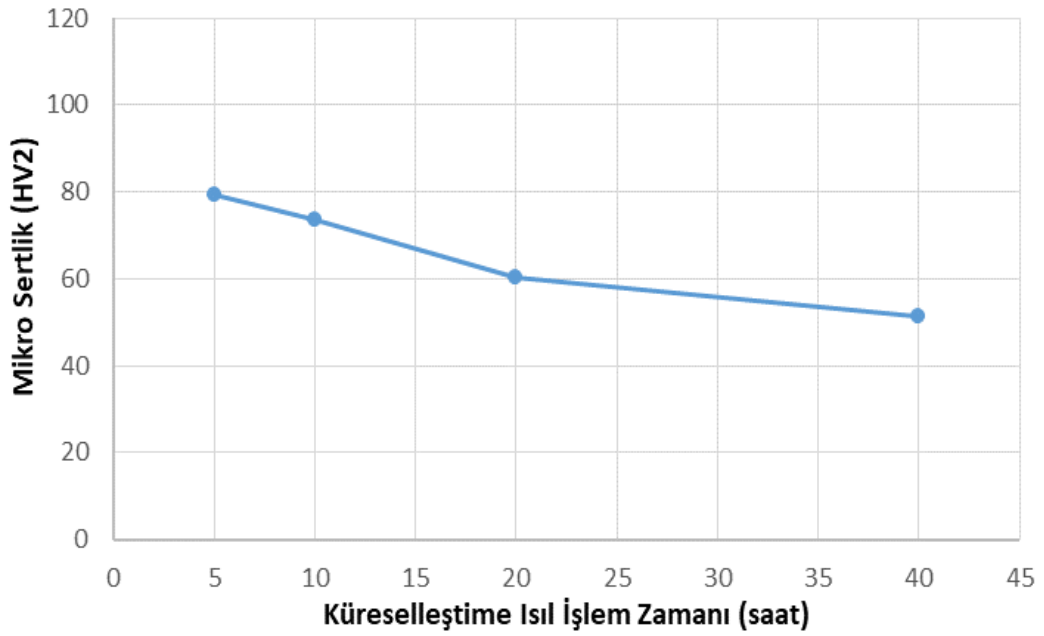
Küreselleştirme Süresi	Mikro Sertlik Değeri (HV2)
5 saat	91.7
10 saat	81.4
20 saat	69.81
40 saat	60.75

**Çizelge 7.3.** SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerlerinin değişimi

Küreselleştirme Süresi	Mikro Sertlik Değeri (HV2)
5 saat	79.4
10 saat	73.7
20 saat	60.2
40 saat	51.4



**Şekil 7.9.** KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerleri grafiği



**Şekil 7.10.** SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı mikro sertlik değerleri grafiği

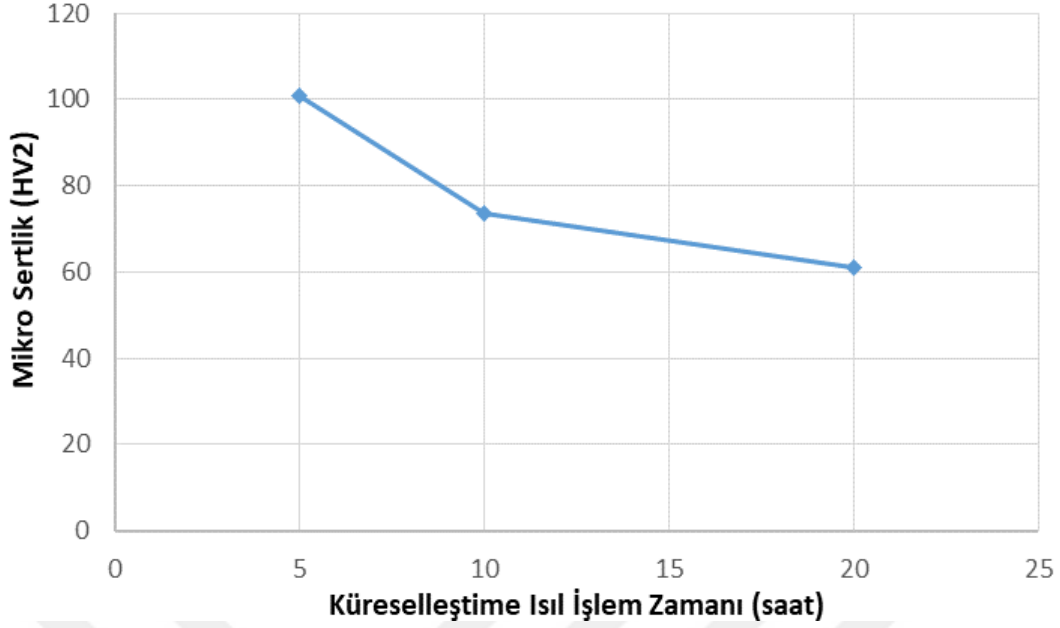
Sinterleme sonrası 132.4 HV2 olarak ölçülen sertlik değerinin ısıtma işlemleri sonrasında düşüş gösterdiği tespit edilmiştir. Isıtma işlemleri sonrası numunelerde öngörüldüğü gibi küreselleştirme ısıtma işlem süresi arttıkça sertlik değerlerinin düştüğü görülmektedir. KK numunesinde 5 saatlik küreselleştirme ısıtma işlemi sonunda 91.7 HV2 olarak ölçülen değer 40 saatlik küreselleştirme ısıtma işlemi sonunda 60.75 HV2 değerine kadar düşmüştür. SK numunesinde de 5 saat sonunda 79.4 olarak ölçülen değer 40 saatlik ısıtma işlemi sonunda 51.4 değerine kadar düştüğü görülmektedir. Bu durumda küreselleştirme ısıtma işlem sürelerinin artmasıyla küreselleştirme davranışının arttığını söylemek mümkündür. Küreselleştirme davranışının artışıyla birlikte malzemenin sertliği düşmekte ve işlenebilirliği kolaylaşmaktadır.

SK numunelerinde aynı sürelerde mikro sertliğin daha düşük çıkmasının nedeni  $A_{c1}$  sıcaklığının altında ve üstündeki sıcaklıklarda salınımlı olarak ısıtma işlem yapılmasından dolayı küreselleştirme davranışının KK numunelerine göre daha fazla olmasıdır.

Bir diğer ısıtma türü olarak malzemeyi tamamen östenitlendikten sonra su verilerek martenzit yapı üretilmiş ve ardından  $A_{c1}$  sıcaklığının altında bir sıcaklıkta farklı sürelerde ısıtma işlemi uygulanmıştır. MSK olarak kodlanan bu ısıtma işlemi sonrası malzemenin mikro sertlik ölçümleri Çizelge 7.4’te verilmiştir ve değişimleri görebilmek amacıyla Şekil 7.11’de mikro sertlik değişim grafiği verilmiştir.

**Çizelge 7.4.** MSK numunesinin küreselleştirme zamanına bağlı mikro sertlik değerlerinin değişimi

Küreselleştirme Süresi	Mikro Sertlik Değeri (HV2)
5 saat	100.8
10 saat	73.6
20 saat	60.9



Şekil 7.11. MSK numunesinin küreselleştirme zamanına bağlı mikro sertlik değerleri grafiği

Numunelere su verme işlemi sonrası sertlik değeri 732.8 HV2 olarak ölçülmüştür. Bilindiği gibi martenzit yapı son derece sert ve işlenebilirliğe uygun değildir [27]. Ancak martenzit yapıdaki numunelere  $Ac_1$  sıcaklığının altında bir sıcaklıkta farklı sürelerde uygulanan ısıtma işlemi sonrası sertlik değerleri azalmıştır. Grafik incelendiğinde 5 saatlik küreselleştirme ısıtma işlemi sonunda 100.8 HV2 olarak ölçülen değer 20 saatlik küreselleştirme ısıtma işlemi sonunda 60.9 HV2 değerine kadar düşmüştür. Diğer numunelerde olduğu gibi artan süre ile beraber sertliğin düştüğü görülmektedir.

### 7.3.2. Makro Sertlik Ölçümleri

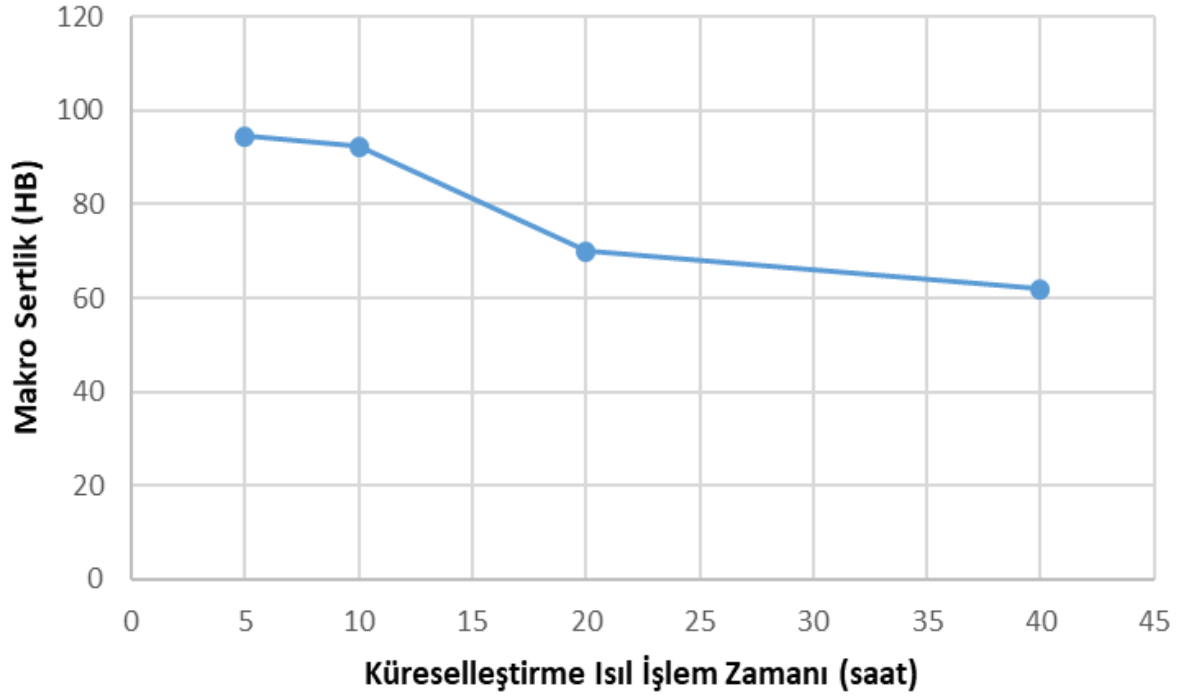
Bu çalışmada toz metal numunelerin mikro sertlik değerlerine ek olarak makro sertlik değerleri de ölçülmüştür. Çizelge 7.5 ve Çizelge 7.6'da KK ve SK numunesine ait sertlik değerleri verilmektedir. Sertlik değerlerindeki değişimlerin daha net olarak görülebilmesi için Şekil 7.12 ve Şekil 7.13 de KK ve SK numunelerine ait sertlik grafikleri verilmiştir.

