



**ARAKRİTİK ÖSTENİTLEME VE HAVADA SOĞUTMA ISIL
İŞLEMLERİNİN KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPI
VE MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ**

Kutay KAYAALP

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

HAZİRAN 2021

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Kutay KAYAALP

25/06/2021

ARAKRİTİK ÖSTENİTLEME VE HAVADA SOĞUTMA ISIL İŞLEMLERİNİN
KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRİN MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİ
(Yüksek Lisans Tezi)

Kutay KAYAALP

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2021

ÖZET

Bu çalışmada, farklı sıcaklıklarda yapılan arakritik östenitleme + havada soğutma ısıtma işleminin Küresel Grafitli Dökme Demirin (KGDD) mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, çekme numuneleri Y blok küresel grafitli dökme demirden işlenerek hazırlanmıştır. Numuneler 770°C, 780°C, 790°C, 800°C, 810°C ve 820°C’de 1 saat östenitlemenin ardından havada soğutulmuşlardır. Mikroyapı karakterizasyonu için optik mikroskop ve kırık yüzey analizi için taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Mekanik özellikler çekme ve sertlik testleri yapılarak belirlenmiştir. Deneysel sonuçlar, artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile perlit hacim oranının arttığını göstermiştir. Ek olarak, perlit hacim oranının artması ile çekme dayanımında ve sertlik değerlerinde artış görülmüştür. Ancak toplam uzama, kesit alanı daralması ve kırılma enerjisi değerlerinin ise artan arakritik sıcaklıkla azaldığı tespit edilmiştir. Kırık yüzey analizleri sonucunda artan arakritik sıcaklıkla yüzeydeki çukurcukların (dimple) azaldığı gözlenmiştir. Çukurcukların azalması sünekliğin azaldığı şeklinde de yorumlanmıştır. Sabit bir kimyasal kompozisyona sahip KGDD’de arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutma ile değişik hacim oranlarında perlit içeren KGDD üretilmektedir. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutulmuş KGDD’lerin mekanik özellikleri ilgili ASTM standartlarıyla karşılaştırıldığında, östemperlenmiş KGDD’ler ile dökülmüş koşullardaki ferritik/perlitik KGDD’ler arasında çekme ve toplam uzama değeri sergilemektedirler.

Bilim Kodu : 91519
Anahtar Kelimeler : Küresel grafitli dökme demir, arakritik östenitleme sıcaklığı, havada soğutma, perlit hacim oranı
Sayfa Adedi : 45
Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Volkan KILIÇLI

EFFECT OF INTERCRITICAL AUSTENITIZING AND AIR COOLING HEAT
TREATMENTS ON MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF
DUCTILE CAST IRON

(M. Sc. Thesis)

Kutay KAYAALP

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

June 2021

ABSTRACT

In this study, the effect of the intercritical austenitizing temperature and air cooling on the microstructure and mechanical properties of ductile iron was investigated. For this purpose, samples were prepared by machining from Y block ductile iron castings. The samples were air-cooled from intercritical austenitizing temperatures at 770°C, 780°C, 790°C, 800°C, 810°C, and 820°C for 1-hour. Optical microscope was used for microstructural characterization and scanning electron microscope (SEM) was used for analyzing fracture surface of samples. Tensile and hardness tests were conducted in order to determine the mechanical properties. Experimental results showed that pearlite volume fraction increased with increasing intercritical austenitizing temperatures. Moreover, the hardness and tensile strength increased with increasing pearlite volume fraction. However, total elongation, reduction in area and energy at break values decreased with increasing intercritical austenitizing temperatures. Fracture surface analysis showed that the number of dimples regions decreased with increasing intercritical austenitizing temperatures. This can be explained as ductility decreased as well. Ductile cast irons which have different pearlite volume fraction can be produced by controlling intercritically austenitizing in the same chemical composition. When mechanical properties of intercritically austenitized and air cooled nodular cast irons compared with relevant ASTM standards, it can be seen that tensile and total elongation values take place between austempered ductile irons and as cast ferritic/pearlitic ductile irons.

Science Code	: 91519
Key Words	: Ductile cast iron, Intercritical austenitizing temperature, Air cooling, Pearlite volume fraction
Page Number	: 45
Supervisor	: Assist. Prof. Dr. Volkan KILIÇLI

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren,engin bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Volkan KILIÇLI'ya teşekkür eder, saygılarımı sunarım.

Deneysel çalışmalarım esnasında Isıl işlem, Mekanik testler ve Metalografi laboratuvarlarının altyapısından faydalandığım Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na ve çalışmalarım boyunca katkılarından dolayı Öğr. Gör. Ömer ŞAHİN'e teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmamda sağladığı olanaklar için bir çalışanı olmaktan gurur duyduğum TUSAŞ'a teşekkür ederim.

Akademik faaliyetlerimi her zaman destekleyen ve bu konuda beni cesaretlendiren canım aileme, özellikle sevgili eşim Ayşe KAYAALP'e bir teşekkürü borç bilirim.

Bu araştırmayı 07/2020-19 kodlu projeyle destekleyen Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimine teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
2. ARAKRİTİK ÖSTENİTLEME SICAKLIKLARINDAN ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER	3
2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Arakritik Östenitleme.....	3
2.2. Arakritik Östenitleme Sıcaklıklarından Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler	4
2.2.1. Arakritik östenitleme sıcaklığının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi	4
2.2.2. Östemperleme sıcaklık ve süresinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi	7
2.3. Arakritik Östenitleme Sıcaklıklarından Su Verilmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler	10
2.3.1. Martensit hacim oranının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi	11
2.4 Arakritik Östenitleme Sıcaklıklarından Havada Soğutulmuş Küresel Grafitli Dökme Demirler.....	13
2.5. Dökme Demirler ve Çeliklerde Ötektoid Dönüşüm ve Kinetiği.....	16
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	23
3.1. Malzeme	23

3.2. Isıl İşlem.....	24
3.3. Metalografik Çalışmalar.....	26
3.4. Mekanik Testler	27
3.4.1. Çekme testi.....	27
3.4.2. Sertlik testi	28
4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Mikroyapı İncelemesi.....	29
4.2. Perlit Hacim Oranı	30
4.3. Mekanik Test Sonuçları	32
4.4. Kırık Yüzey İncelemesi.....	36
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	39
5.1. Sonuçlar.....	39
5.2. Öneriler	39
KAYNAKLAR	41

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık)	4
Çizelge 2.2. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık)	6
Çizelge 2.3. Arakritik östenitleme sıcaklığının ferrit-ösferrit hacim oranlarına etkisi ...	6
Çizelge 2.4. Numunelere ait kimyasal kompozisyon (% ağırlık)	7
Çizelge 2.5. Arakritik östenitleme sıcaklığının ÖKGDD mekanik özelliklerine etkisi..	8
Çizelge 2.6. Östemperleme sıcaklığının ÖKGDD mekanik özelliklerine etkisi	8
Çizelge 2.7. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık)	9
Çizelge 2.8. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık)	11
Çizelge 2.9. KGDD numunelere ait kimyasal kompozisyon (Ağırlıkça %).....	13
Çizelge 2.10. KGDD numunelere ait kimyasal kompozisyon (Ağırlıkça %).....	16
Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan EN-GJS-700-2 küresel grafitli dökme demirin kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %)	23
Çizelge 4.1. Numunelerin metalografik ölçüm sonuçları	32
Çizelge 4.2. Numunelerin mekanik test sonuçları	33

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Fe-C-Si faz diyagramı dikey kesiti (% 2 Si içeren).....	3
Şekil 2.2. Östenitleme sıcaklığının östenit hacim oranına etkisi	5
Şekil 2.3. Östenitleme sıcaklığının kırılma tokluğuna etkisi	5
Şekil 2.4. Martensit hacim oranının ve temperleme koşullarının sertlik ve çekme dayanımına etkisi	12
Şekil 2.5. Suda su verilmiş numunelerde martensit hacim oranı(a) ve havada soğutulmuş numunelerde perlit hacim oranı(b) ve akma, çekme dayanım değişimi.....	15
Şekil 2.6. Perlit hacim oranının sertlik üzerine etkisi	16
Şekil 2.7. Ağırlıkça %0,76 C atomu içeren demir karbon alaşımına ait mikroyapıların ötektoid sıcaklığın üzerinde ve altında şematik gösterimi.....	17
Şekil 2.8. (a) Perlitik çeliklerin mikroyapısının gösterimi (b) Östenit tane sınırlarında ve tane köşelerinde perlit oluşumu ve büyümesi	18
Şekil 2.9. (a) Sementitin yanal büyüme kinetiği, (b) Perlitin yanal büyüme kinetiği, (c) Perlit kolonisinin alın düzleminden büyümesi. C_{γ} = Östenit/sementit sınır yüzeyindeki karbon miktarı $C_{\gamma\alpha}$ = Östenit/ferrit sınır yüzeyindeki karbon miktarı.....	19
Şekil 2.10. Ötektoid demir-karbon alaşımının izotermal dönüşüm diyagramı.....	19
Şekil 2.11. İzotermal dönüşüm diyagramları (a) ötektoid kompozisyon (b) alaşımlı kompozisyon	21
Şekil 2.12. Demir - karbon faz diyagramına ait bir kısım	22
Şekil 3.1. Tundish tipi küreselleştirme potası	23
Şekil 3. 2. Çalışmalarda kullanılan ve ASTM A536 standardına göre dökümleri gerçekleştirilen Y-blok ve ölçüleri (mm).....	24
Şekil 3.3. (a) Çalışmalarda kullanılan ısıtma fırını (b) Isıtma işlem görmüş numuneler	25
Şekil 3.4. Uygulanan ısıtma işlemlerin şematik gösterimi	25
Şekil 3.5. Leica DMI 5000M optik mikroskop.....	26
Şekil 3.6. Jeol JSM 6060 LV tarama elektron mikroskobu	27
Şekil 3.7. Çekme numunesi boyutları (ölçüler mm'dir)	27

Şekil	Sayfa
Şekil 3.8. Çekme testlerinde kullanılan Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazı.....	28
Şekil 3.9. Sertlik ölçümlerinde kullanılan Emcotest DuraVision 200 model sertlik ölçme cihazı	28
Şekil 4.1. Arakritik östenitleme sıcaklığına bağlı olarak perlit ve ötektoid öncesi ferrit hacim oranının değişimi.....	31
Şekil 4.2. Arakritik östenitleme sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi.....	33
Şekil 4.3. Perlit hacim oranı ile sertlik, akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişki	34
Şekil 4.4. Perlit hacim oranı ile toplam % uzama, kesit alan daralması ve kırılma enerjisi arasındaki ilişki	35
Şekil 4.5. Bu çalışmada elde edilen çekme dayanımı ve toplam uzama değerlerinin ASTM standartlarıyla karşılaştırılması	36

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 2,5 saat tavlanmış ve ardından polimerik çözeltide su verilmiş numunelerin mikroyapıları; (a) 750°C (b) 760°C (c) 770°C	11
Resim 2.2. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 20 dk tavlanmış ve ardından suda su verilmiş numunelerin mikroyapıları; (a) 795°C (b) 805°C (c) 815°C	14
Resim 2.3. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 20 dk tavlanmış ve ardından havada soğutulmuş numunelerin mikroyapıları; a) 795°C b) 805°C c) 815°C	14
Resim 2.4. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 20 dk tavlanmış ve ardından fırında soğutulmuş numunelerin mikroyapıları; (a) 795°C (b) 805°C (c) 815°C	14
Resim 2.5. Kaba (a) ve ince (b) perlitik yapılara ait mikroskop görüntüleri (3000x büyütme)	20
Resim 4.1. Dökülmüş haldeki alaşımsız EN-GJS-700-2 küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı	29
Resim 4.2. Farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında 1 saat östenitlenmiş ve havada soğutulmuş KGDD'in mikroyapıları; (a) 770°C, (b) 780°C, (c) 790°C, (d) 800°C, (e) 810°C, f) 820°C	30
Resim 4.3. Dökülmüş haldeki numunenin kırık yüzey SEM resmi	37
Resim 4.4. Çekme numunelerinin kırık yüzey SEM resimleri (beyaz oklar gevrek klivaj kırılmayı siyah oklar ise sünek kırılma bölgelerini göstermektedir).	38

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A₁	Alt kritik sıcaklık
A₃	Üst kritik sıcaklık
°C	Santigrat derece
°F	Fahrenheit derece
Dak	Dakika
Fe₃C	Sementit
Fe-C-Si	Demir-karbon-silisyum üçlü faz diyagramı
Mm	Milimetre
MPa	Megapaskal
J	Joule
Kgf	Kilogramkuvvet
Kn	Kilonewton
Ø	Çap
A	Ferrit
Γ	Östenit
C_γ	Östenit/sementit sınır yüzeyindeki karbon miktarı
C_{γα}	Östenit/ferrit sınır yüzeyindeki karbon miktarı

Kısaltmalar	Açıklamalar
A	Östenit
B	Beynit
ÇMY	Çift matrisli yapı
F	Ferrit
G	Grafit
HB	Brinell sertlik değeri
KGDD	Küresel grafitli dökme demir

Kısaltmalar**Açıklamalar****M**

Martensit

MBN

Magnetic barkhausen noise

ÖKGDD

Östemperlenmiş küresel grafitli dökme demir

P

Perlit

SEM

Tarama elektron mikroskobu



1. GİRİŞ

Küresel grafitli dökme demirler (KGDD)'in üstün tokluk, dayanım ve süneklik özellikleri onları endüstriyel uygulamalarda vazgeçilemeyen mühendislik malzemeleri arasına koymuştur [1]. KGDD'ler en çok otomotiv sektörü, makineler ve tarım araçlarında uygulama alanı bulmuşlardır. 1960'lardan sonra dünyadaki üretimi artmış ve endüstride yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. Dökülmüş halde %20'lere kadar süneklik değerinin yanında 400 MPa dayanıma sahip olması, gri dökme demirin dökülebilirliği ve çeliğin tokluğu gibi kombinasyonları bir araya getirmiştir [1-4]. Farklı ısıtma işlemleriyle dökme demirlerin mekanik özellikleri daha da yükseltilebilmektedir. Östempereleme ısıtma işlemi ilk olarak 1930'larda çeliklere uygulanmıştır [5].

Akratik östenitleme ısıtma işlemleri geleneksel östenitleme ısıtma işlemlerine göre daha düşük sıcaklık östenitleme ısıtma işlemleri olup, bu sıcaklıklardan su verme ile ferrit+martensitik veya östempereleme ile ferrit+ösferritik yapılar elde edilebilmektedir [6]. Araştırmacılar, KGDD'lerde akratik östenitleme ve kontrollü soğutma (su verme veya östempereleme) ısıtma işlemleri ile ikincil fazın miktarı ve morfolojisinin kontrol edilebileceğini bildirmektedirler [7-11]. Araştırmacılar çift matris yapıları östemperelenmiş küresel grafitli dökme demirlerde (ÇMY-ÖKGDD) akratik östenitleme ve ardından östempereleme koşullarına bağlı olarak mikroyapı ve mekanik özelliklerin değişimini oldukça detaylı bir şekilde araştırmıştır [12-14]. Ayrıca çift fazlı (α +martensit) KGDD'de martensit hacim oranındaki değişimin mikroyapı-mekanik özelliklere ve aşınma dayanımına etkisi incelenmiştir [15, 16]. Tarım makinelerinde ve iş makinelerinde kullanılan çelikler ile ÖKGDD'lerin mekanik özellikleri karşılaştırılmıştır [17].

KGDD'lerde akratik östenitleme sonrası östempereleme veya su verme ısıtma işlemleriyle ferrit+ösferrit ve ferrit+martensit üretiminin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisinin araştırıldığı çalışmaların oldukça çok olduğu görülmektedir. Ancak KGDD'de akratik östenitleme sonrası havada soğutmayla farklı oranlarda perlit üretimi ve bunun mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisiyle ilgili sadece bir araştırma bulunmaktadır. [18]

Bu çalışmada farklı sıcaklıklarda yapılan akratik östenitleme + havada soğutma ısıtma işlemlerinin KGDD'in mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır.

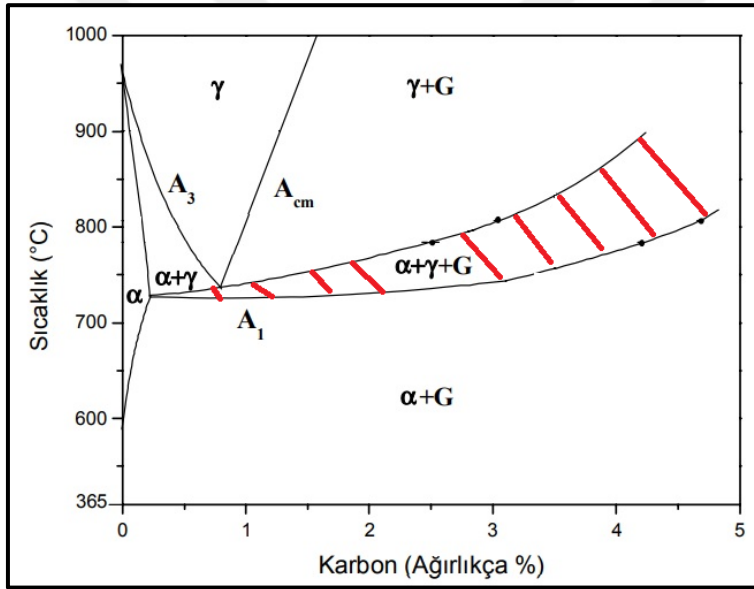
770°C-820° C aralığında farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında östenitleme sonucunda numuneler havada soğutularak farklı perlit hacim oranlarına sahip mikroyapılar elde edilmiştir. Çalışmanın amacı aynı kimyasal kompozisyona sahip KGDD’de arakritik östenitleme + havada soğutma ısıt işlemleriyle farklı perlit ve ferrit hacim oranlarına sahip mikroyapılar üreterek perlit hacim oranının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini belirlemektir.

