



**YÜKSEK KARBONLU TOZ METAL ÇELİKLERİN
MARTEMPERLENMESİ VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ
İNCELENMESİ**

Kevser Ceyda GÜNEY

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İLERİ TEKNOLOJİLER ANA BİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

NİSAN 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.

Kevser Ceyda GÜNEY

28/04/2021

YÜKSEK KARBONLU TOZ METAL ÇELİKLERİN MARTEMPERLENMESİ VE AŞINMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Kevser Ceyda GÜNEY

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Nisan 2021

ÖZET

Toz metalurjisi uygulamaları, mühendislik parçalarının üretildiği geniş kullanım alanına sahip üretim yöntemlerinden biridir. Bu uygulamalar, karmaşık geometrili parçaların yüksek kalitede üretimini sağlamaktadır. Bu nedenle toz metalurjisi ile üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin ve mikroyapılarının araştırılmasına gerek duyulmaktadır. Bu çalışmada, yüksek karbonlu toz metal çelikten üretilen numunelere uygulanan farklı ısıtma işlemlerin, numunelerin mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla saf demir tozu ve karbon kaynağı olarak grafit tozu kullanılarak numuneler üretilmiştir. Su atomizasyon yöntemi ile üretilen ATOMET 1001 saf demir tozuna ağırlıkça % 1,5 oranında doğal grafit tozu ve yağlayıcı olarak ağırlıkça % 0,5 oranında toz Zn stearat ilave edilerek karıştırılmıştır. Karışım tozlar, tek etkili kalıplarda 700 MPa basınç uygulanarak preslenmiş olup, ardından 1200 °C’de 20 dakika argon gazı ortamında sinterlenmiştir. Sinterlenen numuneler, ilk olarak 950 °C’de 4 dakika östenitlenmiştir. Daha sonra her bir numune sıcaklıkları 210 °C, 350 °C ve 400 °C olan nötr tuz banyolarında farklı sürelerde bekletilmiştir. Tuz banyosundan çıkarılan numunelere oda sıcaklığında doğrudan su verilerek martemperleme ısıtma işlemi uygulanmıştır. Martemperleme ısıtma işlemi uygulanan numunelerin mikroyapıları ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Bununla birlikte, yüksek karbonlu toz metal çeliklere uygulanan ısıtma işlemler sonucu oluşan martenzitik yapının beynite dönüşme süresi araştırılmıştır. Çalışmanın sonuçları, optik ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntülerini içeren mikroyapı karakterizasyon çalışmalarına ve sertlik testlerine göre değerlendirilmiştir. Ayrıca kimyasal kompozisyonun güvenilir bir biçimde belirlenmesi amacıyla X-Işını kırınımı analizleri (XRD) gerçekleştirilmiştir. Mekanik dayanımı değerlendirmek için ise 10N yük ile 500 m ve 1000 m mesafede kuru ortam aşınma testleri uygulanmıştır. Aşınma testi sonrası numune aşınma yüzeyleri incelenerek numunelerin aşınma davranışları değerlendirilmiştir. Çalışmaların sonucunda yüksek karbonlu toz metal çeliklerin martenzit fazından beynit fazına dönüşüm süresi Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramına göre elde edilmiştir. Aşınmaya en dirençli numunenin tuz banyo sıcaklığı en az olan numune olduğu tespit edilmiştir.

Bilim Kodu : 91528
Anahtar Kelimeler : Toz Metalurjisi Çelik, Martemperleme, Beynit, Martenzit
Sayfa Adedi : 115
Danışman : Prof. Dr. Ahmet GÜRAL

MARTEMPERING OF HIGH CARBON POWDER METAL STEELS AND INVESTIGATION OF WEAR BEHAVIOR

(M. Sc. Thesis)