**Çizelge 7.5.** KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerlerinin değişimi

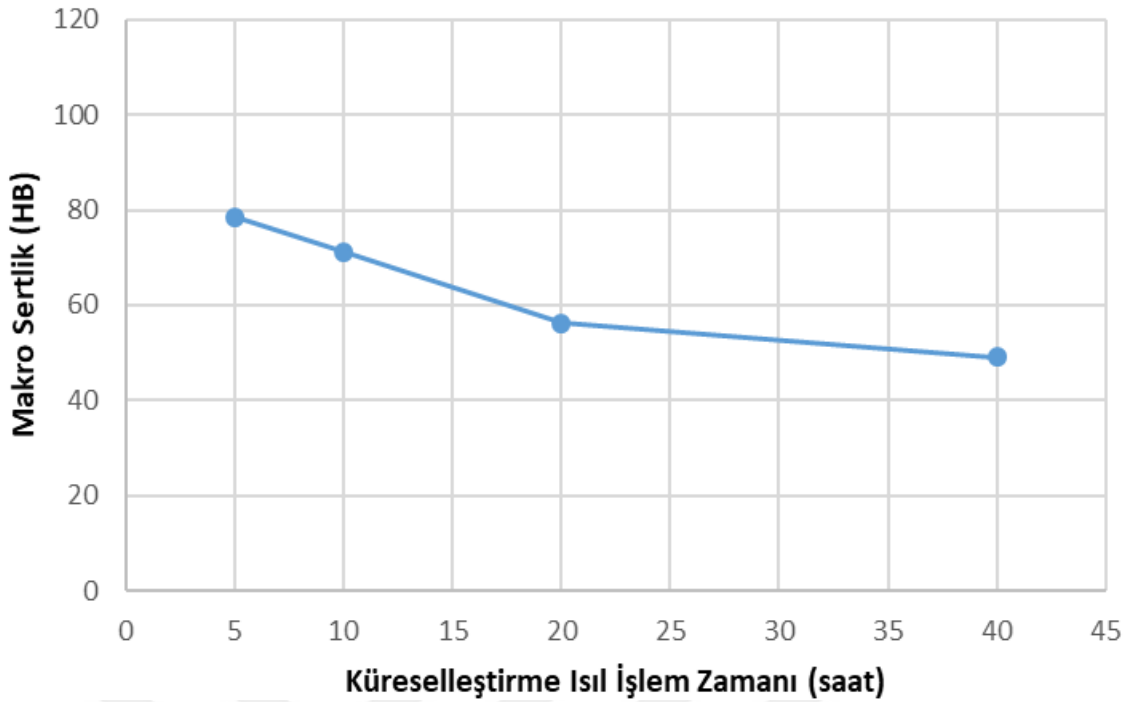
Küreselleştirme Süresi	Makro Sertlik Değeri (HB)
5 saat	94.5
10 saat	92.3
20 saat	69.8
40 saat	61.9

**Çizelge 7.6.** SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerlerinin değişimi

Küreselleştirme Süresi	Makro Sertlik Değeri (HB)
5 saat	78.5
10 saat	71.2
20 saat	56.2
40 saat	49.1



**Şekil 7.12.** KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerleri grafiği



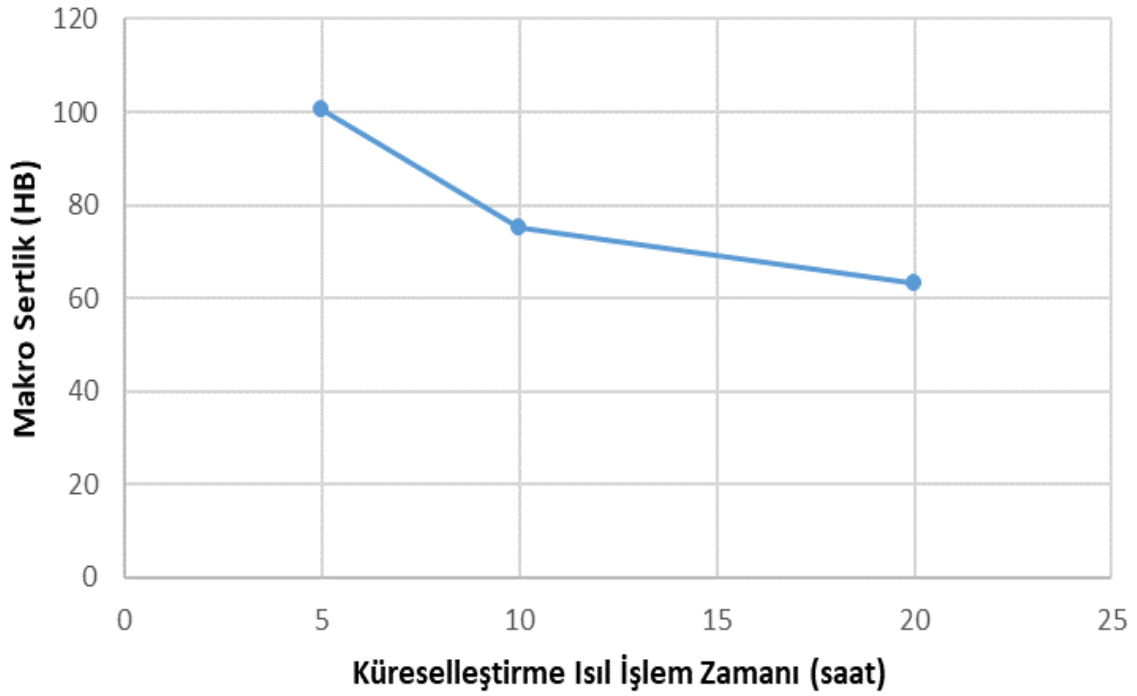
Şekil 7.13. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerleri grafiği

Verilen grafikler incelendiğinde mikro sertlik sonuçlarında belirtildiği gibi artan ısıtma işlem süresi ile sertliğin ters orantılı olduğu görülmektedir. Ancak verilen değerler incelendiğinde makro sertlik sonuçları mikro sertlik değerlerinin sonuçlarından kısmen daha azdır. Bunun nedeni toz metal malzemelerde bulunan gözenekli yapıdan kaynaklanmaktadır. Bulunan gözenekler nedeniyle sertlik değerleri gerçek değerden daha düşük olarak ölçülebilmektedir.

Bu verilere ek olarak MSK olarak kodlanan bu ısıtma işlem sonrası malzemenin makro sertlik ölçümleri Çizelge 7.7’ de verilmiştir ve değişimleri görebilmek amacıyla Şekil 7.14’ de makro sertlik değişim grafiği verilmiştir.

Çizelge 7.7. MSK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı makro sertlik değerlerinin değişimi

Küreselleştirme Süresi	Makro Sertlik Değeri (HB)
5 saat	100.7
10 saat	75.1
20 saat	63.1



Şekil 7.14. MSK numunesinin küreselleştirme zamanına bağlı makro sertlik değerleri grafiği

Bu grafikler incelendiğinde mikro sertlik değerlerinde açıklandığı gibi martenzit sonrası 253.2 olarak ölçülen değer küreselleştirme ısıl işlem süresine bağlı olarak düşüş göstermektedir.

## 7.4. Darbe Test Sonuçları

### 7.4.1. Darbe Enerjileri Sonuçları

Küreselleştirme ısıl işlemi tamamlanan numunelere deneysel çalışmalarda belirtilen şatlarda darbe testleri uygulanmıştır.

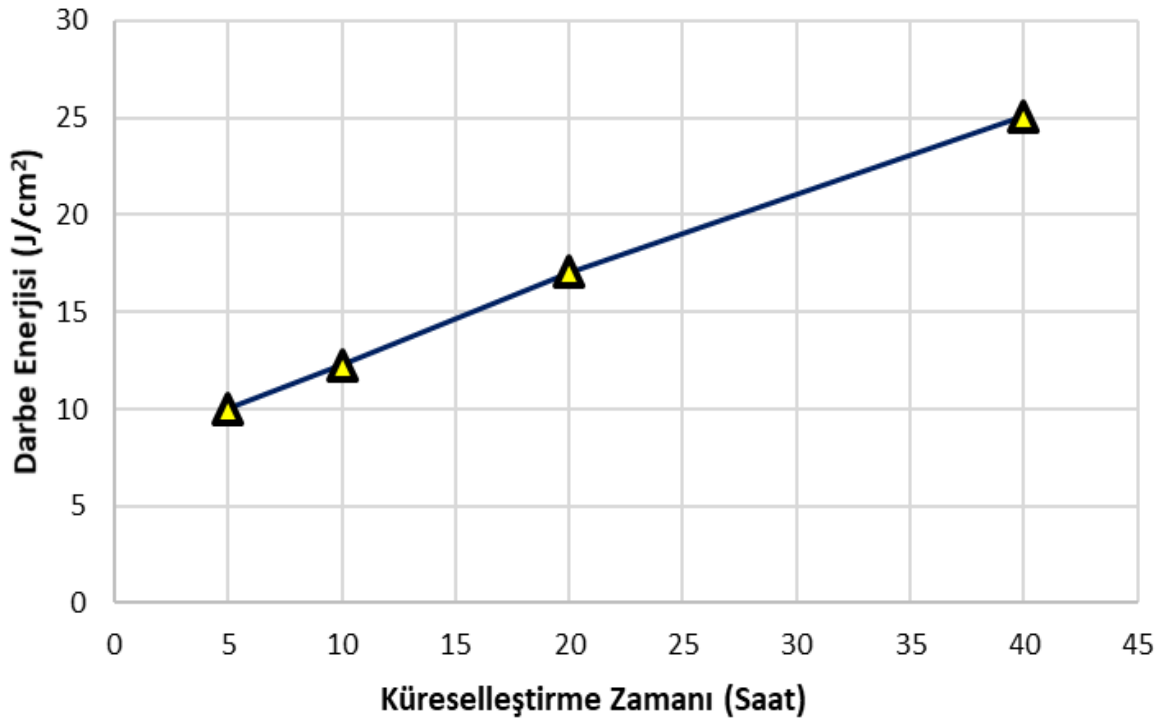
Uygulanan KK ısıl işleminin darbe enerji değişimleri ve bu değişimlerin grafikleri Çizelge 7.8’de ve Şekil 7.15’de belirtilmiştir. Bir diğer ısıl işlem türü olarak uygulanan ve SK olarak kodlanan numunelerin darbe enerji değişimleri Çizelge 7.9’da Şekil 7.16’ de verilmiştir.