Bu tez; giriş, literatür taraması, deneysel çalışmalar, deneysel sonuçlar, sonuçlar ve öneriler olmak üzere 5 bölümden oluşmaktadır. Giriş bölümünden sonra, 2. bölümde Arakritik östenitleme ısıt işleminin KGDD’in mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisini içeren literatür çalışmaları, 3. bölümde Deneysel çalışmalar, 4. bölümde ise Deneysel sonuçlar ve tartışma, son bölüm olan 5. bölümde ise Sonuçlar ve öneriler sunulmuştur.

2. ARAKRİTİK ÖSTENİTLEME SICAKLIKLARINDAN ISIL İŞLEM UYGULANMIŞ KÜRESEL GRAFİTLİ DÖKME DEMİRLER

2.1. Küresel Grafitli Dökme Demirlerde Arakritik Östenitleme

Arakritik östenitleme ısısal işlemi küresel grafitli dökme demirlerde çift fazlı mikroyapı elde etmek için kullanılan önemli bir işlemdir. Bu ısısal işlemin yapıldığı bölgede $\alpha+\gamma+G$ fazları beraber bulunur (Şekil 2.1). Bu bölge üst kritik sıcaklık ve alt kritik sıcaklık A_1 sıcaklıkları arasında bulunmaktadır. Bu sıcaklıklar dilatometre ile tespit edilir ve ferritin östenite, östenitin de ferrite dönüşüm noktalarını tanımlarlar [6, 15, 19-21].



Şekil 2.1. Fe-C-Si faz diyagramı dikey kesiti (% 2 Si içeren) [10]

Araştırmacılar [22] alt ve üst kritik sıcaklıklar arasında yapılan farklı sıcaklıklardaki östenitlemenin mekanik özelliklere belirgin bir etkisi olduğunu ve bu etkinin ise ötektoid öncesi ferrit hacim oranına ve östenitin dönüştüğü fazların hacim oranına bağlı olduğunu bildirmişlerdir. Yapılan çalışmalar sonucunda ikincil fazın miktarının ve yapısının arakritik östenitleme ısısal işlemleri ile kontrol edilebildiği görülmüştür [19, 20]. Arakritik östenitleme bölgesinde ilk östenit oluşumu en son katılan bölgelerde çekirdeklenmeye ve büyümeye başlar. Bunun sebebi ise en son katılan bölgelerdeki alaşım elementlerinin mikrosegregasyonudur. Östenit hacim oranı ısısal işlemin yapıldığı arakritik östenitleme sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir [23].

Arakritik bölgenin pozisyonu ve genişliği alaşımın kimyasal kompozisyonuna göre değişiklik göstermektedir. Alaşımdaki silisyum miktarındaki %1,1'lik bir artış kritik sıcaklıklarda 30°C - 40°C artışa sebep olur. Bunun sebebi ise silisyumun östenitin karbon çözünürlüğünü azaltması ve dolayısıyla ferrit dönüşümünü arttırmasıdır. Kompozisyondaki mangan (Mn) oranının artışı ise kritik sıcaklıkların düşmesine sebep olur [21, 24].

2.2. Arakritik Östenitleme Sıcaklıklarından Östemperlenmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

Yapılan literatür araştırmalarının sonucunda; arakritik östenitleme sıcaklığının, östemperleme sıcaklığının ve süresinin KGDD mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir.

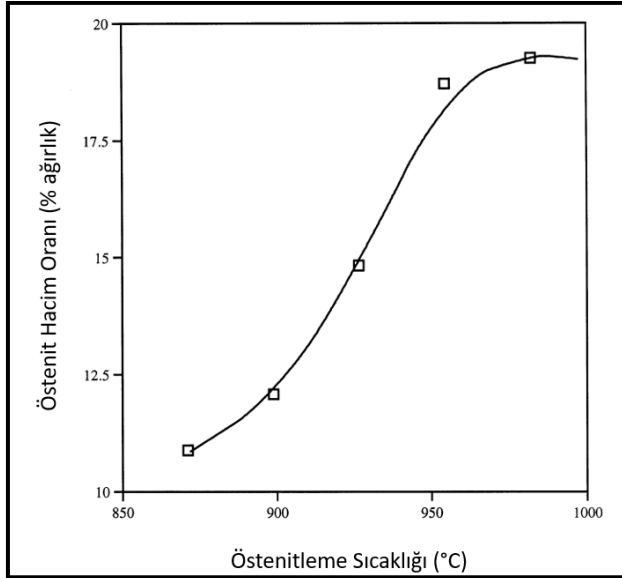
2.2.1. Arakritik östenitleme sıcaklığının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi

Putatunda ve Gadicherla [25] yaptıkları bir çalışmada arakritik östenitleme sıcaklığının ferritik yapıli düşük manganlı ÖKGDD'in kırılma tokluğuna ve mikroyapıya etkisini incelemiştir. Kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.1'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık) [25]

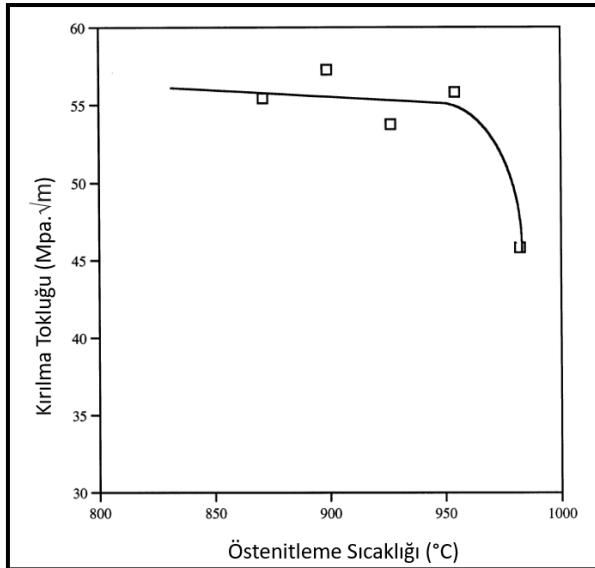
C	Si	Mn	S	P	Fe
3,44	2,41	0,15	0,007	0,0015	Kalan

Numuneler 871°C, 898°C, 927°C, 954°C ve 982°C sıcaklıkta 2 saat östenitlenmiş, ardından 302°C sıcaklıkta 2 saat östemperlenmiştir. Östenitleme sıcaklık değişiminin mikroyapıya etkisi incelenmiştir. Şekil 2.2'de artan östenitleme sıcaklığı ile östenit hacim oranının arttığı görülmektedir.



Şekil 2.2. Östenitleme sıcaklığının östenit hacim oranına etkisi [25]

954°C sıcaklığa kadar tokluk değerinde önemli bir değişim gözlenmemiştir fakat 982°C’de östenitleme yapıldığında tokluk değerinde ciddi bir düşüş görülmüştür. Şekil 2.3’de gösterildiği gibi en yüksek tokluk değeri elde etmek için 927°C, 954°C derecelerin uygun olduğu görülmüştür.



Şekil 2.3. Östenitleme sıcaklığının kırılma tokluğuna etkisi [25]

Basso ve arkadaşları [26] KGDD numuneleri farklı arakritik sıcaklıklarda östenitlemiş, ardından aynı sıcaklıkta östemperlemişlerdir. Yaptıkları ısıt işlemlerin mikroyapıya ve

mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. Kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.2’de verilmiştir.

Çizelge 2.2. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık) [26]

C	Si	Mn	S	Cu	Fe
3,52	3,21	0,46	0,02	0,94	Kalan

Numuneler 780°C, 800°C, 820°C, 840°C ve 860°C sıcaklıkta 1 saat östenitlenmiş, ardından 350°C sıcaklıkta 90 dakika östempelenmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklık değişiminin mikroyapıdaki faz hacim oranlarına etkisi Çizelge 2.3’te verilmiştir. Artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile ösferrit hacim oranının arttığı, ferrit hacim oranının düştüğü görülmüştür.

Çizelge 2.3. Arakritik östenitleme sıcaklığının ferrit-ösferrit hacim oranlarına etkisi [26]

Sıcaklık (°C)	Ferrit hacim oranı (%)	Ösferrit hacim oranı (%)
780	92	8
800	80	20
820	50	50
840	35	65
860	5	95

Mekanik testler sonucunda artan ösferrit hacim oranı ile akma, çekme dayanımlarında ve kırılma tokluğunda artış, toplam uzamada ise düşüş görülmüştür.

Literatürdeki başka bir çalışmada ise araştırmacılar küresel grafitli dökme demir numuneleri farklı arakritik sıcaklıklarda (820°C, 840°C, 865°C) östenitlemiş, ardından 360°C sıcaklıkta 1 saat östempelme ısı işlemine tabi tutmuşlardır. Artan arakritik östenitleme sıcaklığının mekanik özellikler üzerine etkisi incelenmiştir. Çekme dayanımları ve sertlik değerlerinin arakritik östenitleme sıcaklığının artması ile arttığı fakat kopma uzaması değerinin ise azaldığı görülmüştür [23].

Tenaglia ve arkadaşları [24] KGDD numuneleri 800°C, 830°C, 845°C arakritik sıcaklıklarda 1080 dakika östenitlemiş, ardından 360°C sıcaklıkta 90 dakika östemperleme ısııl işlemi uygulamışlardır. Kılıçlı ve arkadaşları [7] KGDD numuneleri 795°C, 805°C, 815°C ve 830°C sıcaklıklarda 20 dakika östenitlemiş, ardından 365°C sıcaklıkta 120 dakika östemperleme ısııl işlemi uygulamışlardır. İki çalışmada da ısııl işlemin mikroyapıya etkisi incelenmiştir. Isıl işlem sonucunda ferrit ve ösferrit fazları elde edilmiştir. Artan arakritik sıcaklıkla beraber ösferrit hacim oranının arttığı, ferrit hacim oranının azaldığı tespit edilmiştir.

Ovalı ve arkadaşları [27] KGDD numuneleri 810°C, 820°C ve 830°C arakritik sıcaklıklarda 20 dakika östenitlemiş, ardından 315°C'de 120 dakika östemperleme ısııl işlemine tabi tutmuşlardır. Kritik sıcaklıklardaki değişimin mikroyapıya etkisini ve mikroyapıdaki değişimin malzemenin yorulma dayanımına etkisini araştırmışlardır. Artan östenitleme sıcaklığı ile son mikroyapıda elde edilen ösferrit hacim oranının arttığı gözlemlenmiştir. Ösferrit hacim oranı arttıkça yorulma dayanımının arttığını tespit etmişlerdir. Fakat, arakritik sıcaklığa bağlı olan yorulma dayanımındaki artış geleneksel östemperlenmiş numunelerin yorulma dayanım değerlerini geçemediği rapor edilmiştir.

2.2.2. Östemperleme sıcaklık ve süresinin mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi

Panneerselvam ve arkadaşları [12] arakritik östemperlemenin, östemperlenmiş küresel grafitli dökme demirin (ÖKGDD) mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkisini incelemişlerdir. Kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.4'de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Numunelere ait kimyasal kompozisyon (% ağırlık) [12]

C	Si	Ni	Cu	Mn	Fe
3,44	2,46	1,03	0,52	0,08	Kalan

8 farklı numune grubunu çeşitli ısııl işlem çevrimlerine tabi tutmuşlardır. Numune gruplarını A, B, C,D, E, F, G, H olarak nitelendirmişlerdir. Arakritik östenitleme sıcaklığının etkisini görebilmek adına A, B, C, D numuneleri 4 farklı arakritik östenitleme sıcaklığına çıkarılmış

(770 °C, 780 °C, 800 °C ve 826 °C) ardından 360 °C sıcaklıkta tuz banyosunda bekletilmişlerdir. Östempereleme sıcaklığının etkisini görebilmek adına E,F ve G numuneleri 826 °C sıcaklıkta östenitlenmiş ardından 4 farklı (385 °C, 360 °C, 315 °C ve 287 °C) sıcaklıkta östemperelemişlerdir. H numunesi ise karşılaştırma amaçlı olarak 835 °C sıcaklıkta östenitlenmiş ve 360 °C sıcaklıkta östemperelemişdir. Östempereleme sıcaklığı artırıldığında östenit hacim oranının arttığı görülmüştür.

Artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile akma ve çekme mukavemetlerinin arttığı fakat kopma uzamasının azaldığı Çizelge 2.5'te görülmektedir [12]. Artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile numunelerin sertlik (HB) değerlerinde artış gözlenmiştir. Öte yandan artan östempereleme sıcaklığı ile sertlik (HB) değerlerinde azalma görülmüştür [12].

Çizelge 2.5. Arakritik östenitleme sıcaklığının ÖKGDD mekanik özelliklerine etkisi [12]

Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Östempereleme Sıcaklığı (°C)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması %
835	360	722 ± 164	919 ± 128	7,0 ± 0,9
826	360	683 ± 125	872 ± 119	5,3 ± 2,2
800	360	605 ± 95	823 ± 87	8,2 ± 0,5
780	360	380 ± 1	490 ± 6	12,3 ± 0,2
770	360	374 ± 39	498 ± 18	12,6 ± 0,1

Artan östempereleme sıcaklığı ile akma ve çekme mukavemetlerinin düştüğü fakat kopma uzamasının arttığı Çizelge 2.6'te görülmektedir.

Çizelge 2.6. Östempereleme sıcaklığının ÖKGDD mekanik özelliklerine etkisi [12]

Östenitleme Sıcaklığı (°C)	Östempereleme Sıcaklığı (°C)	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması %
826	385	888 ± 34	1052 ± 6	6,0 ± 1,1
826	360	683 ± 125	872 ± 119	5,3 ± 2,2
826	315	1229 ± 15	1385 ± 34	3,1 ± 0,3
826	287	1317 ± 41	1481 ± 13	2,0 ± 0,5

Basso ve arkadaşları [26] KGDD numuneleri aynı arakritik sıcaklıklarda östenitlemiş, ardından farklı sıcaklıklarda östemperlemişlerdir. Yaptıkları ısı işlemlerin mikroyapıya etkisini incelemişlerdir. Kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.7’de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık) [26]

C	Si	Mn	S	Cu	Fe
3,52	3,21	0,46	0,02	0,94	Kalan

Numuneler 860°C sıcaklıkta 1 saat östenitlenmiş, ardından 300°C ve 350°C sıcaklıklarda 90 dakika östemperlenmiştir. Mikroyapı incelemesi sonucunda östemperleme sıcaklığı arttıkça daha kaba ösferrit elde edildiği görülmüştür.

Kılıçlı ve arkadaşları [7] yaptıkları çalışmada arakritik östenitleme ve östemperleme sıcaklığını sabit tutmuş, östemperleme sürelerindeki değişimin KGDD mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkisini incelemişlerdir. Numuneler arakritik östenitleme sıcaklığında (805°C) östenitlenmiş ardından östemperleme sıcaklığında (365°C) 30,60,90 ve 180 dakika bekletilmişlerdir. Çekme ve akma dayanım değerleri artan östemperleme süresi ile artmış, kopma uzamasında belirgin bir değişim gözlenmemiştir. Artan östemperleme süresi ile mikroyapıdaki martensit hacim oranı azalmış, beynitik ferrit hacim oranı artmıştır.

Erdoğan ve arkadaşları [6] gerçekleştirdikleri çalışmada arakritik östenitleme ve östemperleme sıcaklığını sabit tutmuş, östemperleme sürelerindeki değişimin KGDD mikroyapısına etkisini incelemişlerdir. Arakritik östenitleme sıcaklığı olarak 795°C, 815°C sıcaklıklarda östenitleme yapılmış, 365°C sıcaklıkta farklı sürelerde östemperleme yapılmıştır. Östemperleme süreleri ise 30, 60, 120 ve 180 dakika olarak seçilmiştir. Literatürdeki benzer çalışmaların sonuçlarına paralel olarak östemperleme süresindeki artışla mikroyapıdaki martensit hacim oranının düştüğü, beynitik ferrit hacim oranının arttığı görülmüştür. Yüksek karbonlu östenit hacim oranı ise 120 dakika bekletilen numunelerde en yüksek değeri görmüş sonrasında östemperleme süresi arttıkça düşüş eğilimi göstermiştir. Şahin ve arkadaşları [9] arakritik östenitleme ve östemperleme sıcaklığını sabit tutmuş, östemperleme süresindeki değişimin KGDD mikroyapısına ve mekanik özelliklere etkisini

incelemişlerdir. Arakritik östenitleme sıcaklığı olarak 795°C, 815°C sıcaklıklarında 20 dakika östenitleme yapılmış, 365°C sıcaklıkta 30,90 ve 120 dakika sürelerde östemperleme yapılmıştır. Östemperleme sürelerindeki değişimin mikroyapıya etkisi incelendiğinde; 795°C sıcaklıkta östenitlenen numunelerin mikroyapısındaki ösferrit hacim oranı, artan östemperleme süresi ile artmış, fakat 815°C sıcaklıklarda östenitlenen numunelerde ise 90 dakika östemperleme süresine kadar ösferrit hacim oranı artmış ardından sabit bir grafik çizmiştir. Artan östemperleme süresinin akma ve çekme dayanımlarına etkisi incelendiğinde en yüksek değerleri 90 dakika östemperleme sonrasında elde etmişlerdir. Artan östemperleme süresi ile sertlik değerlerinin azaldığını rapor etmişlerdir.