Kevser Ceyda GÜNEY

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

April 2021

ABSTRACT

Powder metallurgy applications are one of the widely used production methods in which engineering parts are produced. These applications provide high quality production of parts with complex geometry. Therefore, it is necessary to investigate the mechanical properties and microstructures of materials produced by powder metallurgy. In this study, the effects of different heat treatments applied to specimens produced from high carbon powder metal steel on the microstructure and mechanical properties of the samples are investigated. For this purpose, the specimens are produced using pure iron powder and graphite powder as a source of carbon. 1.5% by weight of natural graphite powder is mixed with ATOMET 1001 pure iron powder produced by water atomization method, and 0.5% by weight of powder Zn stearate as a lubricant. The mixture powders are pressed by applying uniaxial pressure of 700 MPa, and then sintered in an argon gas environment for 20 minutes at 1200 °C. Sintered specimens are austenitized at 950 °C for 4 minutes, after this process, which each specimen is held at different periods in the neutral salt baths with temperatures of 210 °C, 350 °C and 400 °C. After that, the martempering heat treatment is applied by quenching with specimens. Microstructure and mechanical properties of the high carbon powder metal steel produced by applying martempering process are studied. Micro-hardness measurements and phase transformations of the heat-treated specimens are examined. Moreover, the transformation time of martensitic structure formed as a result of heat treatment applied to high carbon powder metal steels into bainite phase is investigated. The results of the study are analyzed based on microstructure characterization studies and hardness tests involving optical and scanning electron microscope (SEM) images. Also, X-Ray diffraction analyzes (XRD) are performed to determine the chemical composition. Dry sliding wear tests are carried out under 10 N load and 500 m-1000 m sliding distance to evaluate the mechanical strength of the specimens in ambient air at room temperature. After the wear test, the wear surfaces of the specimens are examined and their wear resistance is evaluated. As a result of the studies, the transformation time of high carbon powder metal steels from martensite phase to bainite phase is obtained according to the Time-Temperature-Transformation diagram. It is determined that the most wear-resistant specimen is the one with the least salt bath temperature.

Science Code : 91528

Key Words : Powder Metallurgy Steel, Martempering, Bainite, Martensite

Page Number : 115

Supervisor : Prof. Dr. Ahmet GÜRAL

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada devamlı olarak yardım ve yönlendirmeleri ile bana katkıda bulunan, tecrübelerinden ve derin bilgi birikiminden yararlandığım, örnek bir akademisyen ve örnek bir insan olan Sayın Hocam Prof. Dr. Ahmet GÜRAL'a en içten duygularıyla teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Değerli tez jüri üyeleri Sayın Hocam Prof. Dr. Recep ÇALIN ve Sayın Hocam Doç. Dr. Hanifi ÇİNİCİ'ye tezimi değerlendirdikleri, vermiş oldukları geri bildirimler ve jürimde yer aldıkları için teşekkürlerimi sunarım.

Deneyisel çalışmalarına katkılarından dolayı yüksek lisans eğitimim boyunca bana özveri ile yardım eden Gazi Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Araştırma Görevlisi Tolga YILMAZ ve Öğretim Görevlisi Dr. Onur ALTUNTAŞ'a en içten duygularıyla teşekkürlerimi sunarım.

Beni her türlü zorluklara göğüs gererek büyüten ve bugünlere gelmemi sağlayan aileme sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	x
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	xi
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. TOZ METALURJİSİ.....	5
2.1. Toz Metalurjisi Tanımı ve Tarihçesi.....	5
2.2. Toz Metalurjisi Teknolojisi.....	7
2.3. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları	8
2.4. Toz Metalurjisi Üretim Yöntemleri	10
2.4.1. Kimyasal üretim yöntemleri	11
2.4.2. Elektroliz yolu ile üretim yöntemleri.....	12
2.4.3. Mekanik üretim yöntemleri	13
2.4.4. Atomizasyon yöntemleri.....	14
2.5. Toz Metalurjisi ile Malzeme Üretimi.....	18
2.5.1. Karıştırma	19
2.5.2. Presleme.....	20
2.5.3. Sinterleme	25
2.5.4. İkincil işlemler.....	28
3. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER.....	29

	Sayfa
4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	37
4.1. Martemperlenmiş Çeliklerde Martensit Faz Dönüşümü, Kalıntı Östenit ve Karbür Çökmesi.....	37
5. AŞINMA TEORİSİ	43
5.1. Aşınma Mekanizmaları	45
5.1.1. Adheziv aşınma	45
5.1.2. Abrasif aşınma.....	46
5.1.3. Eroziv aşınma.....	47
5.1.4. Koroziv aşınma	48
5.1.5. Yorulma aşınması.....	49
6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	51
6.1. Malzeme.....	51
6.2. Presleme	52
6.3. Sinterleme İşlemleri	54
6.4. Yoğunluk Ölçümleri.....	55
6.5. Isıl İşlemler.....	56
6.6. Mikroyapı Analizleri.....	60
6.7. XRD Analizleri	62
6.8. Sertlik Ölçümleri.....	63
6.9. Mekanik Özellikler.....	63
6.9.1. Aşınma deneyleri.....	63
7. DENEYSEL SONUÇLAR	65
7.1. Yoğunluk Ölçümleri.....	65
7.2. Mikroyapı Analizleri.....	66
7.3. XRD Sonuçları.....	76
7.4. Sertlik Sonuçları.....	85