**Çizelge 7.8.** KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişimi

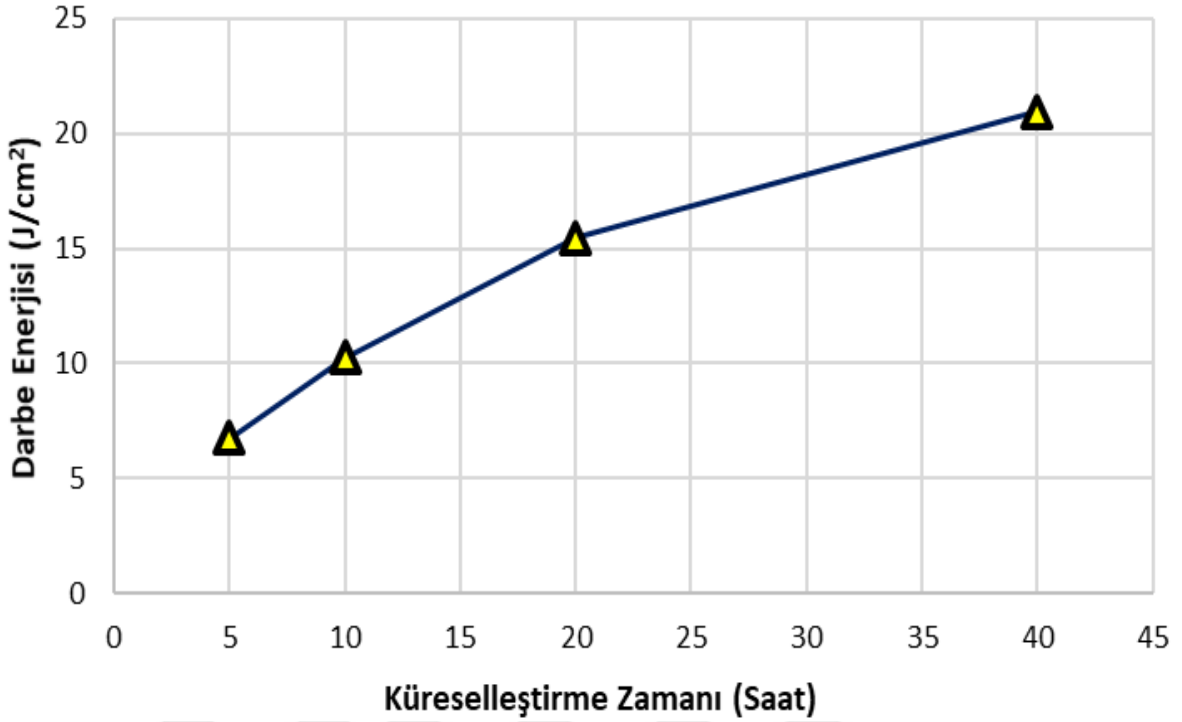
Küreselleştirme Süresi	Darbe Enerjisi (J/cm <sup>2</sup> )
5 saat	6.74
10 saat	10.25
20 saat	15.45
40 saat	20.95

**Çizelge 7.9.** SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişimi

Küreselleştirme Süresi	Darbe Enerjisi (J/cm <sup>2</sup> )
5 saat	10.04
10 saat	12.27
20 saat	17.05
40 saat	25.09



**Şekil 7.15.** KK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişim grafiği



Şekil 7.16. SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı darbe enerjisi değişim grafiği

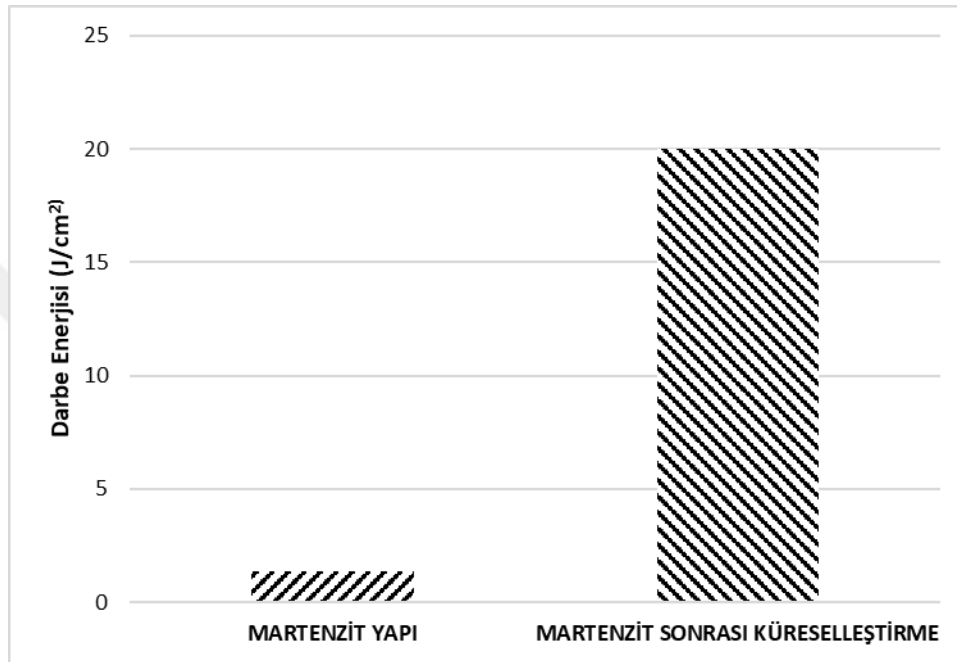
Sinterleme sonrası darbe tokluk değeri  $3.57 \text{ J/cm}^2$  olarak ölçülen toz metal çelik numunelerin ısıl işlemler darbe tokluklarında değişimler beklenmektedir. Şekil 7.15’de verilen KK numunesinin darbe toklukları incelendiğinde 5 saatlik ısıl işlem sonunda  $6.74 \text{ J/cm}^2$  olarak ölçülen darbe tokluk değerinin 40 saatlik küreselleştirme ısıl işlem sonunda  $20.95 \text{ J/cm}^2$  değerine kadar arttığı görülmektedir. Buna ek olarak Şekil 7.16’de verilen SK numunesinin darbe tokluklarına bakıldığında ise 5 saatlik ısıl işlem sonunda  $10.04 \text{ J/cm}^2$  olarak ölçülen değerin 40 saatlik ısıl işlem sonrasında  $25.09 \text{ J/cm}^2$  değerine kadar arttığı görülmektedir.

SK ve KK numuneleri karşılaştırıldığında; SK numunesinin darbe tokluğunun daha fazla olduğunu net olarak gözlemlenmektedir. Buna ek olarak her iki numunede de artan küreselleşme zamanına bağlı olarak darbe enerjisinin de arttığı söylemek mümkündür.

$900^\circ\text{C}$ ’de tamamen östenit yapıya ulaştıktan su ortamında sertleştirme işlemi uygulanarak martenzit yapı oluşturulan numunenin ve daha sonrasında 5 saatlik ısıl işlem uygulanan numunenin darbe tokluk değerleri Çizelge 7.10’de ve Şekil 7.17’ de verilmiştir.

**Çizelge 7.10.** Martenzit yapı ve martenzit yapı sonrası küreselleştirmeye bağlı darbe enerjisi değişimi

	Darbe Enerjisi (J/cm <sup>2</sup> )
Martenzit yapı	1.35
Martenzit sonrası 5 saat küreselleştirme	20.01



**Şekil 7.17.** Martenzit yapı ve martenzit yapı sonrası küreselleştirmeye bağlı darbe enerjisi değişim grafiği

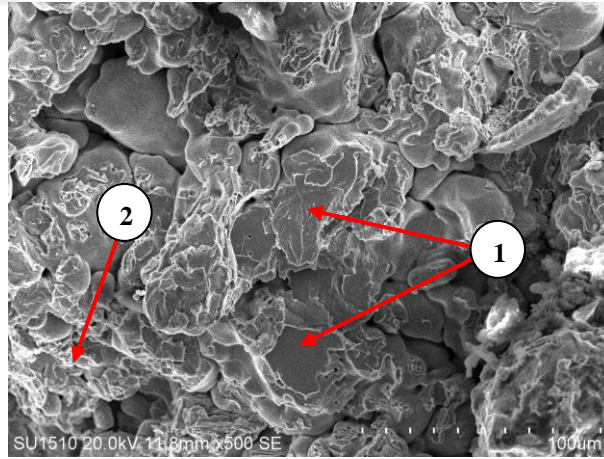
Şekil 7.17 te verilen grafik incelendiğinde su verme işlemi sonrası oluşan martenzit yapının darbe tokluğu 1.35 J/cm<sup>2</sup> olarak ölçülmüştür ancak 5 saatlik ısı işlem sonunda darbe tokluğu 20.01 J/cm<sup>2</sup> değerine kadar artış göstermiştir.

Tüm grafikler göz önüne alındığında küreselleşme süresinin artışı ile numunelerin darbe tokluğu değerlerinde artış görülmüştür. Sertlik değerleri ile yapılan kıyaslama neticesinde; numunelerin darbe enerjileri ile sertlik değerleri arasında ters orantı olduğu gözlemlenmiştir.

### 7.4.2. Kırık Yüzey İncelemeleri

Darbe testleri sonrası numunelerin kırık yüzey SEM görüntüleri alınmıştır. Kırık yüzey morfolojileri incelendiğinde malzemelerin sünek-gevrek davranışları hakkında bilgi edinmek mümkündür [47].