Rashidi ve arkadaşları [13] östenitleme sıcaklığını sabit tutup östemperleme sıcaklık ve süresindeki değişimin mekanik özelliklere etkisini incelemişlerdir. KGDD numuneler 900°C’de kısmi östenitlenmiş, suda su verilmiş ardından 300°C-600°C aralığında 1 saat östemperlenmişlerdir. Artan östemperleme sıcaklığı ile darbe tokluğu ve kopma uzaması değerleri artmış, akma ve çekme mukavemetleri düşmüştür. Çalışmanın diğer kısmında östenitleme sıcaklığı ve östemperleme sıcaklığı sabit tutulmuş, 500°C’de 30-180 dakika aralığında çeşitli sürelerde temperleme yapmışlardır. Östemperleme süresi 30-120 arası olan numunelerde sürenin artışı ile akma ve çekme dayanımları düşmüş, kopma uzaması ise artmıştır. 120 dakikadan sonra kopma uzaması değerlerinin azalmaya başladığı, çekme ve akma mukavemetlerinin arttığı gözlemlenmiştir.

2.3. Arakritik Östenitleme Sıcaklıklarından Su Verilmiş Küresel Grafitli Dökme Demirler

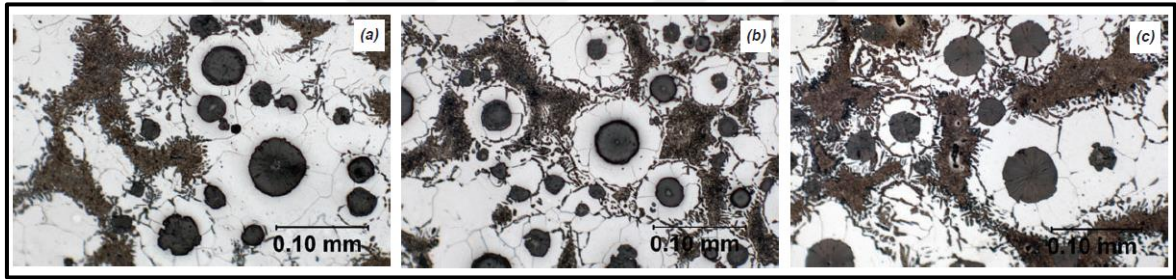
Cerah ve arkadaşları [19] farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarından su verme sonucunda KGDD numunelerin mikroyapısındaki değişimi araştırmışlardır. Numuneler 795°C ve 815°C’de 20 dakika tavllanmış ardından 100°C’deki yağ banyosuna alınmışlardır. Arakritik sıcaklıklardaki tavlama neticesinde tane sınırlarındaki yüksek difüzyon hızı sebebiyle östenit ilk olarak ferrit/ferrit tane sınırlarında ve ötektik hücre sınırlarında çekirdeklenmeye başlamıştır. Ardından martensit denge hacim oranına gelene kadar ferrit taneciklerinin etrafında büyümüştür. Kritik östenitleme sıcaklığı yükseldiğinde östenitin tercihli büyümesi ferrit tane sınırlarına paralel olmuştur ve martensit sürekli bir ağ şekli oluşturmuştur. Arakritik östenitleme sıcaklığı arttıkça martensit hacim oranının ve martensit parçacık boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir.

2.3.1. Martensit hacim oranının mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi

Aristizabal ve arkadaşları [15] arakritik östenitleme ve temperleme sıcaklıklarındaki değişiminin ÖKGDD'in mikroyapısına ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Çalışmasında arakritik östenitleme sıcaklığı olarak 750°C, 760°C, 770°C sıcaklıklarını, temperleme sıcaklığı olarak ise temperlenmemiş, 400°C ve 500°C sıcaklıklarını tercih etmişlerdir. Kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.8'de verilmiştir.

Çizelge 2.8. Kimyasal kompozisyon (% ağırlık) [15]

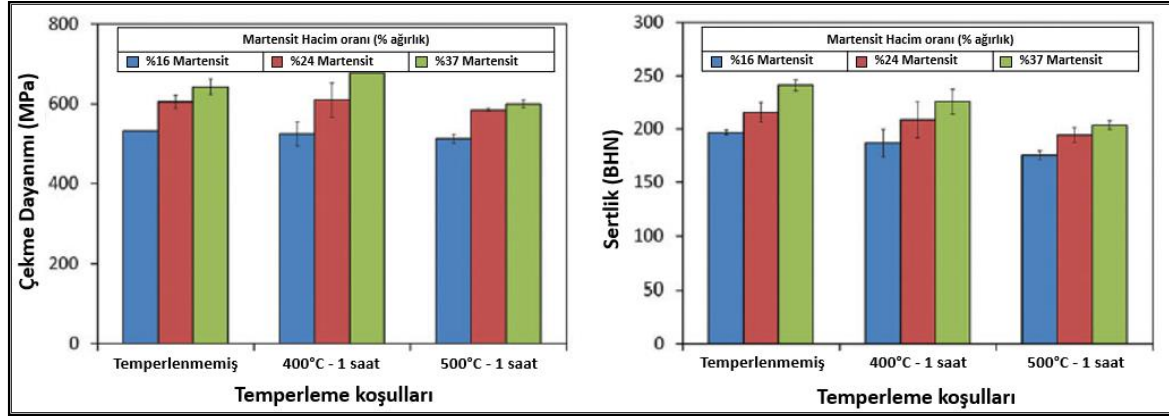
C	Si	Mn	Ni	Cu	Mg	S	Fe
3,87	2,33	0,69	0,5	0,19	0,05	0,0016	Kalan



Resim 2.1. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 2,5 saat tavllanmış ve ardından polimerik çözeltide su verilmiş numunelerin mikroyapıları; (a) 750°C (b) 760°C (c) 770°C [15]

Resim 2.1a,b ve c de görüleceği üzere artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile martensit hacim oranı da artmıştır. 750°C'de östenitlenmiş numunelerde martensit hacim oranı %16, 760°C'de östenitlenmiş numunelerde martensit hacim oranı %24, 770°C'de östenitlenmiş numunelerde martensit hacim oranı %37 görülmüştür.

Martensit hacim oranının ve temperleme koşullarının sertlik ve çekme dayanımına etkisi incelenmiş ve şekil 2.4'te gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Martensit hacim oranının ve temperleme koşullarının sertlik ve çekme dayanımına etkisi [15]

Martensit hacim oranının artması çekme mukavemetini arttırmıştır fakat temperleme sıcaklıklarındaki artışın çekme mukavemetine olumlu bir etkisi gözükmemektedir. Martensit hacim oranının artması ile sertliğin arttığı ve beklenildiği üzere temperleme sıcaklığındaki artışla beraber sertliğin düştüğü görülmüştür.

Kılıçlı ve arkadaşları [28] KGDD numuneleri 900°C sıcaklıkta 90 dakika östenitlemiş, ardından 365°C sıcaklıktaki tuz banyosunda 30, 60, 120 ve 180 dakika bekletmişlerdir. Isıl işlem sonrasında mikroyapıdaki hacim oranlarını belirlemek için MBN metodu kullanılmıştır. Artan östemperleme süresi ile martensit hacim oranının düştüğü, en yüksek martensit hacim oranının 30 dakika östemperleme sonrası elde edildiği görülmüştür. Östemperleme süresi arttıkça martensit hacim oranının azalması çekme-akma mukavemetlerinin ve sertlik değerlerinin düşmesine sebep olmuştur.

Araştırmacılar [19] farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarından su verme sonucunda KGDD numunelerin mikroyapısındaki martensit hacim oranının değişimini ve buna bağlı olarak sertlik değerlerindeki değişimi araştırmışlardır. Numuneler 795°C ve 815°C'de 20 dakika tavllanmış ardından 100°C'deki yağ banyosuna alınmışlardır. Artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile martensit hacim oranının arttığı tespit edilmiştir. Sertlik değerlerinin de martensit hacim oranı artışı ile arttığını rapor etmişlerdir.

Rashidi ve Torbati [29] yaptıkları çalışmada KGDD numuneleri farklı arakritik östenitleme sürelerinde tavlama ve ardından su vermişlerdir. Yapılan kısmi östenitleme ve su verme ısıl işlemi sonrasında numunelerin mekanik özelliklerini incelemişlerdir. 400 saniyeye kadar kısmi östenitlenen numunelerde akma ve çekme dayanımları neredeyse sabit kalmıştır fakat

tokluk ve uzama değerlerinde düşüş görülmüştür. Bu durumun sebebini fazlaca çökelmenin olduğu bölgelerde büyük martensit adalarının oluşmasıyla açıklamışlardır. Östenitleme süresi 400 saniyenin üzerine çıkartıldığında akma ve çekme dayanımlarının arttığı fakat kopma uzamasının azaldığı görülmüştür. Östenitleme süresi 400 saniyenin altında olduğunda, kopma uzaması ve tokluk değerlerinin çok iyi fakat çekme ve akma dayanımlarının düşük olduğu, östenitleme süresi 600 saniyenin üzerinde olduğunda ise mukavemet değerlerinin çok yüksek olduğu fakat sünekliğin düştüğü görülmüştür. Araştırmacılar bu sonuçlara dayanarak optimum süreleri 400 ve 600 saniye aralığı olarak tespit etmişlerdir.

Şahin ve arkadaşları [16] KGDD numuneleri 795°C ve 815°C’de 20 dakika kısmi östenitlemiş, bunu takiben 100°C’deki yağ banyosuna almış, son olarak 500°C’de 1 saat ve 5 saat temperlemişlerdir. Numunelerin mikroyapılarındaki değişimi ve mekanik özelliklerini incelemişlerdir. Artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile martensit hacim oranının arttığını tespit etmişlerdir. Artan martensit hacim oranı çekme mukavemetini arttırmış fakat kopma uzaması değerlerini düşürmüştür. Temperleme süresindeki değişiminin martensit mikrosertliğine etkisi incelenmiş ve süre arttıkça mikrosertlik değerlerinin azaldığı rapor edilmiştir.

2.4 Arakritik Östenitleme Sıcaklıklarından Havada Soğutulmuş Küresel Grafitli Dökme Demirler

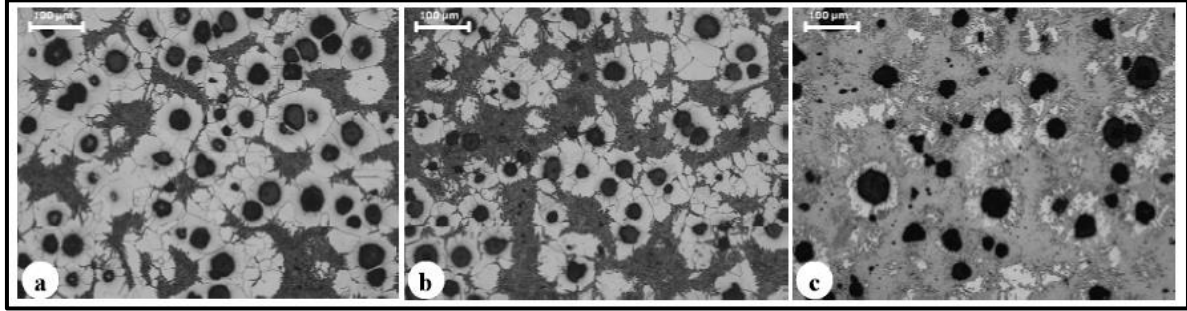
Coşkun ve arkadaşları [30] alaşımsız bir küresel grafitli dökme demirde arakritik östenitleme sıcaklıklarından değişik hızlarda soğutmanın mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisini incelemişlerdir. Kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.9’da verilmiştir.

Çizelge 2.9. KGDD numunelere ait kimyasal kompozisyon (Ağırlıkça %) [30]

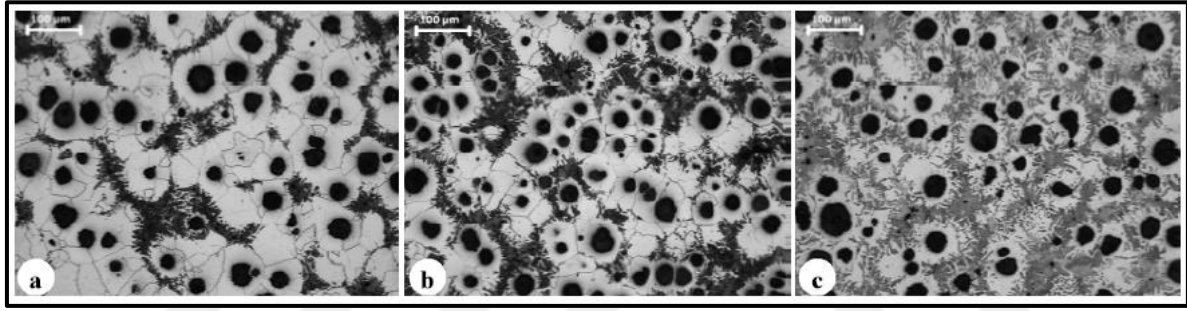
C	Si	Mn	P	S	Mg	Fe
3,56	2,70	0,39	0,024	0,012	0,035	Kalan

Coşkun ve arkadaşları, numuneleri 795°C, 805°C ve 815°C arakritik östenitleme sıcaklıklarında 20 dakika östenitlemiş ve ardından değişik soğuma hızlarında (suda su

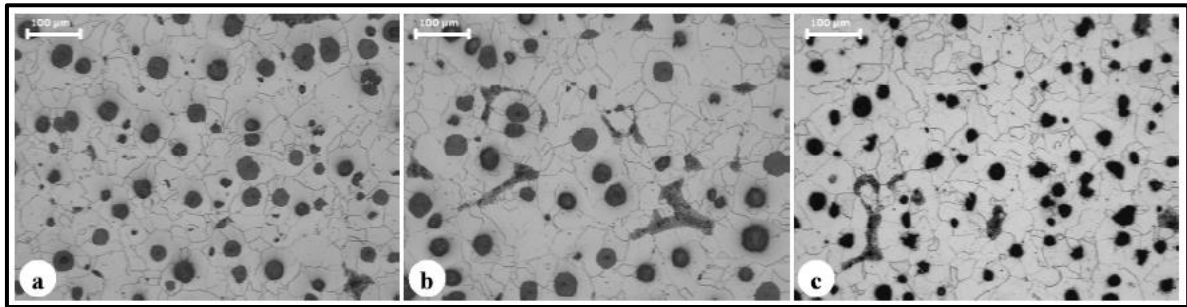
verme, havada soğutma, fırında soğutma) soğutmuşlardır. Isıl işlem sonrasında mikroyapı incelemesi yapılmış ve Resim 2.2, 2.3 ve 2.4'te verilmiştir.



Resim 2.2. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 20 dk tavllanmış ve ardından suda su verilmiş numunelerin mikroyapıları; (a) 795°C (b) 805°C (c) 815°C [30]



Resim 2.3. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 20 dk tavllanmış ve ardından havada soğutulmuş numunelerin mikroyapıları; (a) 795°C (b) 805°C (c) 815°C [30]

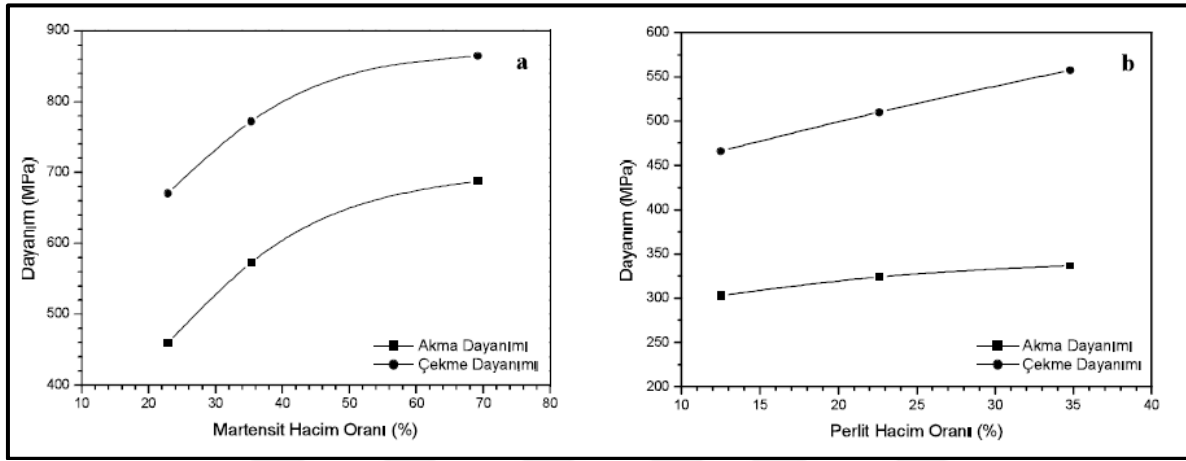


Resim 2.4. Arakritik östenitleme sıcaklıklarında 20 dk tavllanmış ve ardından fırında soğutulmuş numunelerin mikroyapıları; (a) 795°C (b) 805°C (c) 815°C [30]

Resim 2.2a, b ve c de görüleceği üzere suda su verilmiş numunelerde artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile martensit hacim oranı da artmıştır. Bunun sebebi ise artan arakritik sıcaklıkla beraber östenit hacim oranının artmasıdır. Östenitin tamamının martensite dönüştüğü kabul edilmiştir.