Bu kapsamda Şekil 7.18’de sinterleme sonrası (ısıl işlemsiz) numunenin kırık yüzey SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, 1 numaralı bölgede pürüzsüz parlak bir yüzey görünmektedir ve bu yüzey numunenin gevrek kırılma davranışı sergilediğini göstermektedir [48]. Buna ek olarak 2 numaralı bölgede kırılma yüzeyi kısmen lifli ve pürüzlü bir yapıya sahiptir. Bu yapıya bakıldığında numunenin kısmen sünek olduğunu söylemek mümkündür. Bu tarz kırık yüzey morfolojileri incelendiğinde gevrek kırılma aniden ve herhangi bir uyarıcı belirti göstermeden gerçekleşirken sünek kırılma öncesi yüksek oranda plastik deformasyon meydana gelir [48]. Sinterleme sonrası ısıl işlemsiz numunenin SEM görüntüsünde özellikle mikro çukurcukların olduğu bölgelerde çoğunlukla plastik deformasyonun etkisini görmek mümkün olmaktadır.



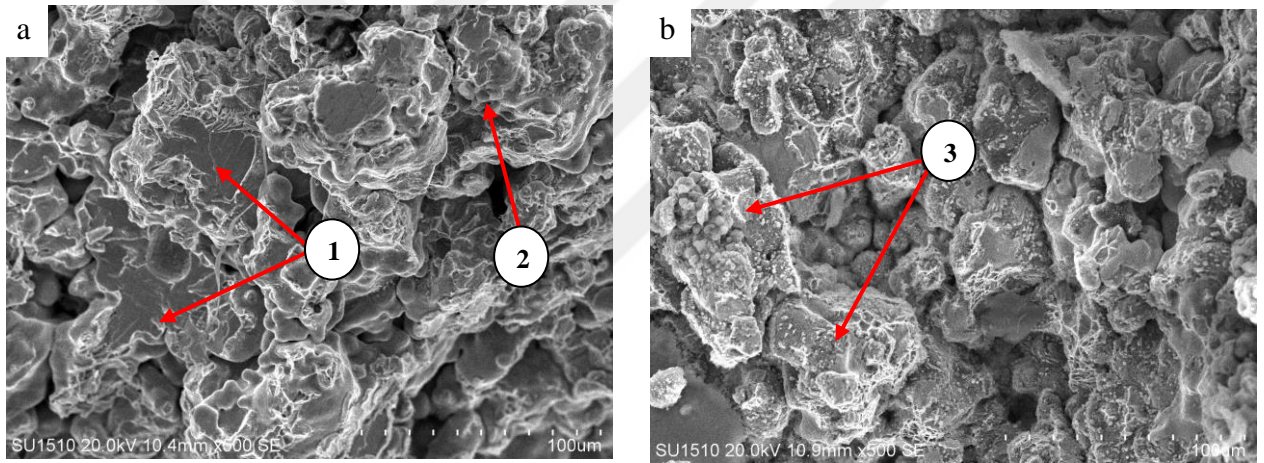
Şekil 7.18. Sinterleme sonrası kırık yüzey SEM görüntüsü

KK olarak kodlanan ve  $Ac_1$  çizgisinin altındaki sıcaklıkta farklı sürelerde ısıl işlem uygulanan deney numunelerinin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 7.19’de verilmiştir.

Şekil 7.19 (a)’da 5 saat ısıl işlem uygulanan KK deney numunesinin kırık yüzey SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, 1 numaralı bölgelerde

gevrek kırılma davranışından kaynaklanan düz yüzeyler görülmektedir. 2 numaralı bölgede ise sünek kırılma davranışından kaynaklanan pürüzlü yapılar görülmektedir. Sinterleme sonrası kırık yüzey SEM görüntüsüne kıyasla gevrek kırılma gerçekleşen bölgelerin alanında kısmen azalma sünek kırılma gerçekleşen bölgelerin alanında ise artış gözlemlenmiştir.

40 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan KK numunesinin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 7.19 (b)'de verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde, 5 saat ısıl işlem uygulanan deney numunesine göre gevrek kırılma davranışı görülmemektedir. 3 numaralı bölgelerde sünek kırılma davranışı gözlemlenmiştir. Bu durumda ısıl işlem süresinin artışıyla sünek kırılma davranışının arttığını söylemek mümkündür. Bu durum artan ısıl işlem süresine bağlı olarak artan darbe enerjisi sonucu ile de örtüşmektedir.



Şekil 7.19. KK numunesinin küreselleştirme zamanına bağlı kırık yüzey SEM görüntüleri;  
a)5 saat b)40 saat

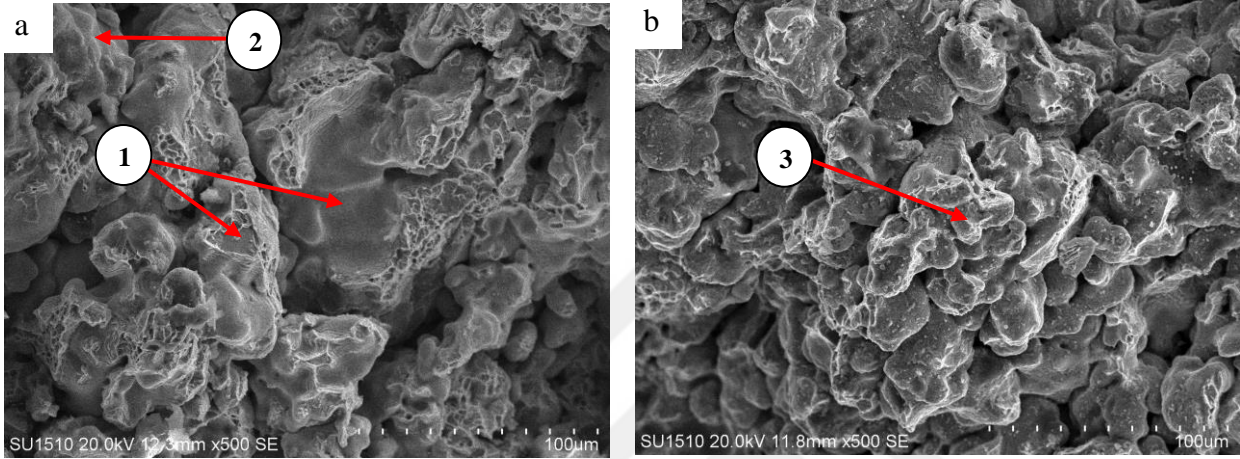
Salınımlı olarak  $Ac_1$  sıcaklığının altında ve üstünde ( $700^{\circ}C-740^{\circ}C$ ) farklı sürelerde ısıl işlem uygulanan ve SK olarak kodlanan deney numunelerinin kırık yüzey SEM görüntüleri Şekil 7.20'de verilmiştir.

5 saat ısıl işlem uygulanan SK numunesinin kırık yüzey SEM görüntüsü Şekil 7.20 (a)'da verilmiştir.1 numaralı bölgelerde gevrek kırılma davranışı görülmektedir. Buna ek olarak 2 numaralı bölgelerde ise sünek davranış sergilenmektedir.

Şekil 7.20 (b)'de 40 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmış SK deney numunesinin kırık yüzey SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde

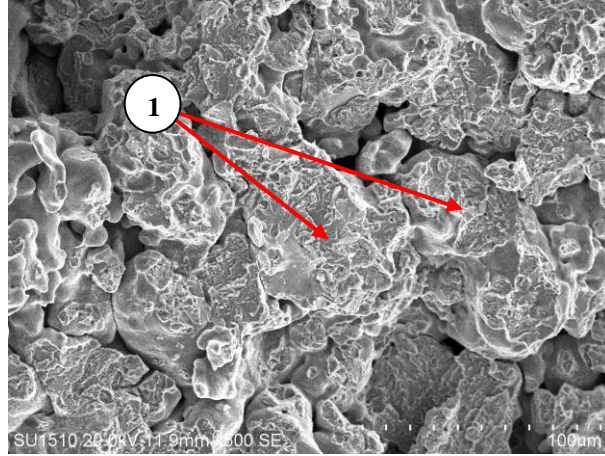
gevrek kırılma davranışının neredeyse tamamen yok olduğu görülmektedir. 3 numaralı bölgede sünek kırılma davranışı sergilenmektedir.

Bu SEM görüntüleri göz önünde alındığında SK deney numunesinin artan ısı işlem zamanına bağlı olarak gevrek kırılma davranışının azaldığını söylemek mümkündür.



**Şekil 7.20.** SK numunesinin küreselleşme zamanına bağlı kırık yüzey SEM görüntüleri; a)5 saat b)40 saat

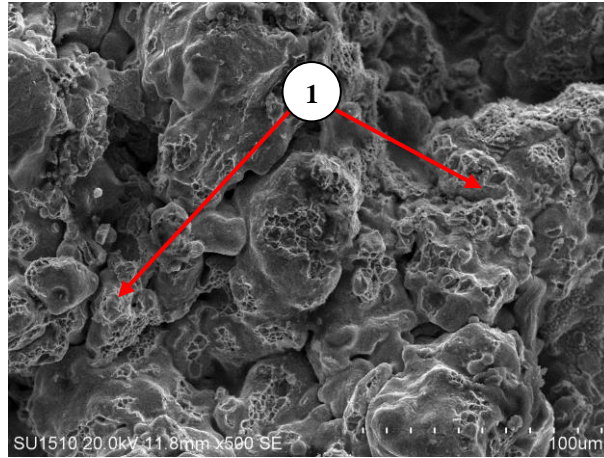
Şekil 7.21 de martenzitik deney numunesinin kırık yüzey SEM görüntüsü verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde martenzitik numunenin neredeyse tamamen gevrek davranış sergilediği söylenebilir (1 numaralı bölge) .Sünek kırılma davranışı yok denecek kadar azdır. Gevrek kırılma davranışından dolayı martenzitik yapıda bulunan malzemeler endüstriyel olarak işlenmeye uygun değildir [27]. Bu nedenle martenzitik yapıda bulunan malzemelere farklı ısı işlemler uygulanır ve endüstriyel olarak işlenebilir hale getirilebilir.



**Şekil 7.21.** Su verme işlemi sonrası martenzitik yapı kırık yüzey SEM görüntüsü

Martenzitik numuneye  $A_{c1}$  sıcaklığının altında  $700^{\circ}\text{C}$  sıcaklıkta 5 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanması sonrasında kırık yüzey SEM görüntüsü Şekil 7.22’de verilmiştir. SEM görüntüsü incelendiğinde 1 numaralı bölgede martenzitik yapı sonrası görülen kırılma davranışının 5 saat küreselleştirme ısıl işlem sonrası çoğunlukla sünek kırılma davranışı sergilediği görülmektedir.