Resim 2.3a, b ve c de görüleceği üzere havada soğutulmuş numunelerde artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile ince perlitik yapı oluşmuş ve perlit hacim oranı artmıştır. Martensit hacim oranı da artmıştır.

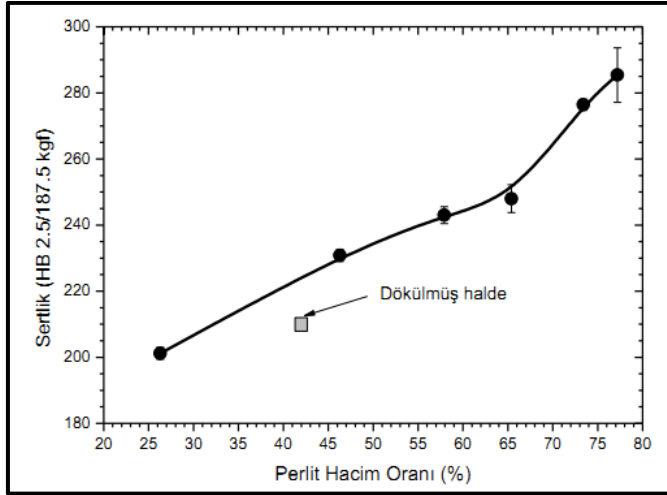
Resim 2.4a, b ve c de görüleceği üzere fırında soğutulan numunelerde artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile tamamen ferritik mikroyapılar elde edilmiştir.



Şekil 2.5. Suda su verilmiş numunelerde martensit hacim oranı(a) ve havada soğutulmuş numunelerde perlit hacim oranı(b) ve akma, çekme dayanım değişimi [30]

Şekil 2.5a'da artan martensit hacim oranıyla akma ve çekme mukavemetlerindeki artış görülmektedir. Şekil 2.5b'de ise artan perlit oranının çekme ve akma mukavemetlerini arttırdığı fakat bu artışın suda su verilen numunelerdeki artış kadar bariz bir artış olmadığı görülmüştür.

Söğüt ve arkadaşları [18] artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile perlit hacim oranının arttığını rapor etmiştir. Perlit hacim oranındaki artışın sertlik üzerine etkisi incelenmiş ve Şekil 2.6'da gösterilmiştir. Artan perlit hacim oranıyla sertliğin arttığı gözlemlenmiştir.



Şekil 2.6. Perlit hacim oranının sertlik üzerine etkisi [18]

Basso ve arkadaşları [31] yaptıkları çalışmada küresel grafitli dökme demir numuneleri üst kritik sıcaklığın üzerinde tam östenitlemiş ardından arakritik sıcaklıktaki tuz banyosunda farklı sürelerde bekletip havada soğutmuşlardır. Kullanılan numunelere ait kimyasal kompozisyon Çizelge 2.10'da verilmiştir.

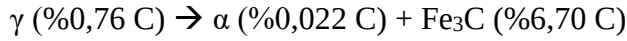
Çizelge 2.10. KGDD numunelere ait kimyasal kompozisyon (Ağırlıkça %) [31]

C	Si	Mn	Cu	Ni	Mg	Fe
3,29	2,61	0,37	0,65	0,87	0,052	Kalan

Numuneler tam östenitleme için 950°C sıcaklığa çıkartılmış, ardından 800°C sıcaklıktaki tuz banyosuna alınmış ve bu sıcaklıkta 60, 120 ve 180 dakika bekletilip havada soğutulmuşlardır. Arakritik sıcaklıktaki bekleme zamanının mikroyapıya ve mekanik özelliklere etkisi incelenmiştir. 800°C arakritik östenitleme sıcaklığında bekleme süresi arttıkça perlit hacim oranının arttığı, akma-çekme dayanımlarının ve sertliğin düştüğü tespit edilmiştir.

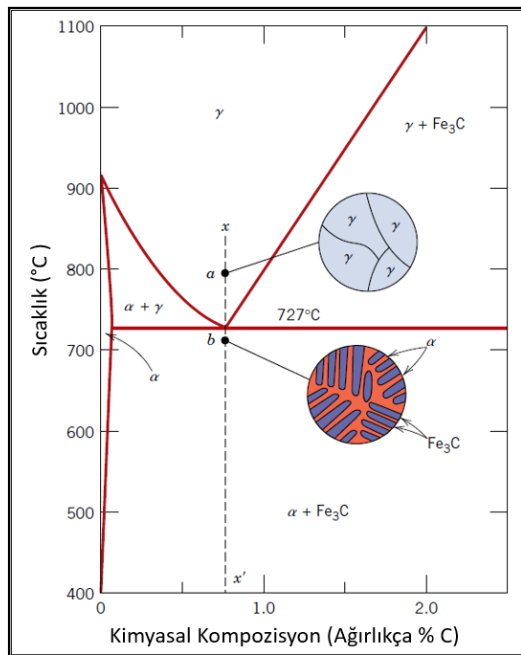
2.5. Dökme Demirler ve Çeliklerde Ötektoid Dönüşüm ve Kinetiği

Çeliklerde tek fazın içinden iki ayrı faz çıkmasına, çökelmeden farklı olarak ana fazın tamamından iki yeni faz oluşmasına ötektoid dönüşüm denir. Ötektoid dönüşümün nasıl gerçekleştiği ağırlıkça %0,76 C içeren çelik üzerinden anlatılmıştır.



(Eş. 2.1)

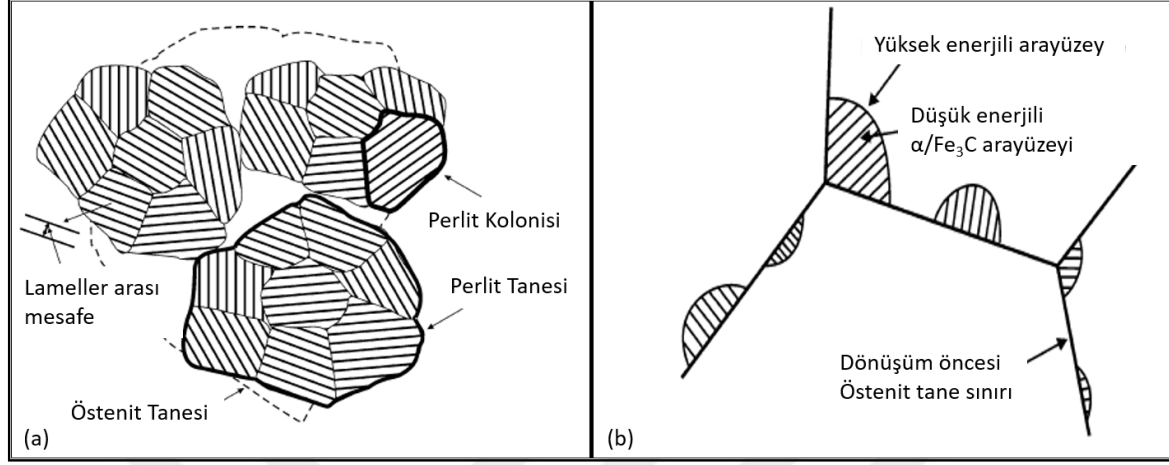
Bu çelik öncelikle tek fazlı östenit (γ) bölgesine ısıtılmış sonrasında da soğutulmaya başlanmıştır. Ötektoid sıcaklığa (727°C) ulaşana kadar mikroyapıda bir değişim gözlenmemiştir. Şekil 2.7’de gösterilen x-x’ çizgisi üzerinde a noktasından b noktasına gelindiğinde eğer soğuma hızı denge diyagramındaki fazların oluşmasına müsaade edecek kadar yavaş ise ötektoid dönüşüm gerçekleşir, ferrit (α) ve sementit (Fe_3C) fazları oluşur. Bu dönüşüm sonucunda lamelli bir yapı oluşur ve bu yapıya perlit adı verilir.



Şekil 2.7. Ağırlıkça %0,76 C atomu içeren demir karbon alaşımına ait mikroyapıların ötektoid sıcaklığın üzerinde ve altında şematik gösterimi [32]

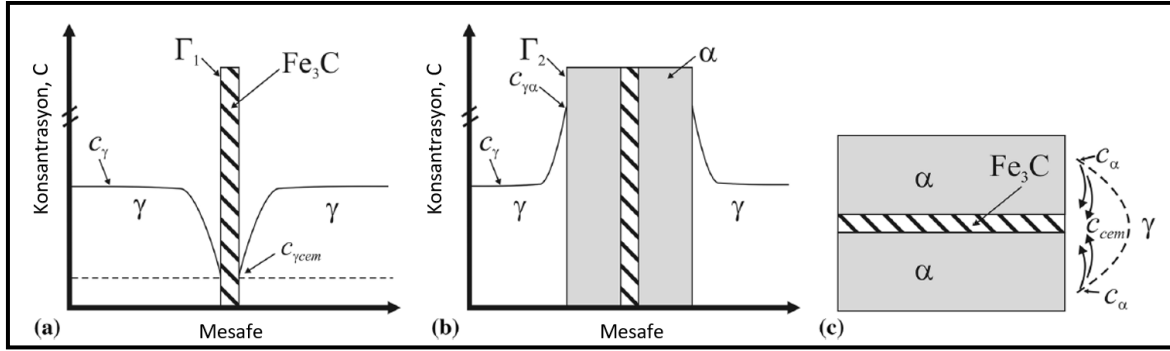
Sıcaklık ötektoid dönüşüm sıcaklığı altına düştüğünde östenit termodinamik olarak kararsız hale geçer. Dönüşüm östenit tane sınırlarında ferrit (α) veya sementit taneciklerinin heterojen bir şekilde çekirdeklenmesiyle başlar. Ferrit dönüşüm sıcaklığında maksimum %0,022 C atomu çözebildiği için karbon atomlarının ferrit tanesinden dışarıya doğru hareketi başlar. Ferrit çevresindeki karbon miktarının artmasıyla sementit katmanları çekirdeklenir. Sementit %6,70 oranında C içerir ve karbonca zengindir. Şekil 2.8’de görüldüğü gibi bu işlemin kendini tekrar etmesi ile katmanlı yapı tane sınırları boyunca yayılır. Birbirine paralel olarak bulunan lamellar koloni olarak adlandırılır. Bir perlit tanesi genellikle birkaç perlit kolonisi içerir. Genellikle ferrit ve sementit tabakalarının kalınlıklarının oranı yaklaşık

olarak 8:1 şeklindedir. Tabaka kalınlıkları ve oranları, dönüşümün olduğu sıcaklığa bağlı olarak değişmektedir [32-35].



Şekil 2.8. (a) Perlitik çeliklerin mikroyapısının gösterimi (b) Östenit tane sınırlarında ve tane köşelerinde perlit oluşumu ve büyümesi [35]

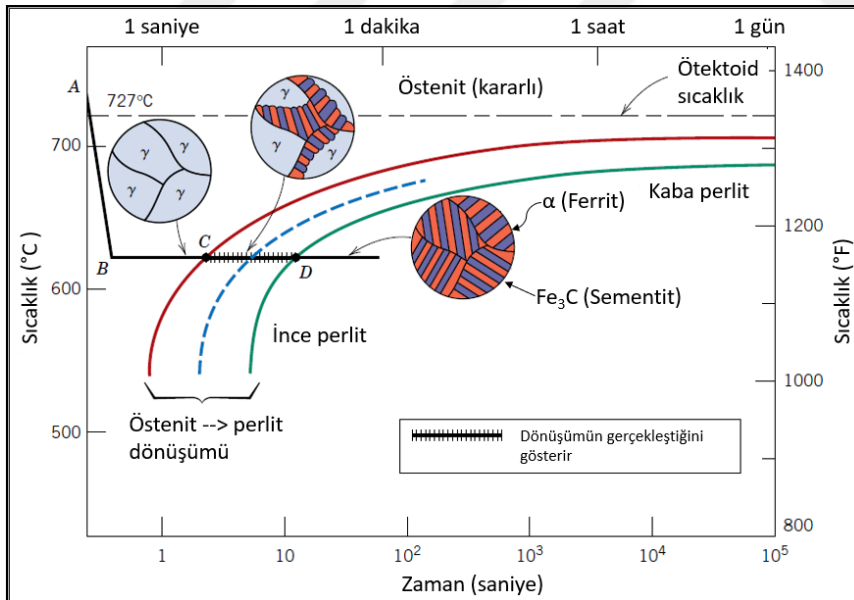
Pernach [35] çalışmasında perlit kolonilerinin tek bir östenit tanesi üzerinden yanal ve alın düzlemlerinden büyüme kinetiğini anlatmıştır. Östenit/segmentit ve östenit/ferrit arayüz konsantrasyonları termodinamik olarak dengededirler. Östenit tane sınırlarındaki çekirdeklenme başlangıcı rastgele seçilmiştir. İlk ve sonraki segmentit plakalarının çekirdeklenmesi karbon kütle dengesi sonucunda oluşur. Segmentit y ekseninde büyümeye başlar ve bu ekseninde içerdiği karbon 0,05%C miktarına ulaştığında büyümesi durur. Bunu simetrik olarak ferrit plakalarının oluşması takip eder. Ferrit plakalarının büyümesi ile karbon atomları östenit tanelerine doğru itilir. Bu bölgelerde tekrar yoğunlaşan karbon atomları yeni segmentit plakalarının oluşmasına sebep olur. Yeni segmentit plakalarının oluştuğu bölgenin mesafesi bir önceki oluşan segmentit plakasının kalınlığının 7 katından daha büyüktür. Östenitik fazın tamamen kaybolana kadar bu dönüşüm kendini tekrarlar. Plakalar yeteri kadar büyüdüklerinde birbirlerine çarpacaktır ve büyüme duracaktır.



Şekil 2.9. (a) Sementitin yanal büyüme kinetiği, (b) Perlitin yanal büyüme kinetiği, (c) Perlit kolonisinin alın düzleminde büyümesi. C_γ = Östenit/sementit sınır yüzeyindeki karbon miktarı $C_{\gamma\alpha}$ = Östenit/ferrit sınır yüzeyindeki karbon miktarı [35]

Ferrit ve sementit plakalarının büyümesi hacim difüzyonu ve arayüzey hareketliliği ile kontrol edilir. Östenitin içerisindeki karbon atomlarının hacim difüzyonu, Fick's yasasının ikinci kuralı ile açıklanır.