Verilen kırık yüzey SEM görüntüleri incelemeleri sonucunda sertlik değerlerinin artmasıyla gevrek kırılma davranışı arttığı görülmektedir.



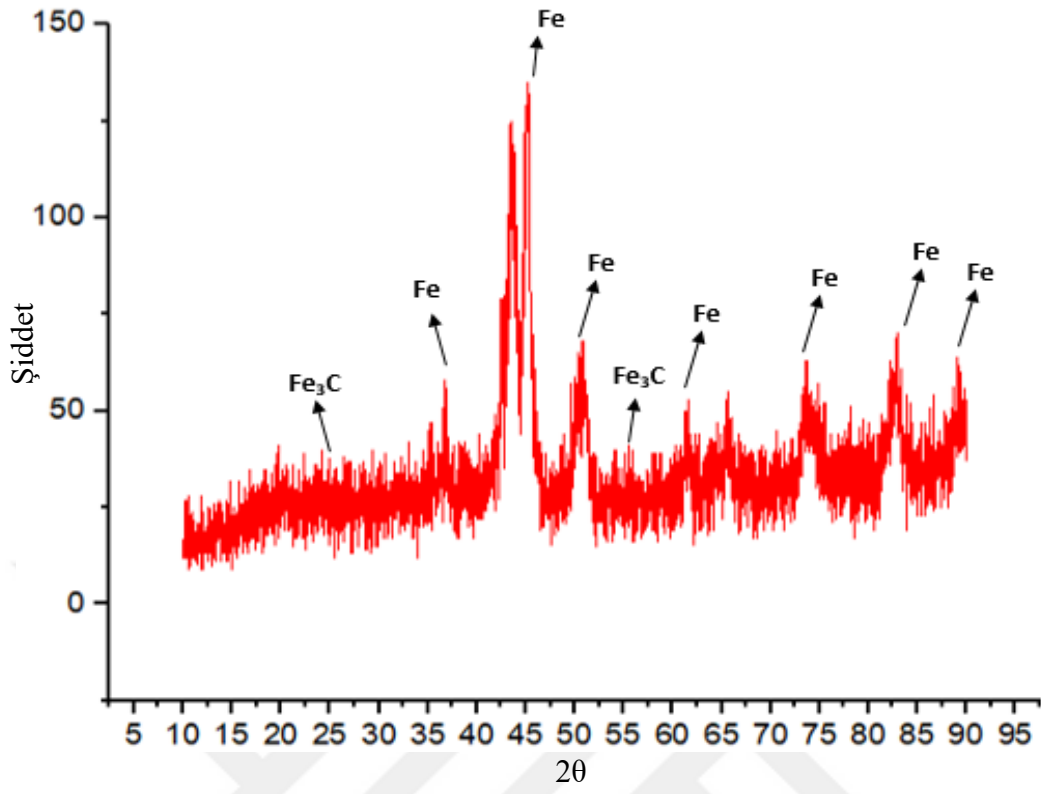
**Şekil 7.22.** Martenzit sonrası 5 saat küreselleştirme kırık yüzey SEM görüntüsü

## 7.5. XRD Sonuçları

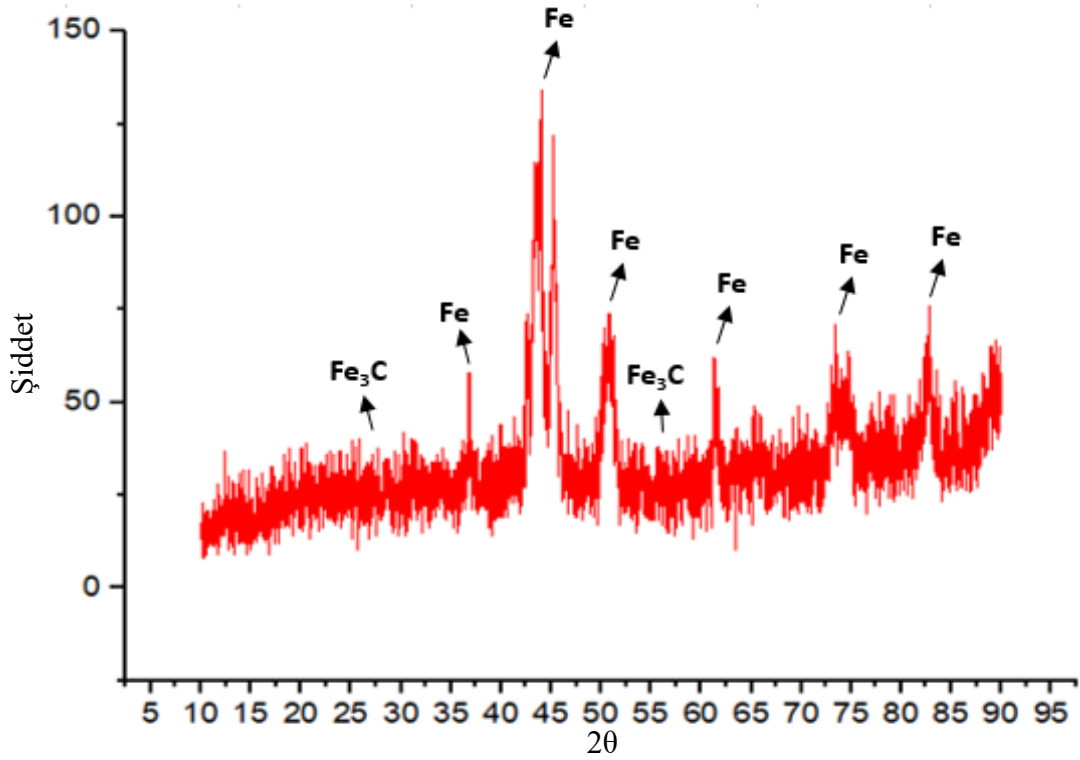
Farklı ısı işlemler uygulanan numunelerde yapılan XRD analizlerinde Fe-C arasındaki oluşabilecek fazların türü ve şiddetleri incelemiştir. Uygulanan XRD çalışmalarında Fe, C ve Fe<sub>3</sub>C gibi muhtemel fazların tespit edilmesi amaçlanmıştır. XRD analizleri numune üzerine gönderilen x ışını ile oluşan floresans x ışınları kristal spektrometre ile analiz edilerek farklı açılardan gelen pik şiddetlerine bağlı olarak malzeme elementleri ve konsantrasyonları belirlemeye yardımcı olmaktadır [49 ].

Deney numunelerine uygulanan XRD incelemelerinde piklerin boyutunda farklılıklar oluşmasının sebebi uygulanan akımın şiddeti ve ilerleme hızına bağlı olabilmektedir. Tepeciklerin yeterli seviyeye ulaşamamasının muhtemel sebebi uygulanan akım miktarının az ilerleme miktarının hızlı olmasındandır. Bu kapsamda deney numunelerine uygulanan XRD analiz sonuçları Şekil 7.23-7.29' da verilmiştir. Verilen grafikler incelendiğinde numunelerde daha az uygulanan şiddet neticesinde Fe<sub>3</sub>C fazlarının çökeldiği görülmektedir. Şekil 7.4'te verilen sinterleme sonrası deney numunesinin SEM görüntüsü incelendiğinde sementit ağ yapısıyla çevrili perlitik yapının varlığı bilinmektedir. Bu deney numunelerine SK ve KK olarak kodlanan farklı küreselleştirme ısı işlemleri uygulanması sonucu küresel sementit ağlarının varlığı bilinmektedir (Şekil 7.5-Şekil 7.6). Bu küresel sementitlerin oluşumundan dolayı sementit piklerinin oluşması beklenmektedir.

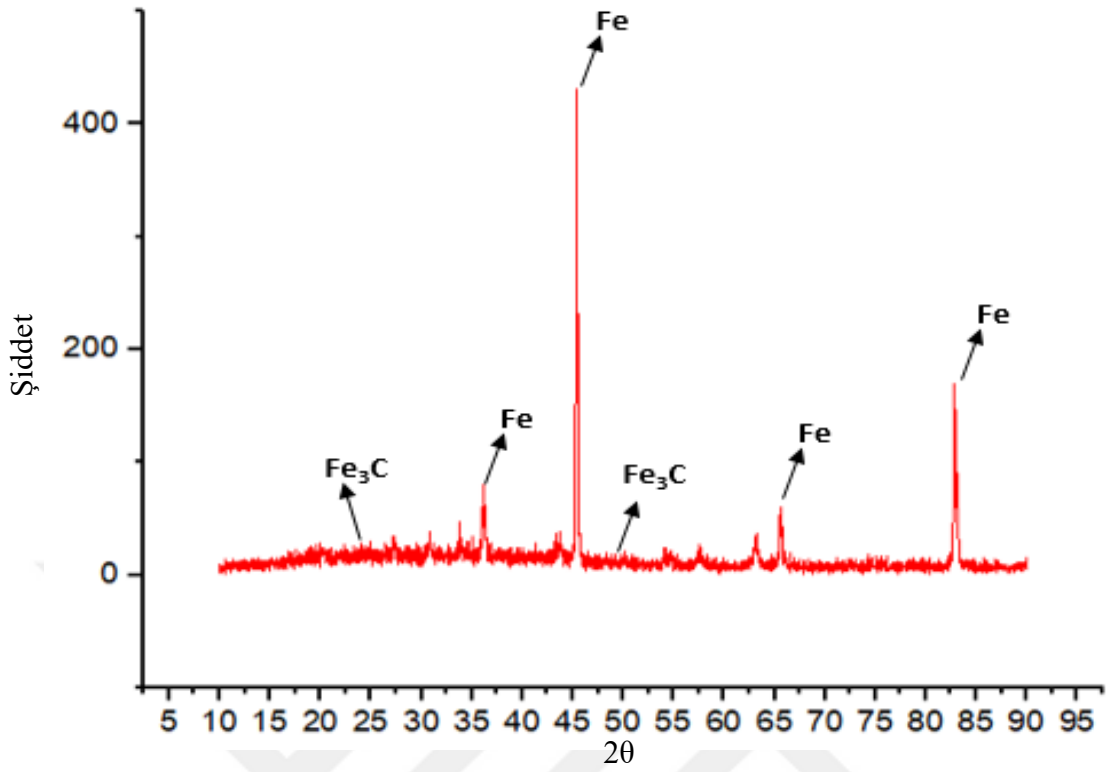
MSK olarak kodlanan bir diğer ısı işlem türünde ise öncelikle martenzitik yapı elde edilmiştir. Martenzit yapıdan küresel sementitler oluşturmak hedeflendiği için MSK numunesinin XRD analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde MSK olarak kodlanan numunelerin içerisinde sementit (Fe<sub>3</sub>C) yapıların varlığı görülmüştür.