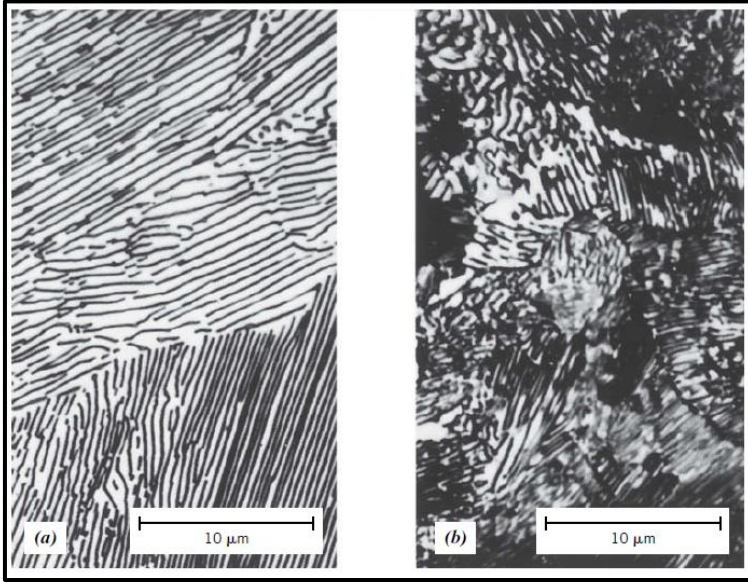
$$\frac{\partial y}{\partial x} = \nabla \cdot D \nabla c \quad (D\text{-difüzyon sabiti, } c\text{-karbon konsantrasyonu, } t\text{-zaman}) \quad (\text{Eş. 2.2})$$



Şekil 2.10. Ötektoid demir-karbon alaşımının izotermal dönüşüm diyagramı [32]

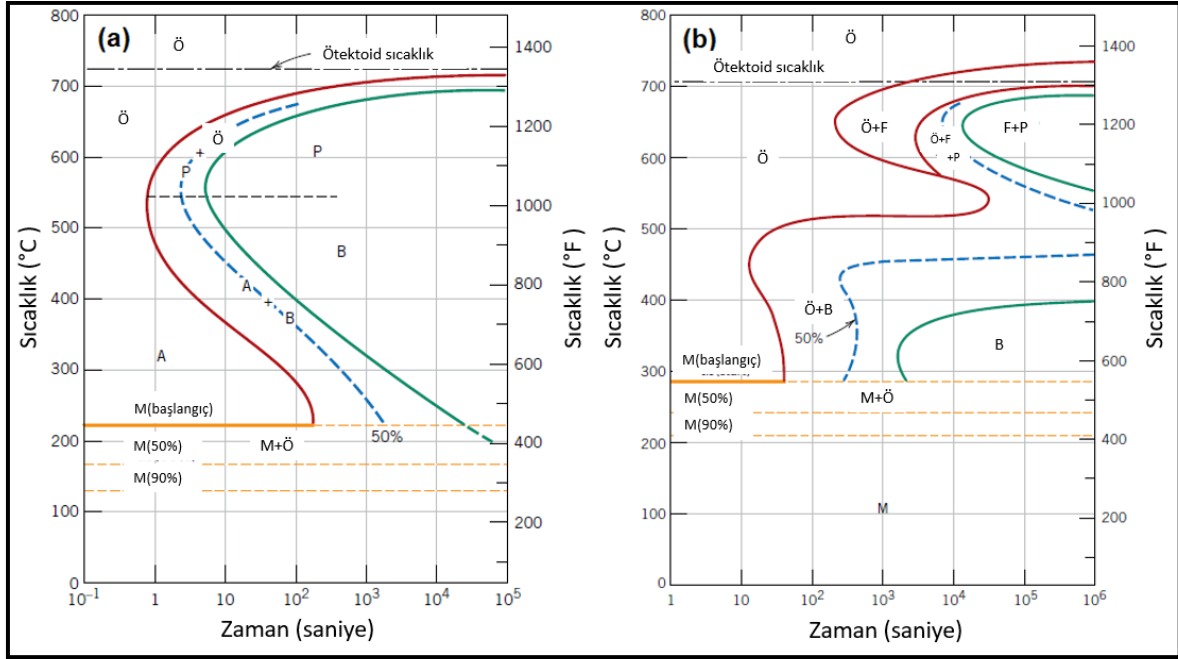
Şekil 2.10'da ABCD ısıtılma işlemine tabi tutulmuş ötektoid demir karbon alaşımının faz değişimleri görülmektedir. Östenit ilk olarak A noktasından B noktasına hızlı soğutulmuş ve sonrasında BCD yatay çizgisindeki mikroyapı dönüşümü gösterilmiştir. C noktasında östenit perlit dönüşümü başlar ve D noktasında dönüşüm tamamlanır. Ötektoid sıcaklığın hemen

altındaki izotermal dönüşüm sıcaklıklarında nispeten daha kalın ferrit ve sementit tabakaları oluşur. Oluşan bu yapıya kaba perlitik yapı (coarse pearlite) denir. Yüksek sıcaklıklarda artan difüzyon hızı C atomlarının daha fazla mesafelere gitmesine ve daha kalın lamellerin oluşmasına neden olur. İzotermal dönüşüm sıcaklığının azalması C atomlarının difüzyon hızını azaltır. Difüzyonun azalması ile daha ince lameller oluşur ve bu yapıya ince perlitik (fine pearlite) yapı denir.



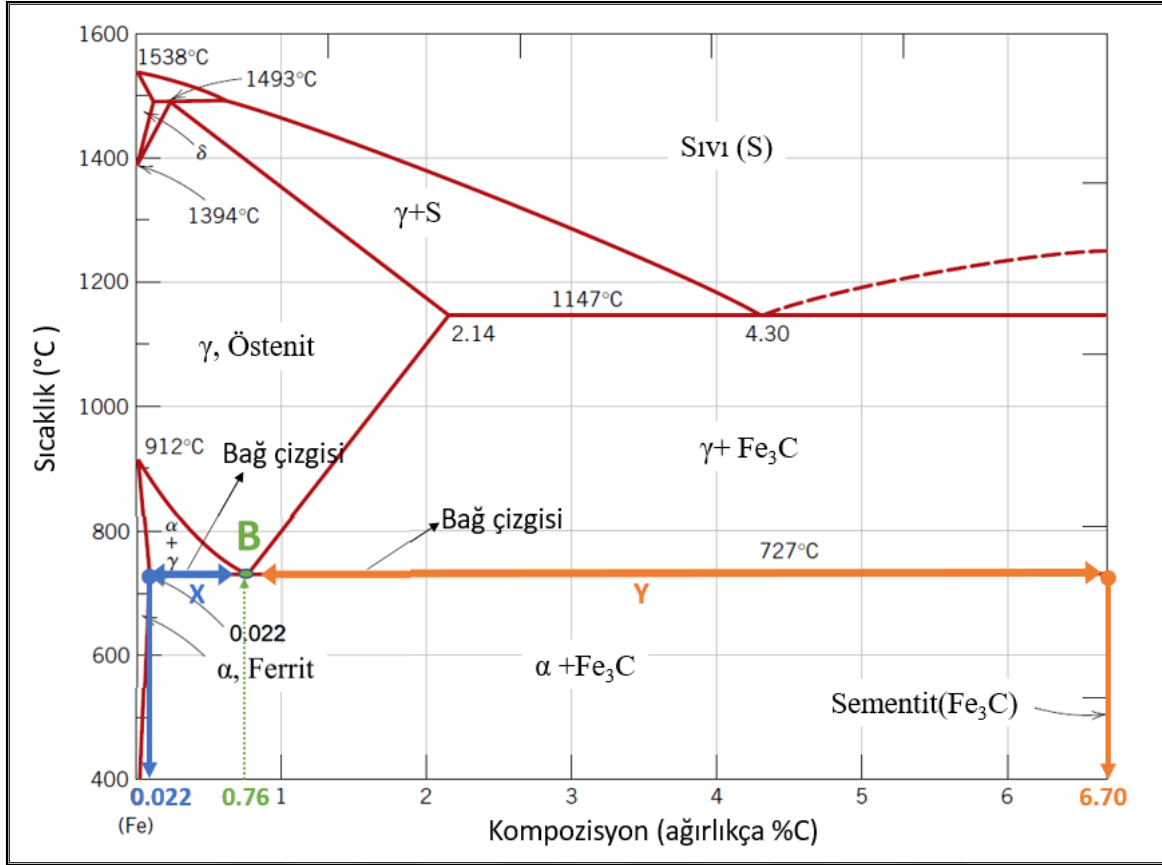
Resim 2.5. Kaba (a) ve ince (b) perlitik yapılara ait mikroskop görüntüleri (3000x büyütme) [32]

Karbon dışındaki elementlerin (Cr, Ni, Mo ve W gibi) ilavesi izotermal dönüşüm diyagramlarındaki eğrilerin pozisyonlarında ve şekillerinde önemli değişiklik meydana getirirler. Bu etkilerden en önemlisi östenit-perlit dönüşüm eğrisinin sağ tarafa doğru kayması ve daha uzun sürelerde gerçekleşmesidir. Şekil 2.11a ve b’de bu etki gösterilmiştir.



Şekil 2.11. İzotermal dönüşüm diyagramları (a) ötektoid kompozisyon (b) alaşımlı kompozisyon [32]

Dönüşümün gerçekleştiği sıcaklığa göre oluşacak fazlar kaldıraç kuralı ile hesaplanır. Kaldıraç kuralı ile hesap yapılırken verilen alaşım ve sıcaklık için yatay eksene paralel olarak uzanan ve iki fazlı bölgeyi boydan boya kesen bir bağ çizgisi çizilir. Bağ çizgisi ile faz sınırlarını belirleyen çizgilerin kesiştiği noktalar belirlenir. Bu noktalardan aşağı doğru düşey çizgiler çizilerek her fazın içerdiği bileşim değerleri bulunur. Bir faza ait oran, alaşımın bileşim değeri ile diğer faza ait sınır çizgisine olan uzaklığın, bağ çizgisinin tüm uzunluğuna bölünmesi ile bulunur [32].



Şekil 2.12. Demir - karbon faz diyagramı [32]

Ağırlıkça %0,76 C içeren bir çeliğin ötektoid dönüşüm sıcaklığının hemen altında içerdiği fazların oranı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$W_{\text{Ferrit}} = Y / (X+Y) \quad (\text{Eş. 2.3})$$

$$W_{\text{Ferrit}} = (6,70-0,76) / (6,70-0,022) = 0,88$$

$$W_{\text{Sementit}} = X / (X+Y) \quad (\text{Eş. 2.4})$$

$$W_{\text{Sementit}} = (0,76-0,022) / (6,70-0,022) = 0,12$$

Ötektoid dönüşüm sıcaklığının üzerindeki farklı sıcaklıklarda oluşacak östenit miktarını ve bu östenitin havada soğuma sonrası dönüşeceği perlit miktarının hesaplanmasında da kaldıraç kuralı kullanılır. Küresel grafitli dökme demirlerde ötektoid sıcaklığının üzerine çıkıldıkça östenit miktarının arttığı, bu yapının havada soğutulması ile elde edilen mikroyapılarda perlit hacim oranının arttığı araştırmacılar tarafından da bulunmuştur [30].

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

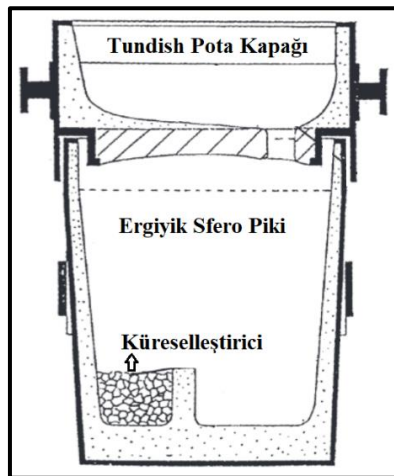
3.1. Malzeme

Deneysel çalışmalarda kullanılan EN-GJS-700-2 standardına uygun alaşımsız küresel grafitli dökme demirin kimyasal kompozisyonu Çizelge 3.1’de verilmiştir.

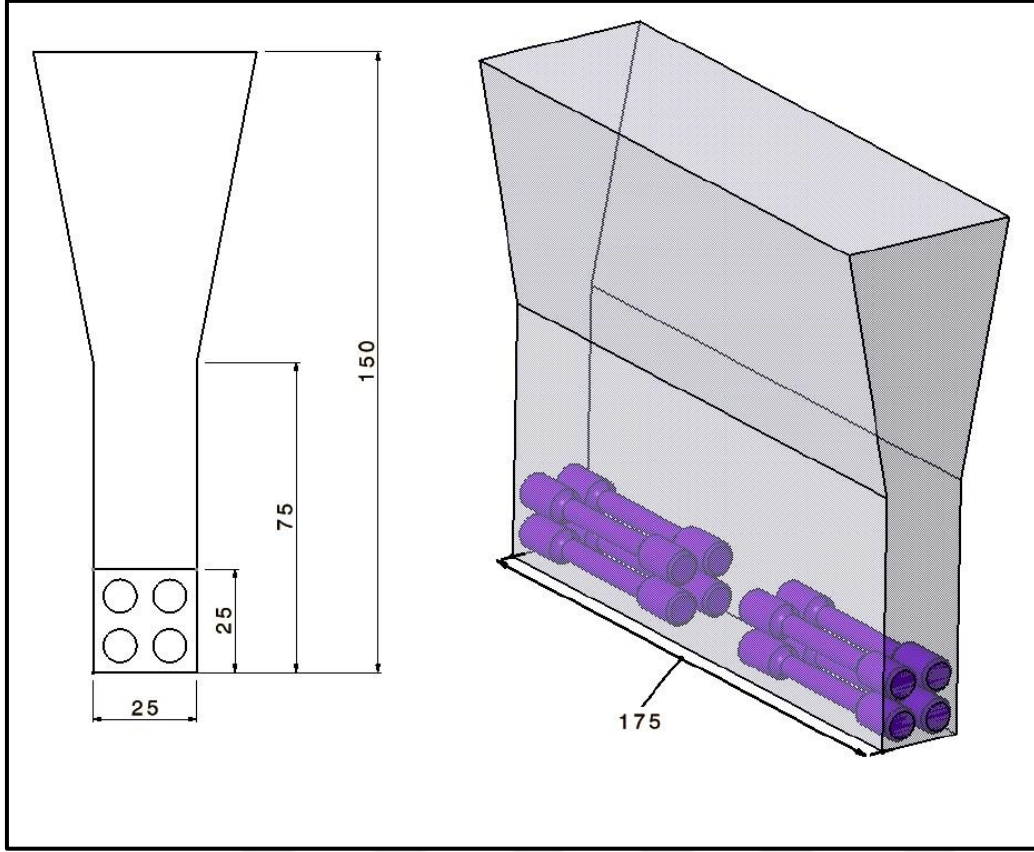
Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan EN-GJS-700-2 küresel grafitli dökme demirin kimyasal kompozisyonu (ağırlıkça %)

C	Si	Mn	P	S	Mg	Cr
3,685	2,493	0,305	0,025	0,012	0,045	0,021
Ni	Cu	Al	Ti	V	Co	Fe
0,015	0,524	0,005	0,012	0,005	0,018	Kalan

Kullanılan döküm malzemelerin üretiminde 1000 kg kapasiteli orta frekanslı indüksiyon ocağı kullanılmıştır. Ergimiş metal döküm sıcaklığına ulaştığında 250 kg kapasiteli Tundish tipi işlem potasına alınmıştır (Şekil 3.1.) ve %6-7 Mg içeren ferrosilikon alyaj ilave edilmiştir. 1450 °C’de Mg kullanılarak küreselleştirme işlemi yapılmıştır. Ergimiş metal daha sonra döküm potasına alınmış ve aşılama işlemi gerçekleştirilmiştir. 1400-1450°C sıcaklıktaki sıvı metal ASTM A536 [36] standardına göre hazırlanan Y blok kum kalıplara dökülmüştür (Şekil 3.2.). Kimyasal kompozisyon Bruker Q4 Tasman optik emisyon spektrometresi kullanılarak çil numune analiz edilerek belirlenmiştir.



Şekil 3.1. Tundish tipi küreselleştirme potası



Şekil 3.2. Çalışmalarda kullanılan ve ASTM A536 standardına göre dökümleri gerçekleştirilen Y-blok ve ölçüleri (mm)

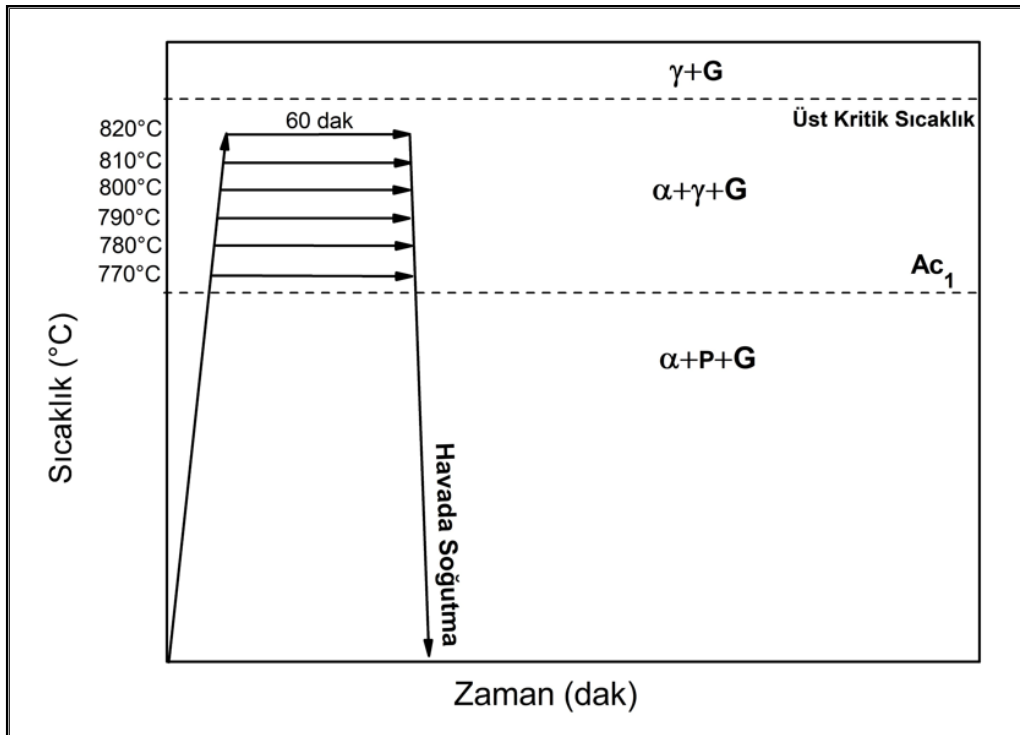
3.2. Isıl İşlem

Isıl işlemlerde Heraeus marka fırın kullanılmıştır. (Şekil 3.3.a.) Elektrik direnci ile çalışan 1150°C'ye kadar tavlamanın yapılabildiği $\pm 1^\circ\text{C}$ duyarlılığa sahip atmosfer kontrolü olmayan bir fırında arakritik östenitleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Isıl işlemler sırasında numunelerin yüzeylerinde oluşabilecek dekarbürizasyon oluşumu öngörülerek numunelere gerekli işleme payı bırakılmıştır. Her biri Ø12 x 110mm boyutlarındaki numuneler beşer adet olarak gruplanmıştır ve ısıl işlemler bu şekilde gerçekleştirilmiştir. (Şekil 3.3b.)