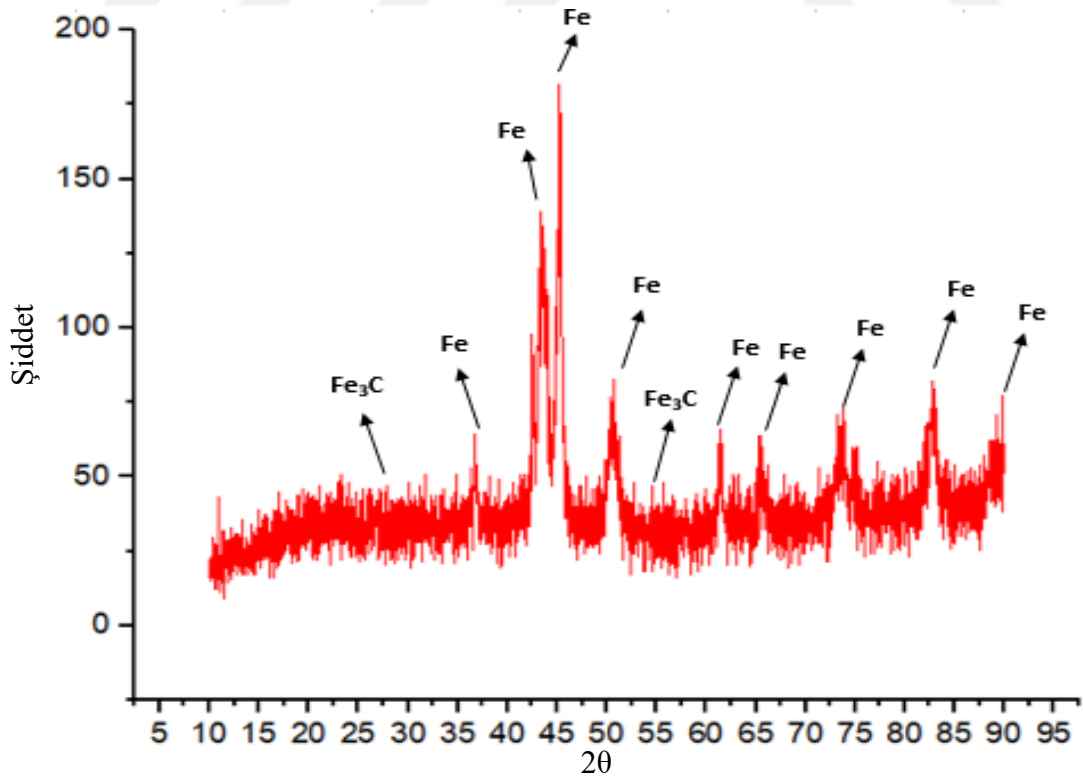
Şekil 7.23. Sinterleme sonrası (ısıtılmış) numunesine ait XRD grafiği



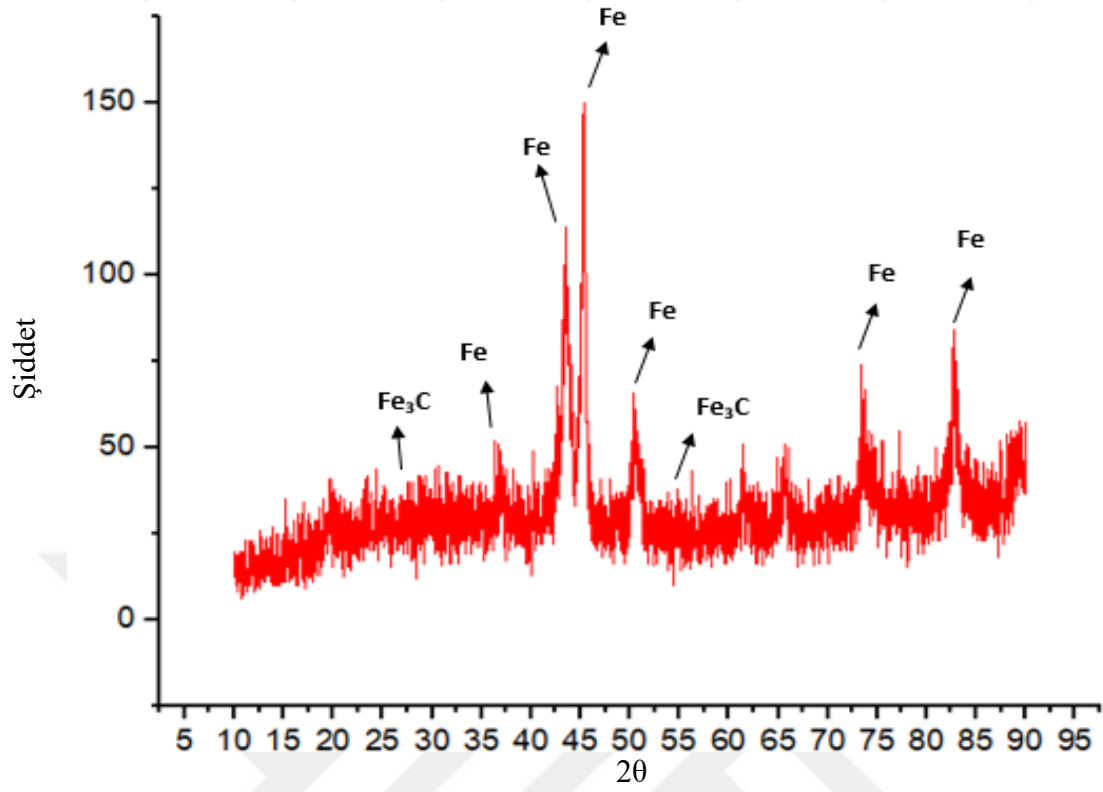
Şekil 7.24. 5 saat küreselleştirme ısıtılmış numunesine ait XRD grafiği



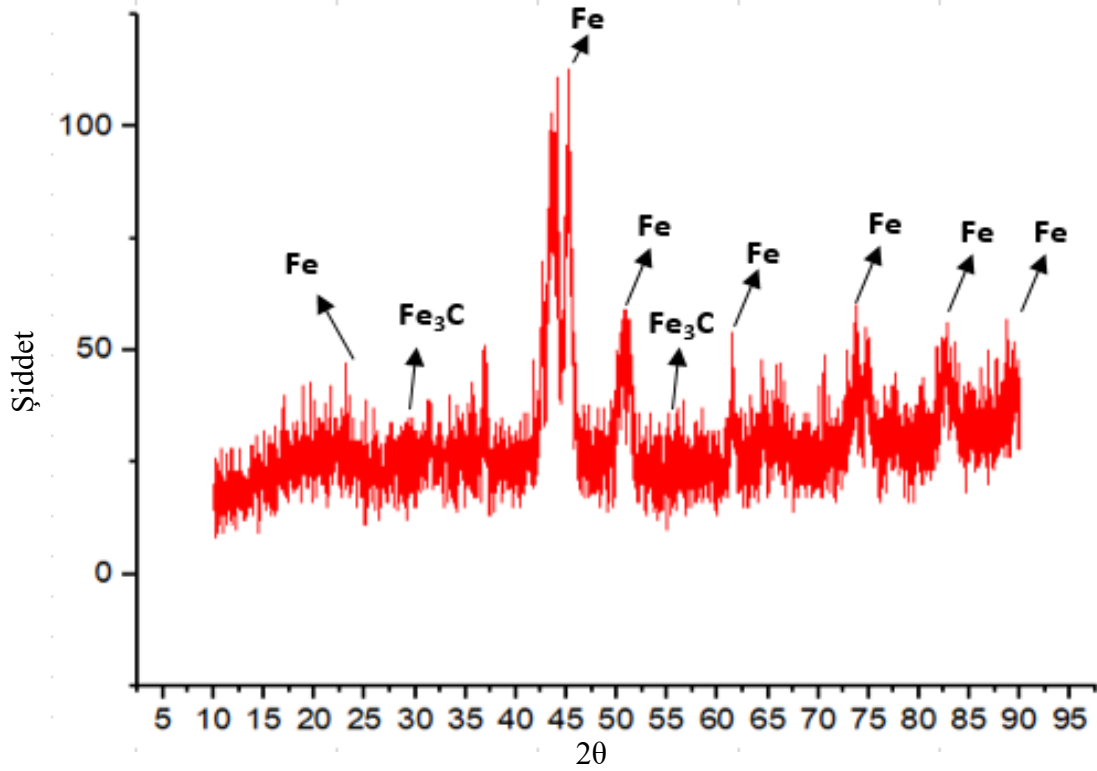
Şekil 7.25. 40 saat küreselleştirme ısı işleminin uygulanmış KK numunesine ait XRD grafiği