Şekil 3.3. (a) Çalışmalarda kullanılan ısıtma fırını (b) Isıl işlem görmüş numuneler

Araştırma östenitleme sıcaklığının kontrolü çekme numunelerinin üzerine direnç kaynağı ile kaynatılan K tipi ısıtma çift aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. 770°C, 780°C, 790°C, 800°C, 810°C, 820°C araştırmalı östenitleme sıcaklıklarında 1 saat östenitlenen Ø12 x 110 mm boyutlarındaki küresel grafitli dökme demir numuneler durgun havada soğutulmuştur (Şekil 3.4.).

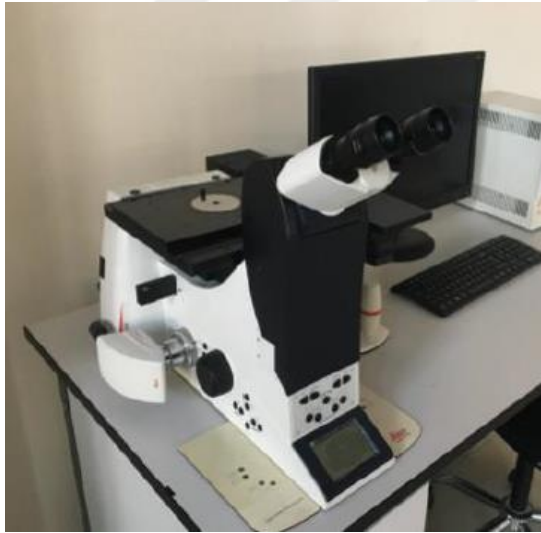


Şekil 3.4. Uygulanan ısıtma işlemlerinin şematik gösterimi

3.3. Metalografik Çalışmalar

Isıl işlem uygulanan numunelerden Ø12x12mm boyutlarında parçalar kesilmiş ve metalografik inceleme için hazırlanmıştır. Metalografik incelemenin yapılabilmesi için ısıtma işlemi sırasında oluşan dekarbürize bölgeyi uzaklaştırmak için yüzeyden 0,5 mm taşlanmıştır. Zımparalama işlemi sırasıyla 220, 400, 800 ve 1200 grit SiC su zımparaları kullanılarak yapılmıştır. Parlatma işlemleri sırasıyla 6 µm, 3 µm ve 1 µm kendinden yağlayıcı elmas süspansiyonlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir. %2 Nital (%2 HNO₃ + %98 CH₃OH) çözeltisi dağlayıcı olarak kullanılmıştır.

KGDD numunelerde nodülarite, nodül sayısı, perlit ve ferrit hacim oranlarının hesaplanmasında Leica Application Suite (versiyon 4.6) görüntü analiz programı kullanılmıştır. 100 büyütmede 10 ayrı bölgeden yaklaşık 2,5 mm² alandan çekilen mikroyapılar kullanılarak hacim oranı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bütün mikroyapıların görüntülenmesinde Leica DFC 320 dijital kamera bağlantılı Leica DMI 5000M marka optik mikroskop kullanılmıştır (Şekil 3.5).



Şekil 3.5. Leica DMI 5000M optik mikroskop

Kırık yüzey karakterizasyonu ve numunelerin kırılma modlarının belirlenmesi için Jeol JSM 6060 LV tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır (Şekil 3.6.).



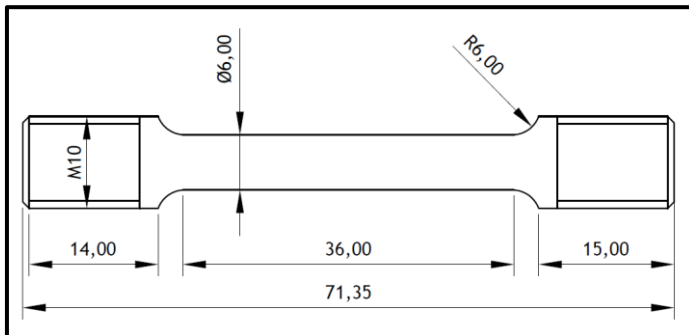
Şekil 3.6. Jeol JSM 6060 LV tarama elektron mikroskobu

3.4. Mekanik Testler

Isıl işlem uygulanan numunelerin mekanik özelliklerini incelemek için çekme ve sertlik testleri yapılmıştır.

3.4.1. Çekme testi

Isıl işlem uygulanan numuneler çekme testleri için ASTM E8M standardına göre işletilmiştir [37]. Çekme numunelerin boyutları Şekil 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.7. Çekme numunesi boyutları (ölçüler mm’dir)

Çekme testlerinde Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip universal test cihazı kullanılmış ve testler oda sıcaklığında yapılmıştır (Şekil 3.8). Çekme testleri $0,0067 \text{ s}^{-1}$ gerinme hızında gerçekleştirilmiştir. Numunelerin kırılma enerjisi değeri gerilme-

gerinme eğisinin altında kalan alan BlueHill 2 yazılımı aracılığıyla elde edilmiştir. Aynı ısıtma işlem grubundaki 5 numune çekme testine tabi tutulmuş ve deneysel sonuçlarda ortalama değer alınmıştır.



Şekil 3.8. Çekme testlerinde kullanılan Instron 3369 model 50 kN çekme ve basma kapasitesine sahip üniversal test cihazı

3.4.2. Sertlik testi

Sertlik ölçümlerinde Emcotest DuraVision 200 model sertlik ölçme cihazı kullanılmıştır (Şekil 3.9). Sertlik ölçümleri Brinell (HB) yöntemiyle 2.5 mm tungsten karbür bilya ve 187.5 kgf yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Parlatılmış haldeki metalografik numunelerin 10 farklı bölgesinden sertlik ölçümü yapılmış ve bu değerlerin ortalaması alınmıştır.

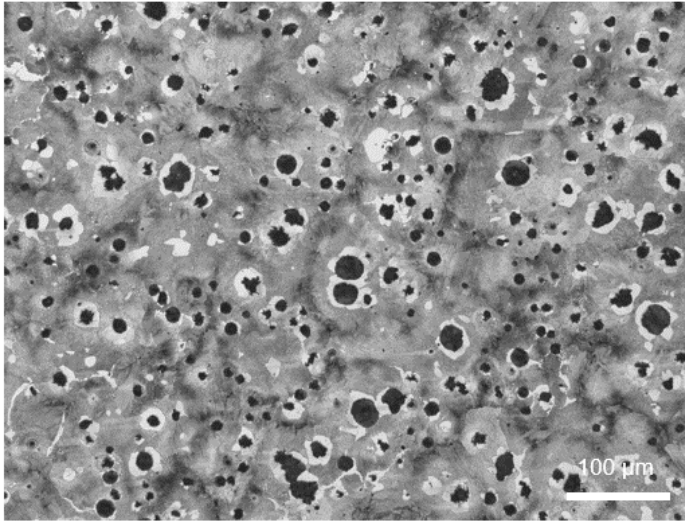


Şekil 3.9. Sertlik ölçümlerinde kullanılan Emcotest DuraVision 200 model sertlik ölçme cihazı

4. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

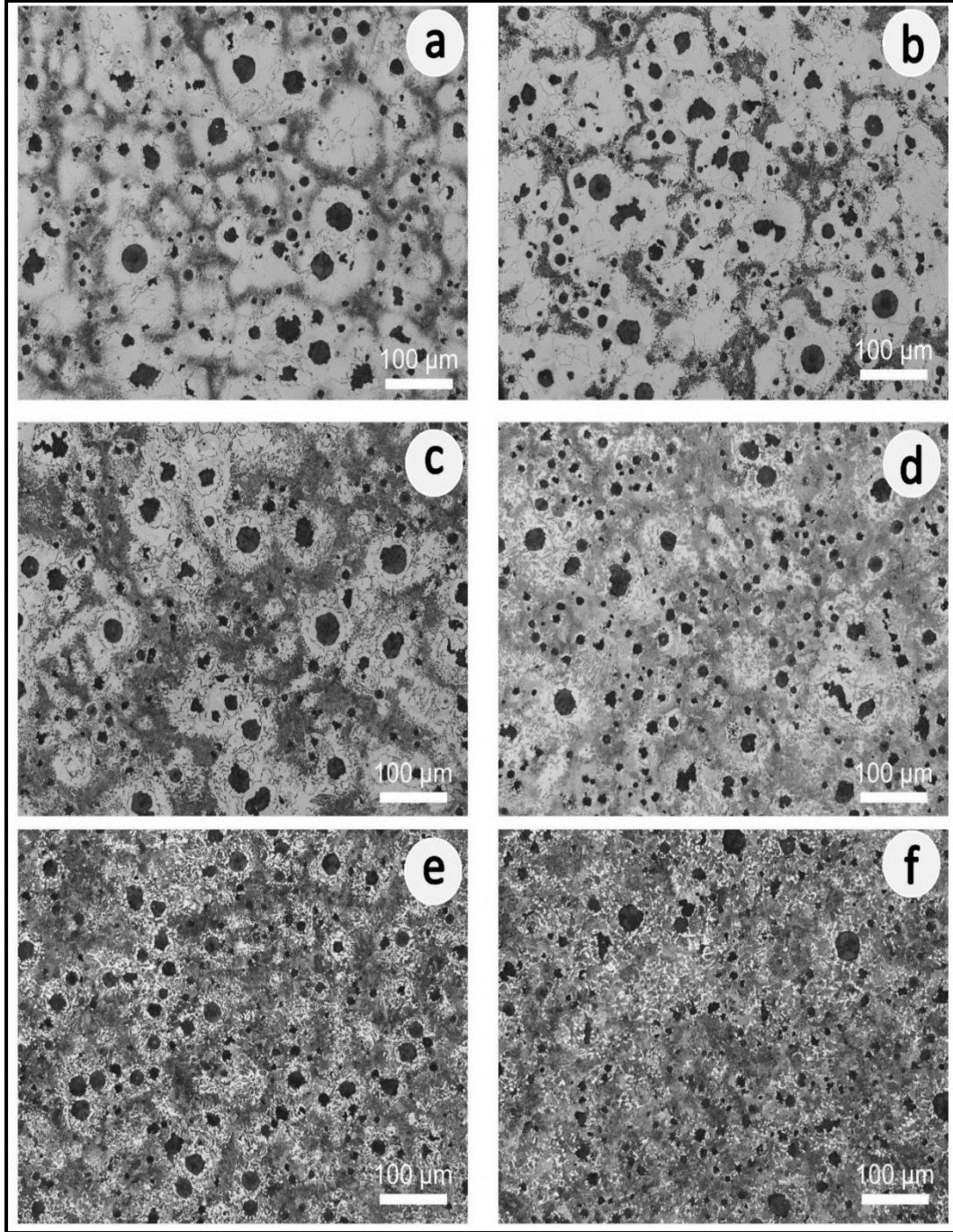
4.1. Mikroyapı İncelemesi

İşlemsiz haldeki numunenin optik mikroyapısı Resim 4.1’de verilmiştir. İşlemsiz haldeki numunenin perlitik yapıdan oluştuğu ve küresel grafitlerin çevresinin ferrit ile kuşatıldığı görülmüştür. Bu yapı dana gözü yapı olarak bilinen tipik perlitik KGDD mikroyapısı ile uyumlu bir mikroyapıdır. Dökülmüş haldeki KGDD’in nodülaritesi %93 ve nodül sayısı 216 adet/mm² olarak ölçülmüştür.



Resim 4.1. Dökülmüş haldeki alaşımsız EN-GJS-700-2 küresel grafitli dökme demirin mikroyapısı

Resim 4.2.a, b, c, d, e ve f’de sırasıyla 770°C, 780°C, 790°C, 800°C, 810°C, 820°C arakritik östenitleme sıcaklıklarında 1 saat östenitlenmiş ve havada soğutulmuş numunelerin optik mikroyapıları verilmiştir. Mikroyapılar incelendiğinde artan arakritik östenitleme sıcaklığının beyaz olan ferrit bölgelerini azalttığı, koyu renkli tonlarda olan perlit hacim oranının arttığı görülmüştür. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından ısıtılmış numunelerde artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile dana gözü yapı kaybolmuştur. Bunun yerine grafit çevresini perlit almıştır. Kritik sıcaklık üstüne çıkıldığında tane sınırlarındaki yüksek difüzyon hızı sebebiyle östenit ilk olarak α/α tane sınırlarında ve ötektik hücre sınırlarında tercihli olarak çekirdeklenmiştir. Bu sonuç literatürdeki sonuçlarla paralellik göstermektedir [38, 39].

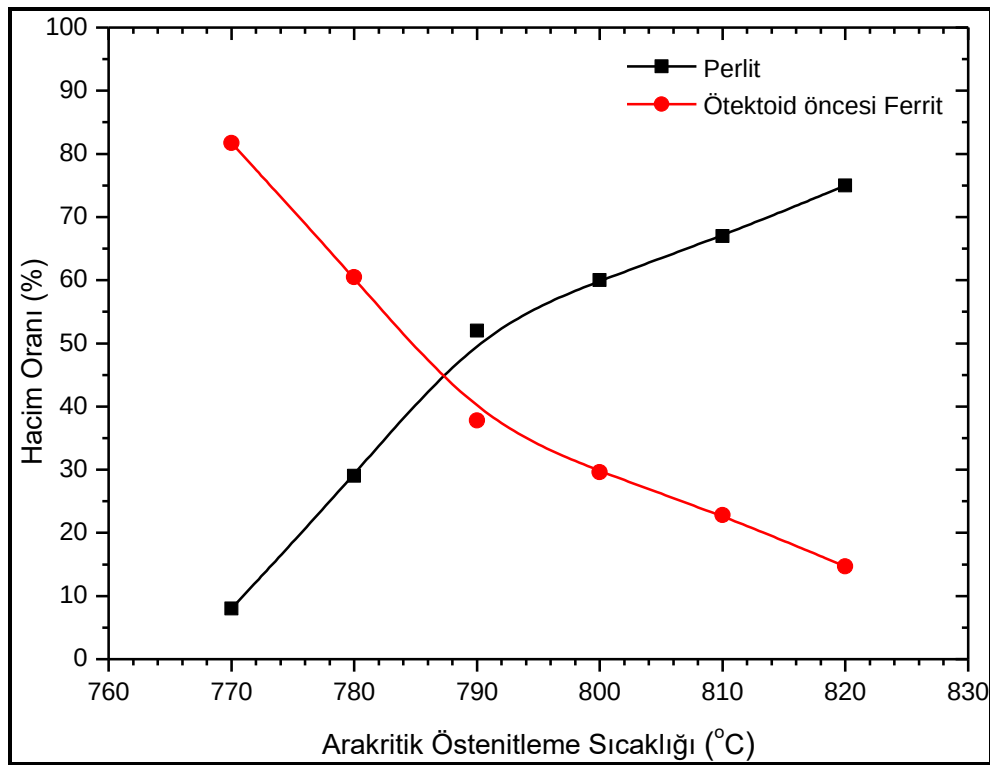


Resim 4.2. Farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarında 1 saat östenitlenmiş ve havada soğutulmuş KGDD'in mikroyapıları; (a) 770°C, (b) 780°C, (c) 790°C, (d) 800°C, (e) 810°C, f) 820°C

4.2. Perlit Hacim Oranı

Şekil 4.1'de arakritik östenitleme sıcaklığı ile perlit hacim oranı arasındaki ilişki verilmiştir. Grafikten görüleceği üzere artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile perlit hacim oranı artarken ötektoid öncesi ferrit hacim oranı azalmaktadır. Bunun nedeni $\alpha+\gamma+G$ bölgesinde tavlama

sırasında artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile kaldıraç kuralı gereğince artan östenit miktarıdır. Arakritik sıcaklıktaki östenit fazının tamamının perlite dönüştüğü kabul edilmiştir. Arakritik sıcaklıktaki östenit oda sıcaklığına havada soğutulduğunda ince perlitik yapıya dönüşmektedir. Çalışmalarda kullanılan 770°C, 780°C, 790°C, 800°C, 810°C, 820°C sıcaklıklarında yapılan östenitleme sonrasında sırasıyla %8, %29, %52, %60, %67 ve %75 perlit hacim oranları elde edilmiştir (Çizelge 4.1). Tüm numunelerde küresel grafit miktarı yaklaşık %10 oranında sabit olarak kalmıştır. Literatürdeki çalışmalarda da [18, 30] perlit hacim oranının kritik sıcaklığın artışı ile arttığı görülmektedir.