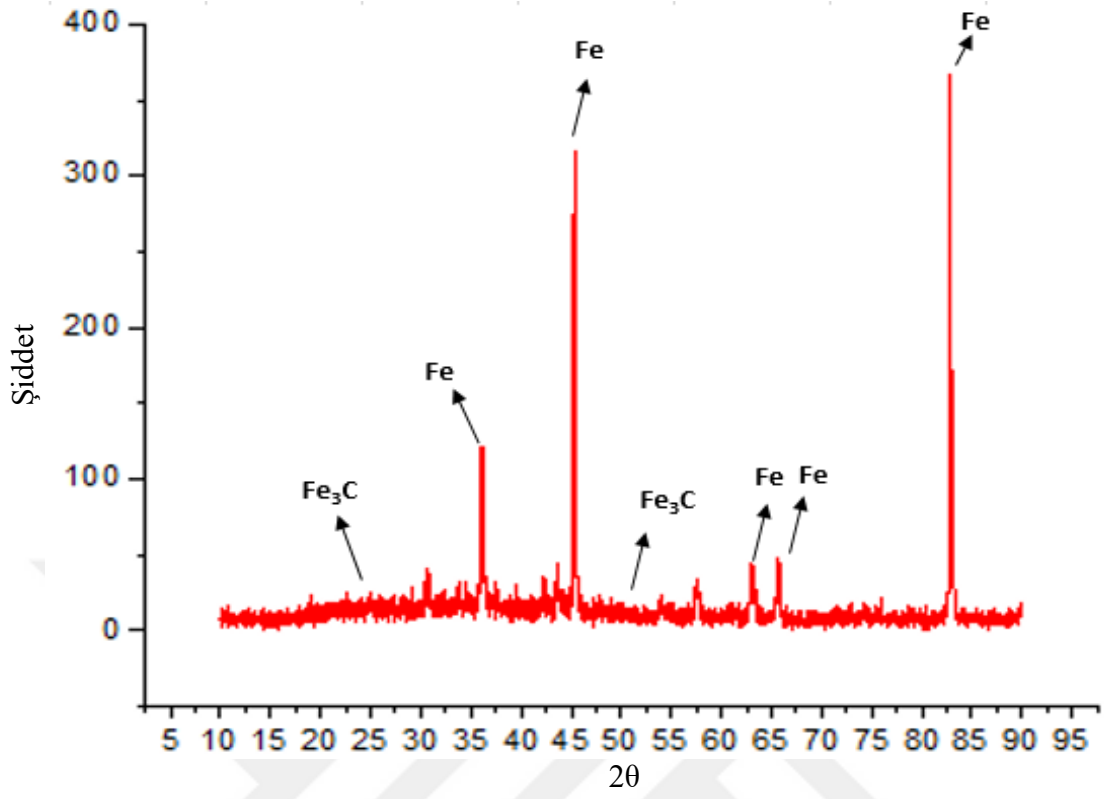
Şekil 7.26. 5 saat küreselleştirme ısı işleminin uygulanmış SK numunesine ait XRD grafiği



Şekil 7.27. 40 saat küreselleştirme ısı işleminin uygulanmış SK numunesine ait XRD grafiği



Şekil 7.28. Martenzitik numuneye ait XRD grafiği



Şekil 7.29. 5 saat küreselleştirme ısııl işleme uygulanmış SK numunesine ait XRD grafiği

## 8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 8.1. Sonuçlar

Yapılan çalışmada sırasıyla 3 farklı ısıl işlem metodu uygulanmıştır. İlk olarak Demir - Karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında bulunan Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında olan 700 °C sıcaklıkta, 5-10-20-40 saat olarak uygulanan klasik küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. İkinci olarak; Demir-Karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında bulunan Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında ve üstünde (700 °C ve 740°C) 5-10-20-40 saat salınımlı küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Son olarak endüstriyel uygulamaların dışında, numunelere su verme işlemi takiben küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu ısıl işlemde numuneler 900 °C sıcaklıkta 5 dk bekletilmiştir. Tamamen östenit yapı sağlandıktan sonra suda su verme işlemi uygulanarak martenzit yapısı elde edilmiştir. Bu işlem sonrasında demir-karbon (Fe-Fe<sub>3</sub>C) denge diyagramında bulunan Ac<sub>1</sub> sıcaklık çizgisinin (723°C) altında 700 °C sıcaklıkta 5-10-20 saat olarak küreselleştirme ısıl işlemi uygulanmıştır. Bu ısıl işlem uygulamalarına göre elde edilen sonuçlar şu şekilde sıralanmıştır;

- Sinterleme ve presleme sonrasında numunelerin yoğunluk ölçümlerinde değişimler gerçekleşmiştir. Presleme ve sinterleme sonrası yoğunluk ölçümleri sırasıyla 7.22 g/cm<sup>-3</sup> ve 7.74 g/cm<sup>-3</sup> şeklindedir. Sinterleme işleminde amaçlandığı gibi yoğunluk artışı gerçekleşmiştir.
- Farklı ısıl metotları uygulanması sonucu mikroyapı incelemelerinde farklılıklar tespit edilmiştir. KK ve SK numunelerinin SEM görüntüleri incelemeleri sonucunda, ısıl işlem süresinin artışıyla sementitlerin ağ yapısının küreselleşme eğiliminin arttığı görülmektedir.
- MSK olarak kodlanan martenzit sonrası küreselleştirme ısıl işlem metodunda artan zamanla birlikte küresel sementit yapılarının büyüdüğü belirlenmiştir. Bu nedenle en homojen küresel sementit ağ dağılımı 5 saat küreselleştirme ısıl işlemi uygulanan MSK numunesinde gerçekleşmiştir.

- Farklı ısıt işlemler uygulanan numunelerde mikro ve makro sertlik ölçümleri neticesinde artan küreselleşme zamanına bağlı olarak toz metal çelik deney numunelerinin sertliklerinde azalma meydana gelmiştir.
- KK deney numunesinin 5 saat küreselleştirme ısıt işleml sonrası 91.7 HV2 ve 94.5 HB olarak ölçülen mikro sertlik ve makro sertlik değerleri sertlik değerleri, 40 saat küreselleştirme ısıt işleml sonunda 60.75 HV2 ve 61.9 HB olarak ölçülmüştür.
- SK deney numunesinin 5 saat küreselleştirme ısıt işleml sonrası sırasıyla 79.4 HV2 ve 78.5 HB olarak ölçülen mikro sertlik ve makro sertlik değerleri, 40 saat küreselleştirme ısıt işleml sonunda 51.4 HV2 ve 49.1 HB olarak ölçülmüştür.
- Su verme işleml sonrası martenzitik deney numunesin mikro sertlik ve makro sertlik sırasıyla 732.8 HV2 ve 253.2HB olarak ölçülmüştür. Elde edilen sertlik değerleri son derece yüksektir.
- Su verme işleml sonrası 5 saat küreselleştirme ısıt işleml uygulanan MSK deney numunesinin 100.8 HV2 ve 100.7 HB olarak ölçülen mikro sertlik ve makro sertlik değerleri, 20 saat küreselleştirme ısıt işleml sonunda 60.9 HV2 ve 63.1 HB olarak ölçülmüştür.
- Farklı küreselleştirme ısıt işleml uygulanmış tüm numunelerde artan küreselleşme zamanına bağlı olarak darbe dirençleri artmıştır.
- SK ve KK numuneleri karşılaştırıldığında; 40 saat ısıt işleml uygulanan KK numunesinin darbe tokluk değeri  $20.95 \text{ J/cm}^2$  olarak ölçülürken 40 saat ısıt işleml uygulanan SK numunesinin darbe tokluk değeri  $25.09 \text{ J/cm}^2$  olarak ölçülmüştür.
- KK ve SK numunelerine kıyasla MSK numunelerinin darbe tokluk değerleri daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.
- Kırık yüzey SEM görüntüleri incelemeleri sonucu farklı ısıt işleml uygulanan deney numunelerinin gevrek ve sünek kırılma davranış farklılıkları tespit edilmiştir.

- 5 saat küreselleştirme ısı işlem uygulanan KK ve SK numunelerinin kısmen gevrek kırılmanın yanı sıra sünek kırılma davranış gösterdiği tespit edilmiştir.
- 40 saat küreselleştirme ısı işlem uygulanan KK ve SK numunelerinin kırılma davranışı incelendiğinde gevrek kırılma davranışlarının neredeyse yok olduğu görülmüştür. Kırık yüzeyler incelendiğinde genel olarak sünek kırılma davranışının varlığı belirlenmiştir.
- 5 saat küreselleştirme ısı işlemi uygulanan MSK numunesinde ise neredeyse tamamen sünek kırılma davranışı görülmüştür.
- XRD incelemeleri neticesinde küreselleştirme ısı işlemleri sonucunda Fe<sub>3</sub>C ve Fe<sub>3</sub>C piklerinin varlığı tespit edilmiştir.

## 8.2 Öneriler

1. Bu deneysel çalışmada yer verilen çelik malzemede 1.2 C oranın yansıra daha yüksek C içeriği test edilerek malzeme mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine incelemeler yapılabilir.
2. Uygulanılan küreselleştirme ısı işlem sıcaklık ve sürelerinin yanısıra aynı C içeriğinde farklı ısı işlem sıcaklık ve süreleri test edilebilir.
3. Çalışılan çelik malzeme benzer C içeriğine ilave olarak alaşım elemanı takviyesi ile malzeme mikroyapı ve mekanik özellikleri araştırılabilir.
4. Küreselleştirme ısı işlem zamanı artırılarak perlit ve sementit yapılarının küreselleşme eğilimlerinin artışı incelenebilir.
5. Bu çalışmada numunelerin sadece sertlik ve darbe özellikleri incelenmiştir. Çekme, yorulma, aşınma gibi diğer mekanik performansları da incelenebilir.
6. Endüstriyel uygulamalarda bu tip çalışmaların cazip hale gelebilmesi için özellikle M serisi numunelerde su verme işlemleri sinterleme işlemleri sırasında uygulanabilir. Bu da uygulama süresini azaltabilir.
7. Sementit ve ısı işlem şartlarına bağlı olarak oluşması muhtemel fazların küreselleşme tavrının ortaya çıkarılabilmesi adına ileri malzeme karakterizasyon teknikleri ile çalışmalar yürütülebilir.
8. Çelik malzeme mekanik özellikleri üzerinde etkili olan kırılma davranışı üzerinde ısı işlem etkisinin daha detaylı olarak incelenebileceği önerilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] German, Randall M. (2007) “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri ” ISBN: 978 97592463-2-7, Uyum Ajans, Ankara. (R.M. German`in “Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing” isimli kitabın Türkçe Tercümesidir. Orijinal kitabın ISBN: 0-9762057-1-8, Metal Powder Industries Federation, 2005-USA.)
- [2] Turan, H., 1993, Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi, Yüksek Lisans Tezi , Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [3] Ünal, R., 1995, Gaz atomizasyonu ile metal tozu üretimi değişkenlerinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Ankara.
- [4] Sarıtaş, S., 1994, Toz metalurjisi, Makine müh. el kitabı, MMO, 2.Baskı, I.Cilt.
- [5] <http://www.turktoz.gazi.edu.tr>.
- [6] Ersümer, A., 1970, Toz metalurjisi sert metal sinterleme, İstanbul Teknik Üniversite Matbaası, İstanbul.
- [7] Kaysser W.A., and Rzesnitzek, K., 1990, Principles of atomization, Science of Sintering, Ed. D.P. Uskokovic, Plenum Press, 157 –174.
- [8] Lawley, A., 1977, An overview of powder atomization processes and fundamentals, Int. J. Powder Metallurgy & Powder Technology, 13(3), 169 – 188.
- [9] Champagne, B., Angers, R., Fiset, M., 1984, Characteristics of powders produced by rotating electrode process, MPR. [17] Rai, G., Lavernia, E., and Grant, N.J., 1985, Powder size distribution in ultrasonic gas atomization, J. Metals, 22 –26.
- [10] Klar, E., and Fesko, J.W., 1984, Production of metal powders, Metals Handbook, 9th ed. Vol. 7, Powder Metallurgy, 25 –51, Ohio.
- [11] David W.R. (1991) "Engineered Materials Handbook" Vol.4: Ceramics and Glasses, ISBN: 0-87170282-7, ASM International, Materials Park, Ohio, USA.
- [12] Uygur, E. M. “Toz Metalurjisi Seminer Notları” SEGEM 1986.
- [13] Ş. Karagöz, R. Yamaoğlu, “PREP Atomizasyonu ile Toz Üretim Karakteristiklerinin Belirlenmesi,” 12. Uluslararası Metalurji-Malzeme Kongresi, İstanbul, 2005.
- [14] Sarıtaş, S., Bilyalı Dövmenin Fe+%2Cu+%0,5C T/M Çeliğın Yorulma Dayanımına Etkisinin Araştırılması. Bildiri Kitabı. 2. Ulusal Toz Metalurjisi Konferansı, 519-527. Ankara,(1999).
- [15] Roll, K.H., “History of Powder Metallurgy”, Metals Handbook, 9th edition, ASM. Metal park, Ohio, 7: 1–110 (1984).