Şekil 4.1. Arakritik östenitleme sıcaklığına bağlı olarak perlit ve ötektoid öncesi ferrit hacim oranının değişimi

Çizelge 4.1. Numunelerin metalografik ölçüm sonuçları

Numune Adı	Grafit Hacim Oranı (%)	Ötektoid öncesi Ferrit Hacim Oranı (%)	Perlit Hacim Oranı (%)
Dökülmüş halde	10,1 ± 1,2	19,9 ± 2,1	70 ± 3,1
770 °C	10,3 ± 1,1	81,7 ± 2,1	8 ± 2,4
780 °C	10,5 ± 1,3	60,5 ± 2,2	29 ± 2,8
790 °C	10,2 ± 1,2	37,8 ± 2,3	52 ± 3
800 °C	10,4 ± 1,4	29,6 ± 2,2	60 ± 3,1
810 °C	10,2 ± 1,4	22,8 ± 2,4	67 ± 3,4
820 °C	10,3 ± 1,5	14,7 ± 2,5	75 ± 3,5

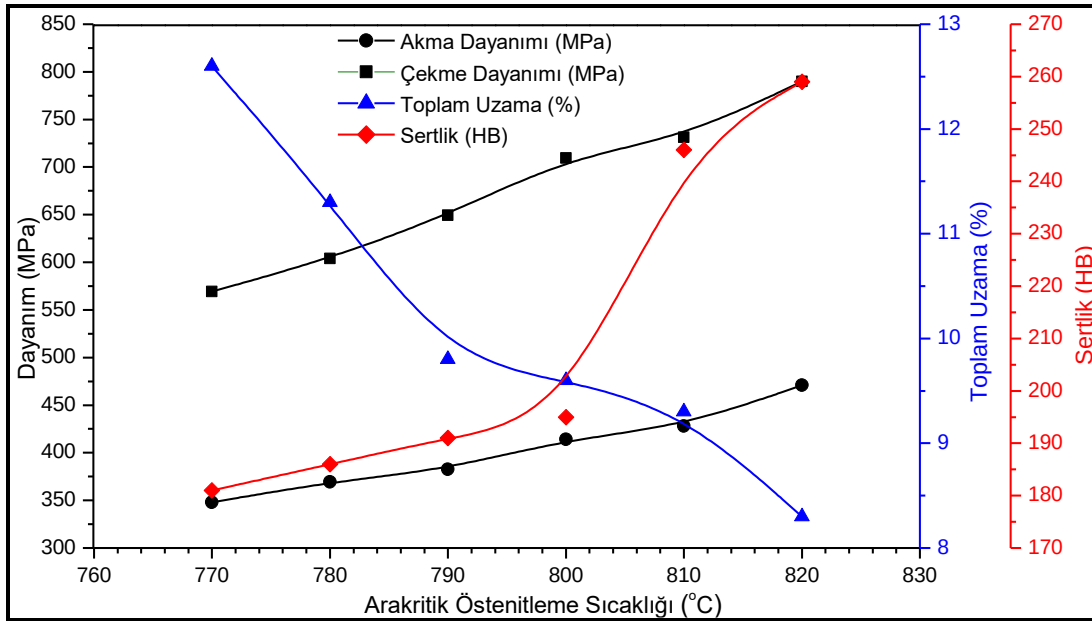
4.3. Mekanik Test Sonuçları

Çizelge 4.2’de çekme ve sertlik deneyleri sonucu elde edilen mekanik özellik değerleri verilmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutulmuş KGDD’in akma dayanımı 348-471 MPa ve çekme dayanımı 569-790 MPa arasında değişmektedir. 810°C’de yapılan ısıtıl işlem sonrası elde edilen akma ve çekme dayanımı değerleri dökülmüş haldeki numunenin dayanım değerlerine yakındır. Artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla akma ve çekme dayanımı belirgin bir şekilde artarken toplam % uzama değeri dramatik bir şekilde azalmaktadır. Kesit daralması artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile azalmış, kırılma enerjisi ise artan sıcaklıkla birlikte azalma sergilemiştir (Çizelge 4.2).

Çizelge 4.2. Numunelerin mekanik test sonuçları

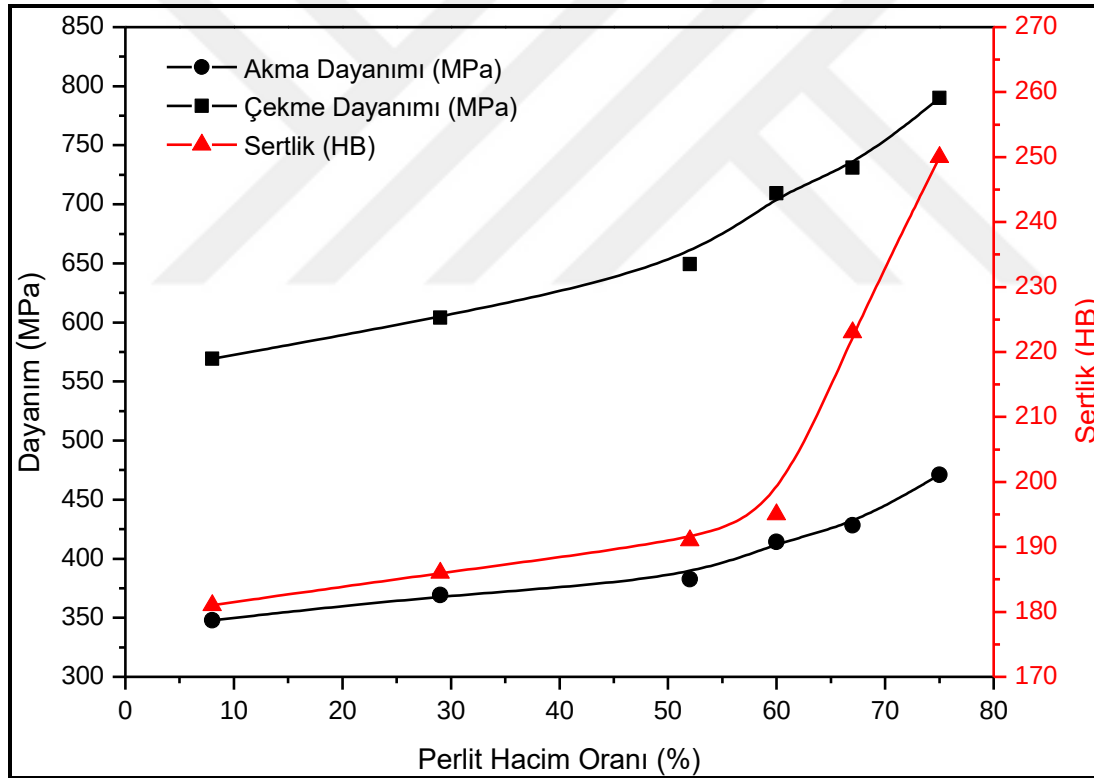
Numune Adı	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Toplam Uzama (%)	Kesit Alan Daralması (%)	Kırılma Enerjisi (Joule)	Sertlik (HB 2,5/187,5)	Çekme dayanımı x Toplam Uzama (GPa.%)
Dökülmüş halde	418,3 ± 3,7	737,8 ± 3,4	7,65 ± 0,9	6 ± 1,1	33,7 ± 5,4	204 ± 1,5	5,64
770 °C	347,9 ± 9,7	569,1 ± 11,7	12,6 ± 1,1	11,3 ± 2,2	46,1 ± 7,4	181 ± 1,5	7,17
780 °C	369,3 ± 8,1	603,9 ± 2,2	11,3 ± 0,5	10,3 ± 0,3	43,3 ± 4,1	186 ± 2,2	6,82
790 °C	382,6 ± 4,3	649,3 ± 22,7	9,8 ± 0,9	8 ± 0,9	42,1 ± 2,2	191 ± 2	6,36
800 °C	414,1 ± 12,5	709,4 ± 21,5	9,6 ± 1,2	7,2 ± 0,3	40,2 ± 3,9	195 ± 3,5	6,81
810 °C	428,2 ± 9,6	731,1 ± 12,4	9,3 ± 0,9	6,6 ± 0,8	40,1 ± 6,9	246 ± 3,3	6,8
820 °C	470,9 ± 2,8	790,1 ± 6,8	8,3 ± 1,3	5,8 ± 0,2	39,5 ± 3,4	259 ± 4	6,56

Sertlik ölçümleri incelendiğinde 181-259 HB arasında değişen değerler görülmüştür. Artan arakritik sıcaklık sertlik ölçümlerinde artış göstermiştir. Artış ilk olarak düşük eğimle başlamış devamında 810°C’de yapılan kritik tavlamadan elde edilen sertlik değerinde yüksek bir artış görülmüştür ve grafik bu eğimle devam etmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi Şekil 4.2’de gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Arakritik östenitleme sıcaklığına bağlı olarak mekanik özelliklerin değişimi

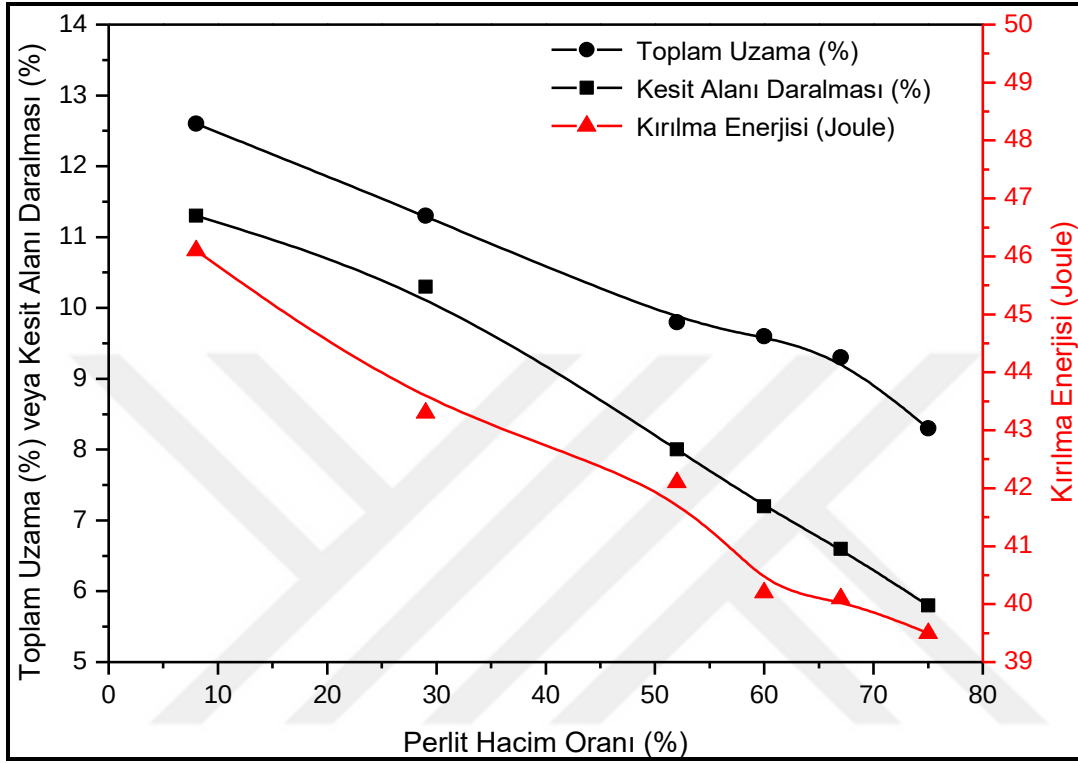
Perlit hacim oranı ve sertlik, akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişki Şekil 4.3'te gösterilmektedir. Artan perlit hacim oranıyla sertlik, akma ve çekme dayanımı artmaktadır. Nispeten sert bir yapı olan perlit hacim oranının artması dağılım mukavemetlenmesinde artışa neden olduğundan sertlik, akma ve çekme dayanımında artışa neden olmuştur. Perlit hacim oranının %9'dan %60'a artması çekme dayanımının 569 MPa'dan 709 MPa'ya artmasına neden olurken, perlit hacim oranının %60'dan %75'e artması çekme dayanımını 709 MPa'dan 790 MPa'ya artmasına neden olmuştur. Özellikle %60 perlit hacim oranından sonra dayanım ve sertlikte çok belirgin artış gözlenmiştir. Literatürdeki çalışmalarda artan perlit hacim oranı ile akma, çekme dayanımları ve sertliğin arttığı rapor edilmiştir [40-42]. Deneysel çalışmada elde edilen değerlerin literatürdeki çalışmalara paralel sonuçlar gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.3. Perlit hacim oranı ile sertlik, akma ve çekme dayanımı arasındaki ilişki

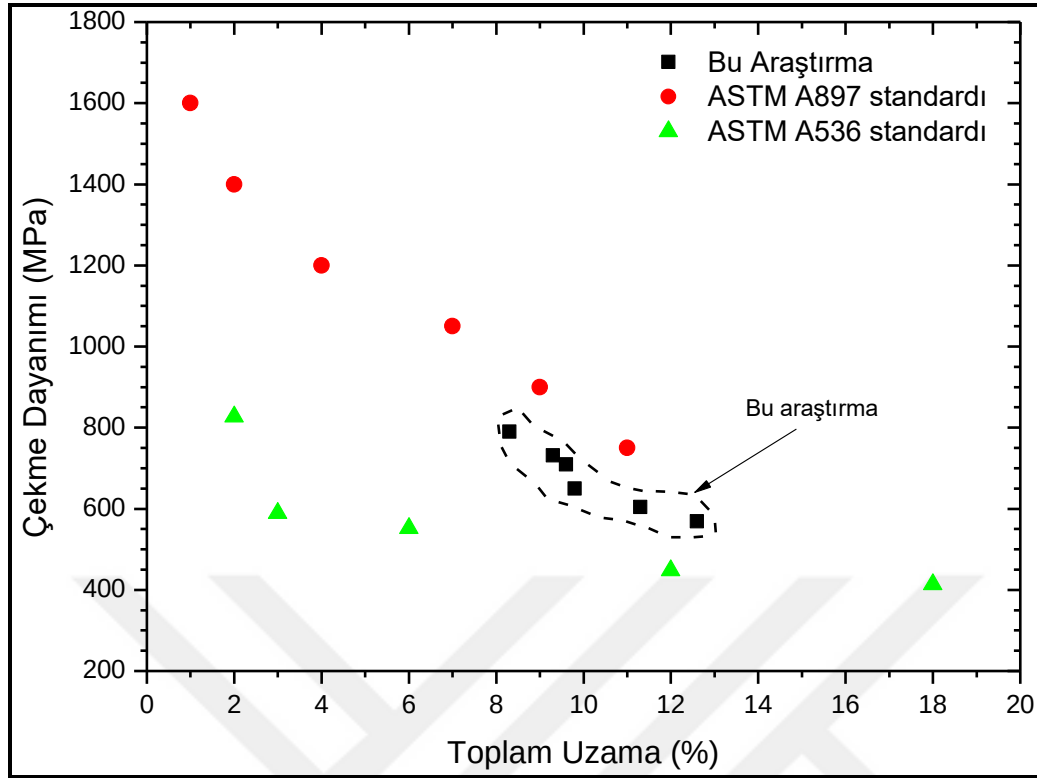
Perlit hacim oranı ve toplam uzama, kesit alan daralması ve kırılma enerjisi arasındaki ilişki Şekil 4.4'te gösterilmektedir. Artan perlit hacim oranıyla toplam uzama, kesit alan daralması ve kırılma enerjisi doğrusal olarak azalmaktadır. Nispeten sert bir yapı olan perlit hacim oranının artması dağılım mukavemetlenmesinde artışa neden olurken, yumuşak ve sünek ötektoid öncesi ferrit hacim oranının azalmasından dolayı bahsedilen bu mekanik özellik

değerlerinde azalma gözlenmiştir. R.A. Gonzaga yaptığı çalışmada benzer olarak perlit hacim oranındaki artışın kırılma enerjisi ve toplam uzama değerlerinde azalmaya sebep olduğunu tespit etmiştir [41].



Şekil 4.4. Perlit hacim oranı ile toplam % uzama, kesit alan daralması ve kırılma enerjisi arasındaki ilişki

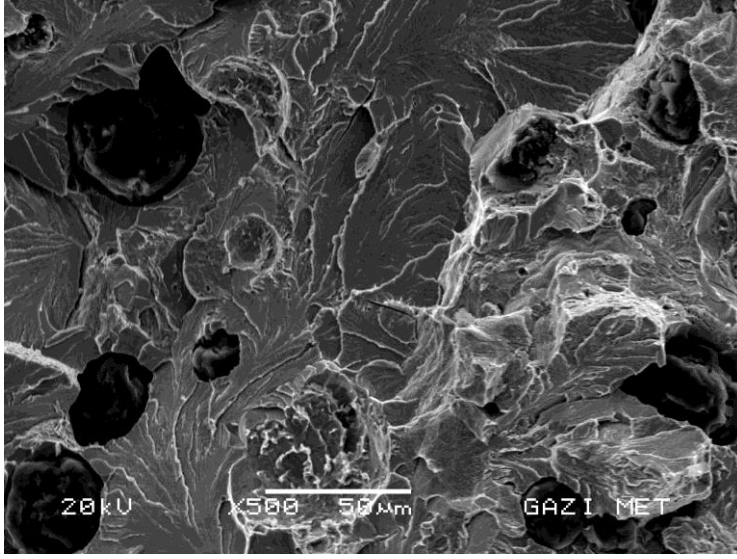
Bu deneysel çalışmada üretilen KGDD numunelerin çekme dayanımı ve toplam uzama değerlerinin ASTM standartlarında belirtilen KGDD'ler ile karşılaştırılması Şekil 4.5'te verilmiştir. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutulmuş ferrit + perlitik mikroyapıya sahip KGDD'lerin mekanik özellikleri ilgili ASTM standartlarıyla karşılaştırıldığında, östemperlenmiş KGDD'ler ile dökülmüş koşullardaki ferritik/perlitik KGDD'ler arasında çekme ve toplam uzama değeri sergiledikleri tespit edilmiştir. Özellikle % 75 perlit hacim oranına sahip 820°C'den havada soğutulmuş KGDD'in çekme dayanımı ve toplam % uzama değeri, ASTM A897'de 750/500/11 olarak ifade edilen ve çekme dayanımı 750 MPa ve toplam uzama değeri %11 olan ferrit+ösferrit mikroyapıya sahip östemperlenmiş KGDD'den daha yüksek dayanım ve toplam uzama değeri sergilemiştir.



Şekil 4.5. Bu çalışmada elde edilen çekme dayanımı ve toplam uzama değerlerinin ASTM standartlarıyla karşılaştırılması

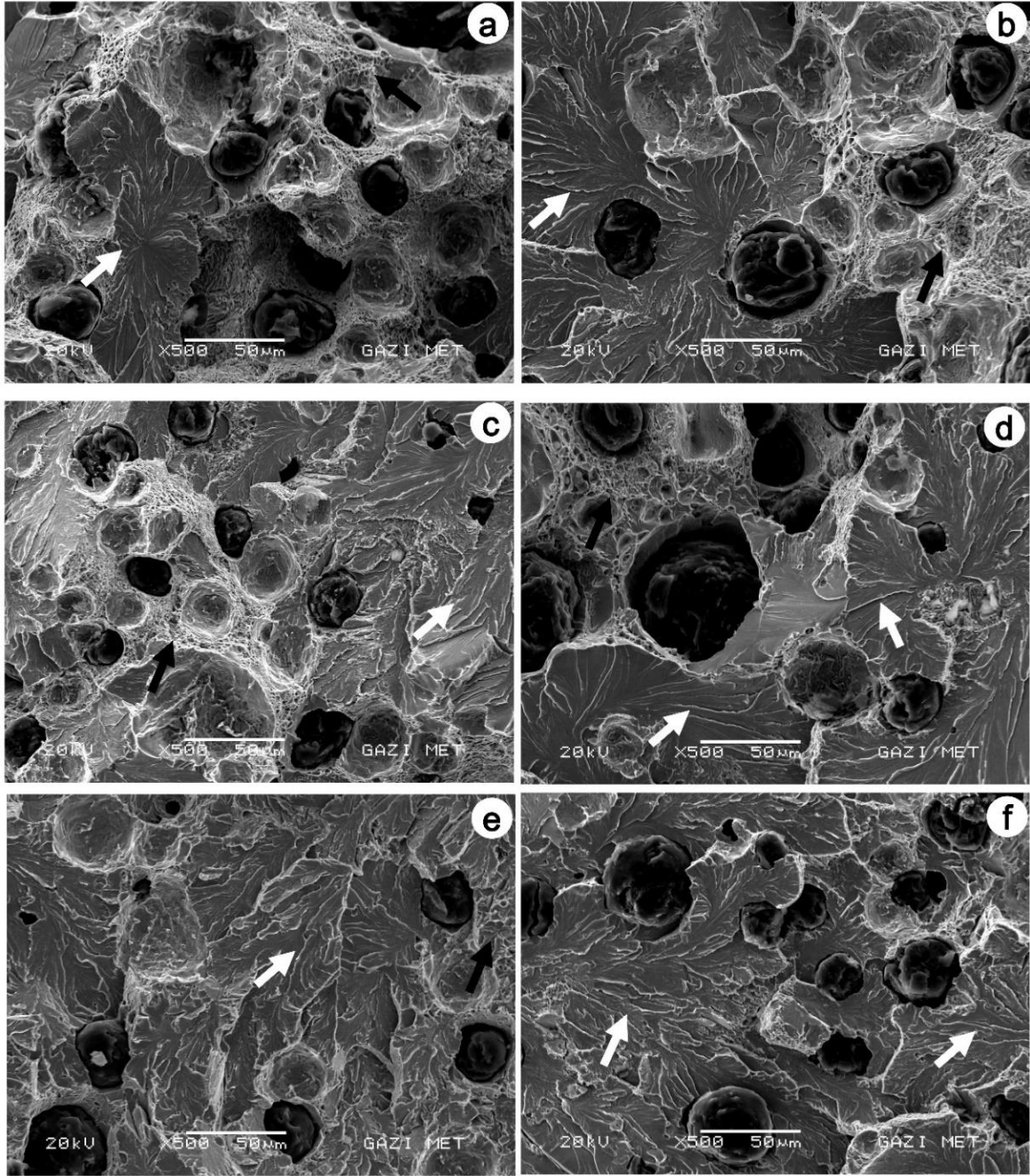
4.4. Kırık Yüzey İncelemesi

Çekme testi uygulanan numunelerin kırılma yüzeyleri taramalı elektron mikroskobu yardımıyla incelenmiştir. Isıl işlem uygulanmamış numunenin SEM görüntüsü Resim 4.3’de verilmiştir. Dökülmüş haldeki numunenin kırılma yüzeyi incelendiğinde sünek kırılmanın göstergesi olan çukurcuklar (dimples) ve gevrek kırılmanın göstergesi olan düzgün yüzey ayrılma (quasi-cleavage) bölgeleri beraber bulunmaktadır.



Resim 4.3. Dökülmüş haldeki numunenin kırık yüzey SEM resmi

Resim 4.4.a, b, c, d, e ve f’de sırasıyla 770°C, 780°C, 790°C, 800°C, 810°C, 820°C arakritik östenitleme sıcaklıklarında 1 saat östenitlenmiş ve havada soğutulmuş numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir. Çukurcukların (dimples) en fazla 770°C numunesinde, en az ise 820°C numunesinde oluştukları tespit edilmiştir. Kritik tavlama sıcaklığındaki artış kırık yüzeylerdeki çukurcukları azaltmıştır. Düzgün yüzey ayrılma (quasi-cleavage) bölgelerinin ise en fazla 820°C numunesinde, en az ise 770°C numunesinde oluştukları görülmüştür. Kritik tavlama sıcaklığındaki artış düzgün yüzey ayrılma kırılmasını arttırmıştır. Çukurcuk oluşumlarının sünek kırılmanın göstergesi olduğu ve düzgün yüzey ayrılma kırılmasının ise gevrek kırılmanın göstergesi olduğu literatürde belirtilmiştir [43]. Artan arakritik östenitleme sıcaklığı ile numunelerin kırılma modları sünek kırılmadan gevrek kırılmaya doğru değişmiştir.



Resim 4.4. Çekme numunelerinin kırık yüzey SEM resimleri (beyaz oklar gevrek klivaj kırılmayı siyah oklar ise sünek kırılma bölgelerini göstermektedir)

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuçlar

Bu çalışmada EN-GJS-700-2 standardına uygun küresel grafitli dökme demirde farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutmanın mikroyapı ve mekanik özellikler üzerine etkisi araştırılmış ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

1. Farklı arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutma ile %8 ile %75 arasında hacim oranlarında perlit içeren KGDD üretilebilmektedir.
2. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutulmuş numunelerde artan arakritik östenitleme sıcaklığıyla birlikte perlit hacim oranı artmakta ve ferrit hacim oranı %81,7'den %14,7'ye düşmektedir.
3. Artan perlit hacim oranıyla sertlik, akma ve çekme dayanımı belirgin bir şekilde artarken toplam % uzama değeri dramatik bir şekilde azalmaktadır.
4. Artan perlit hacim oranıyla kırılma modu sünekten gevreğe doğru değişmektedir.
5. EN-GJS-700-2 küresel grafitli dökme demirde arakritik östenitleme sıcaklığı kontrol edilerek farklı perlit hacim oranlarına (%8 ile %75 arasında) sahip küresel grafitli dökme demir üretilebilmektedir.
6. Arakritik östenitleme sıcaklıklarından havada soğutulmuş KGDD'lerin mekanik özellikleri ilgili ASTM standartlarıyla karşılaştırıldığında, östemperlenmiş KGDD'ler ile dökülmüş koşullardaki ferritik/perlitik KGDD'ler arasında çekme ve toplam uzama değeri sergilemektedirler.

5.2. Öneriler

1. Artan arakritik östenitleme sıcaklığının perlit lamelleri arasındaki mesafeye etkisi tarama elektron mikroskobu kullanılarak incelenebilir.
2. Farklı KGDD sınıfları arakritik östenitleme ve havada soğutma ısı işlemleri ile perlit hacim oranları değiştirilerek mikroyapı ve mekanik özellikleri birbirleriyle karşılaştırılabilir.



KAYNAKLAR

1. Jenkins, L. R. and Forrest, R. D., (1990). *Ductile iron, properties and selections: irons, steels and high performance alloys*. USA: American Standart for Metals International, 1063.
2. Elliot, R., (1988). *Cast iron technology*. London, UK: Butterworths&Co, 345.
3. Hughes, I. C. H., (1988). *Ductile iron in casting*. USA: American Standart for Metals International.: 647-666.
4. Karsay, S.I., (1979). *Ductile iron production and practices*. USA: American Foundrymen's Society, 133-141.
5. Davenport E. S. and Bain. E., (1970). Transformation of austenite at constant subcritical temperatures. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 117-143.
6. Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B., (2009). Transformation characteristics of ductile iron austempered from intercritical austenitizing temperature ranges. *Journal of Materials Science*, 44(5): 1394-1403.
7. Kilicli, V. and Erdogan, M., (2010). The nature of the tensile fracture in austempered ductile iron with dual matrix microstructure. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 19(1): 142-149.
8. Erdogan, M., Kilicli, V., and Demir, B., (2008). The influence of the austenite dispersion on phase transformation during the austempering of ductile cast iron having a dual matrix structure. *International Journal of Cast Metals Research*, 99(7): 751-760.
9. Sahin, Y., Erdogan, M., and Kilicli, V., (2007). Wear behavior of austempered ductile irons with dual matrix structures. *Materials Science and Engineering A*, 444(1-2): 31-38.
10. Kilicli, V. and Erdogan, M., (2007). Effect of ausferrite volume fraction and morphology on tensile properties of partially austenitised and austempered ductile irons with dual matrix structures. *International Journal of Cast Metals Research*, 20(4): 202-214.
11. Kilicli, V. and Erdogan, M., (2006). Tensile properties of partially austenitised and austempered ductile irons with dual matrix structures. *Materials Science and Technology*, 22(8): 919-928.
12. Panneerselvam, S., Putatunda, S., Gundlach, R., (2017). Influence of intercritical austempering on the microstructure and mechanical properties of austempered ductile cast iron (ADI). *Materials Science and Engineering A*, 694: 72-80.
13. Rashidi, A. M. and Moshrefi-Torbati, M., (2000). Effect of tempering conditions on the mechanical properties of ductile cast iron with dual matrix structure (DMS). *Materials Letters*, 45(3-4): 203-207.

14. Putatunda, S. K. and Gadicherla, P. K., (2000). Effect of austempering time on mechanical properties of a low manganese austempered ductile iron. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 9(2): 193-203.
15. Aristizabal, R., Foley, R., and Druschitz, A., (2012). Intercritically austenitized quenched and tempered ductile iron. *International Journal of Metalcasting*, 6(4): 7-14.
16. Sahin, Y., Erdogan, M., and Cerah, M., (2008). Effect of martensite volume fraction and tempering time on abrasive wear of ferritic ductile iron with dual matrix. *Wear*, 265(1-2): 196-202.
17. Zimba, J., Simbi, D. J., and Navara, E., (2003). Austempered ductile iron: an alternative material for earth moving components. *Cement and Concrete Composites*, 25(6): 643-649.
18. Sogut, M.U., (2019, June). *Controlling of pearlite volume fraction by air cooling from intercritical austenitizing temperatures in GGG70 ductile cast iron*. Paper presented at the International Iron and Steel Symposium, Karabük.
19. Kilicli, V., Cerah, M., ve Erdoğan, M., (2005, Eylül). *Küresel grafitli dökme demirde kritik tavlama sıcaklıklarından su verme ve östemperleme ısı işlemlerinin mikroyapı oluşumuna etkileri*. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumunda sunuldu, Konya.
20. Kilicli, V., Cerah, M., ve Erdoğan, M., (2004, Haziran). *Küresel grafitli dökme demirde çift fazlı matris yapının üretimi ve martensit hacim oranı ve morfolojisinin kontrolü*. I. Ulusal Metalurji ve Malzeme Günlerinde sunuldu. Eskişehir.
21. Basso, A. D., Martinez, R., and Sikora, J. A., (2011). Characteristics of the transformations occurring within the intercritical interval of ductile iron. *Key Engineering Materials*, 145-150
22. Machado, H. D., Aristizabal, R., (2020). Effect of the starting microstructure in the formation of austenite at the intercritical range in ductile iron alloyed with nickel and copper. *International Journal of Metalcasting*, 14(3): 836-845.
23. Basso, A., Caldera, M., and Massone, J., (2015). Development of high silicon dual phase austempered ductile iron. *Iron and Steel Institute of Japan*, 55(5): 1106-1113.
24. Tenaglia, N.E., Pedra, D. I., and Basso A. D., (2020). Influence of silicon content on mechanical properties of IADI obtained from as cast microstructures. *International Journal of Metalcasting*, 33(2-3): 72-79.
25. Putatunda, S. K. and Gadicherla, P. K., (1999). Influence of austenitizing temperature on fracture toughness of a low manganese austempered ductile iron (ADI) with ferritic as cast structure. *Materials Science and Engineering A*, 268(1-2): 15-31.
26. Basso, A., Martinez, R., and Sikora, J., (2007). Influence of austenitising and austempering temperatures on microstructure and properties of dual phase ADI. *Materials Science and Technology*, 23(11): 1321-1326.

27. Ovali, I., Kilicli, V. and Erdogan, M., (2013). Effect of microstructure on fatigue strength of intercritically austenitized and austempered ductile irons with dual matrix structures. *Iron and Steel Institute of Japan*, 53(2): 375-381.
28. Gür, C. H., Kilicli, V. and Erdogan, M., (2008, October). *Investigating the austempering parameters of ductile iron by magnetic barkhausen noise technique*. Paper presented at the 17th World Conference on Nondestructive Testing, China.
29. Rashidi, A. and Moshrefi-Torbati, M., (2001). Dual matrix structure (DMS) ductile cast iron: the effect of heat treating variables on the mechanical properties. *International Journal of Metalcasting*, 13(5): 293-297.
30. Coskun, S., Kilicli, V. and Erdogan, M., (2008, Mayıs). *Arakritik östenitleme sıcaklıklarından farklı hızlarda soğutmanın küresel grafitli dökme demirin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine etkisi*, 14. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresinde sunuldu. Eskişehir.
31. Basso, A., Sikora, J., and Martinez, R., (2013). Analysis of mechanical properties and its associated fracture surfaces in dual-phase austempered ductile iron. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 36(7): 650-659.
32. William D. Callister, J., (2007). *Materials science and engineering an introduction*. Seventh Edition. USA: Wiley.
33. Cooman, B.C.D., (2011). *Fundamentals of steel product physical metallurgy*. 1st edition. USA: Assosiation of Iron & Steel Engineers.
34. Venugopalan, D., (1990). Kinetic model of the eutectoid transformation in spheroidal graphite cast irons. *Metallurgical Transactions*, 21A: 913-918.
35. Pernach, M., (2019). Application of the mixed-mode model for numerical simulation of pearlitic transformation. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28: 3136-3148.
36. ASTM, (2019). *A536-Standard specification for ductile iron castings*. USA: American Society of Testing Materials
37. ASTM, (1989). *Standard test methods for tension testing of metallic material-metric*, in *E 8M-13*. USA: American Society of Testing Materials
38. Kobayashi, T. and Yamada, S., (1996). Effect of holding time in the ($\alpha + \gamma$) temperature range on toughness of specially austempered ductile iron. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 27(7): 1961-1971.
39. Kobayashi, T. and Yamamoto, H., (1988). Development of high toughness in austempered type ductile cast iron and evaluation of its properties. *Metallurgical Transactions A*, 19(2): 319-327.
40. Sylvester, O.O, Kenneth, K., (2020). Structural characterization and mechanical properties of pearlite – enhanced micro-alloyed ductile irons. *Journal of King Saud University*, 32(3): 205-210.

41. Gonzaga, R.A., (2013). Influence of ferrite and pearlite content on mechanical properties of ductile cast irons. *Materials Science and Engineering*, 567: 1-8.
42. Kayaalp, K., Şahin, Ö., Kılıçlı, V., (2021, April). *Effect of air cooling from intercritical austenitizing temperatures on microstructures and mechanical properties of ductile iron*, Paper presented at 5th International Iron & Steel Symposium (UDCS'2021). Karabük, Turkey.
43. Underwood, E.E., Banerjee, K., (1987). *Metals Handbook, Fractography*. USA: American Standart for Metals, 550.





GAZİ GELECEKTİR..