- [16] ATAŞ, A., “Alaşımli Demir Tozu Peletlerinin Sinterleme Sonrası Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü., F.B.E.
- [17] Özakça, M., “Mechanical Properties of Compacted and Sintered Powder Metallurgy Blanks”, Yüksek Lisans Tezi, Gaziantep Üniversitesi F.B.E.
- [18] Sağırılı, A., “Mekanik Ekzantrik Toz Metal Presi ve Toz Metal Teknolojisi”, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü (1990).
- [19] İnternet: TTMD – Türk Toz Metalurjisi Derneği Online Yayını “Toz Metalurjisi”, Türk Toz Metalurjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, [www.turktoz.gazi.edu.tr](http://www.turktoz.gazi.edu.tr), Ankara, (2003).
- [20]. Hatman, A., Karagöz, Ş., 7. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi “Su atomize CuZn42 alaşımı tozu üretimi ve su basıncının toz özelliklerine etkileri”, 553565, Ankara., (1993).
- [21] Prof. Dr. Ahmet Çetin Can “Malzeme Bilgisi”, Birsen Yayıncılık, İstanbul, 193-199 (2010).
- [22] William D. Callister "Malzeme Bilimi ve Mühendisliği"
- [23] Totten, G.E. “Steel Heat Treatment Equipment and Process Design”, Steel Heat Treatment Handbook, Second Edition, Portland State University, Portland, Oregon, U.S.A. 280-287 (2006).
- [24] Şefik Güleç "Malzeme Mühendisliği Ders Notları"
- [25] Aydoğdu, A., “Şekil hatırlamalı CuAlNi alaşımlarındaki martensitik dönüşümler üzerinde termal yaşlandırma etkileri”,Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ 5-8 (1995)
- [26] N. V. Luzginova, L. Zhao, and J. Sietsma, Metall. Mater. Trans. 39A, 513 (2008).
- [27] Savaşkan, T. “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Celepler Yayıncılık, Trabzon, 193-199 (2009).
- [28] Kesti, E. “Ç - 4140 Çeliğinin, Mikro Yapı Ve Mekanik Özelliklerine Su Verme Ortamının Etkilerinin Araştırılması” Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi,Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya (2009)
- [29] Sun, Jun-Jie & Lian, Fu-Liang & Liu, Hong-Ji & Tao, Jiang & Guo, Sheng-Wu & Du, Lin-Xiu & Liu, You-Ning. “Microstructure of warm rolling and pearlitic transformation of ultrafine-grained GCr15 steel.” Materials Characterization. 95. 291–298. 10.1016/j.matchar.2014.07.011. (2014).
- [30] M.A. Neri, R. Cola’s,, S. Valtierra “Effect of deformation on graphitization kinetics in high carbon steels.” Journal of Materials Processing Technology 83 (1998) 142–150

- [31] Onur ALTUNTAŞ ve Ahmet GÜRAL “Yüksek Karbonlu Sinterlenmiş Çeliklerin Darbe Tokluklarına Küreselleştirme Isıl İşlemlerinin Etkisinin İncelenmesi” Politeknik Dergisi, 2015; 18 (3) : 107-112 (2014).
- [32] Cheng JI, Lei WANG, Miao-yong “ZHU Effect of Subcritical Annealing Temperature on Microstructure and Mechanical Properties of SCM435 Steel” Journal Of Iron And Steel Research, International. 2015, 22(11): 1031-1036
- [33] S. Monia, A. Varshney, Gouthama, S. Sangal, S. Kundu, S. Samanta, and K. Mondal yong “Effect of Intercritical Temperature on the Structure Property Correlation of Multiphase High-C Spheroidized Steel” JMEPEG (2016) 25:623–634
- [34] S.L. Zhang, X.J.Sun, H. Dong “Effect of deformation on the evolution of spheroidization for the ultra high carbon steel” Materials Science and Engineering A 432 (2006) 324–332
- [35] Şehmus BADAY, Hüdayim BAŞAK, Ahmet GÜRAL “Küreselleştirme Isıl İşlemleri Uygulanmış Orta Karbonlu Çeliğin Mikroyapı ve Sertlik Değerlerinin İncelenmesi” Journal of Life Sciences; Volume 5 Number 1 (2015)
- [36] Yaşar Adalı, Can Kurnaz “5140 Çeliğinin Küreselleştirme Isıl İşlemi Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi” SAU Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 7 Cilt, 1.Sayı (Tv1art 2003)
- [37] Jia, Tao & Li, Meiyong & Pei, Xinhua & Wang, Zhaodong. (2018). On the Spheroidizing Annealing Behavior in Cr/Nb Microalloyed Medium Carbon Steels. steel research international. 10.1002/srin.201800353.
- [38] Guo, W.Y.,Li j., Jiang X.F., “Subcritical Spheroidization of Medium Carbon 50CrV4 Steel” ASM International (2012) 21:1003–1007
- [39] Hakan Gökmeşe, Bülent Bostan “AA 2014 Alaşımında Presleme ve Sinterlemenin Gözenek Morfolojisi ve Mikroyapısal Özelliklere Etkileri” Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji GU J Sci Part:C 1(1):1-8 (2013)
- [40] Emre Avşar, Nuri Durlu, Aytaç Ataş, Cengiz Bozacı, Hüsnü Özdural “Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Sinterleme İle Birleştirilmesi” Gazi Üniv. Müh. Mim. Fak. Der. Cilt 25, No 4, 713-718, 2010
- [41] Mehmet Akif Erden “Presleme Basıncının Toz Metalürjisi İle Üretilen Alaşimsız Çeliklerin Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi” Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, Cilt 6, Sayı 1, (2017), 257-264
- [42] Budinski, K.G., Budinski, M.K., “Engineering Materials Properties and Selection.” Pearson Publications, New Jersey, (2010) 417 p
- [43] Agrawal, B.K., Introduction to Engineering Materials. Tata McGraw-Hill, Yeni Delhi, 353 p. (2008)
- [44] Şahin, S.. Malzeme Bilgisi. Şafak Matbaası, Ankara, 230 s (1997)

- [45] Karabulut, H., MEGEP Metal teknolojisi ısıl işlemler ders notları , Ankara, 40s. (2005-2006)
- [46] Çelik, O.N., Malzeme bilgisi ve Isıl işlem eğitim semineri, 330s., 55-64, 110-129. (Mart 2010)
- [47] Bartın Üniversitesi “Malzeme 1 Hasar ve Kırılma Ders Notları”
- [48] Prof.Dr. İrfan AY “Kırılma Mekaniği Ders Notları”
- [49] Dr. Öğr. Üyesi. Hülya Kaftelen “Malzeme Karakterizasyonu Yöntemlerinin Genel Tanımı”
- [50] Kwan-Ho Kim\*, Jae-Seung Lee, and Duk-Lak Lee “Effect of Silicon on the Spheroidization of Cementite in Hypereutectoid High Carbon Chromium Bearing Steels”Met. Mater. Int., Vol. 16, No. 6 (2010), pp. 871~876
- [51] M.W. Wu , L.C. Tsao , G.J. Shu , B.H. Lin “The Effects Of Alloying Elements And Microstructure On The Impact Toughness Of Powder Metal Steels” Materials Science and Engineering A 538 (2012) 135–144
- [52] Mehmet Akif Erden “Toz Metalurjisi Yöntemiyle Üretilen Mikroalaşım Çeliklerinin Mikroyapı Mekanik Özellik İlişkisinin Araştırılması” (2015) Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Doktora Tezi
- [53] Mustafa Çağrı ÖZKADER “Isıl İşlemlerli AISI 4140 Çeliğinin Abrasif Aşınmasının Araştırılması” (2015) Hitit Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi Makina Mühendisliği

## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Hacer TAŞDÖĞEN  
**Uyruğu** : T.C.  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : Seydişehir / 06.02.1995  
**Telefon** : 05497389199  
**Faks** : --  
**e-mail** : hacertasdogen@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Adil Karaağaç Anadolu Teknik Lisesi (Selçuklu/ KONYA)	2013
Üniversite	: Necmettin Erbakan Üniversitesi/ Makine Mühendisliği	2017
Yüksek Lisans	:	
Doktora	:	

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2017	Endostar İç ve Dış Tic. Ltd. Şti.	Makine Mühendisi

**UZMANLIK ALANI:** Makine Mühendisliği

**YABANCI DİLLER:** İngilizce

**BİLDİRİLER:** Hakan GÖKMEŞE Ve Hacer TAŞDÖĞEN “Effect On Microstructure And Mechanical Properties In Powder Metal High Carbon Steel Of Spheroidizing Heat Treatment Conditions ” Presented at The International Conference on Metarials Science Technology İn Cappadocia (Imsmatec’18) Septemper 17-19, 2018, Nevşehir,Turkey

**BURSLAR:** BAP 181351004 nolu proje