	Sayfa
7.5. Aşınma Test Sonuçları	87
7.5.1. Aşınmış yüzeylerin SEM analizleri	94
8. SONUÇ VE ÖNERİLER	101
8.1. Sonuçlar.....	101
8.2. Öneriler	102
KAYNAKLAR	103
EKLER.....	109
EK-1. Numunelerin 1000 m mesafede aşınma testinde elde edilen sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği grafikleri.....	110
ÖZGEÇMİŞ	115

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Toz metalurjisi tarihsel gelişim süreci	7
Çizelge 6.1. ATOMET 1001 kimyasal bileşimi ve özellikleri	52
Çizelge 6.2. Uygulanan işlemlere göre tanımlanan kısaltmalar	59
Çizelge 7.1. Sinterlenmiş ve doğrudan su verilen numunelerin sertlik değerleri (HV1)	86
Çizelge 7.2. Numunelerin makro sertlik değerleri tablosu (HV1).....	86
Çizelge 7.3. Numunelerin ortalama ağırlık kaybı ve aşınma katsayısı değerleri tablosu	87
Çizelge 7.4. Numunelerin 500 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrası ortalama sürtünme katsayısı değerleri tablosu (μ)	92

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Toz metalurjisi üretim aşamaları	2
Şekil 2.1. Kimyasal üretim yöntemi	12
Şekil 2.2. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi şematik gösterimi	13
Şekil 2.3. Mekanik alaşımlama öğütme yöntemi	14
Şekil 2.4. Su atomizasyonu şematik gösterimi	15
Şekil 2.5. Düşey gaz atomizasyonu şematik gösterimi	16
Şekil 2.6. Dönen elektrot atomizasyon yöntemi	17
Şekil 2.7. Vakum atomizasyon yöntemi şematik gösterim	17
Şekil 2.8. Ultrasonik gaz atomizasyonu yöntemi şematik gösterimi	17
Şekil 2.9. Toz metalurjisi ile malzeme üretim aşamaları	18
Şekil 2.10. Toz metalurjisi parça üretimi	19
Şekil 2.11. Çift konili karıştırıcı	20
Şekil 2.12. Toz metalurjisi ürünlerinde çekme kuvvetinin % teorik yoğunlukla değişim grafiği	21
Şekil 2.13. Klasik presleme aşamaları	21
Şekil 2.14. Tek etkili presleme yöntemi - (1) Karışımın kalıba aktarılması, (2) Besleme, (3) Presleme, (4) Karışımın sıkıştırılması, (5) Parçanın kalıptan alınması, (6) Yeniden besleme	22
Şekil 2.15. Çift etkili presleme işlemi	23
Şekil 2.16. Soğuk izostatik presleme yöntemi şematik görünümü	24
Şekil 2.17. Sıcak izostatik presleme işleminin aşamaları	25
Şekil 2.18. Çift küre sinterleme modeli	26
Şekil 2.19. Sinterleme esnasında difüzyon ile malzeme taşınımı ve boyun oluşumu	26
Şekil 2.20. Sinterleme işlem aşamaları ve sıcaklık-zaman grafiği	27
Şekil 2.21. Sinterleme işlem değişkenleri ve etkileri	27
Şekil 3.1. Isıl işlem aşamaları sıcaklık-zaman grafiği	30

Şekil	Sayfa
Şekil 3.2. Çeliklere uygulanan ısıt işlemler	31
Şekil 3.3. Alaşımsız çeliklere uygulanan ısıt işlemler tavlama sıcaklık aralıkları.....	31
Şekil 3.4. Martemperleme işlemi Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı	35
Şekil 3.5. Isıl çevrim diyagramları a) klasik martemperleme işlemi b) gelişmiş martemperleme işlemi.....	35
Şekil 5.1. Aşınmaya etki eden faktörler	43
Şekil 5.2. Tribolojinin çeşitli alanlardaki örnekleri	45
Şekil 5.3. Adhesiv aşınma meydana gelişi.....	46
Şekil 5.4. Adhesiv aşınma mekanizması.....	46
Şekil 5.5. Abrasif aşınma çeşitleri a) iki cisimli abrasif aşınma, b) üç cisimli abrasif aşınma	47
Şekil 5.6. Abrasif aşınma şematik gösterimi	47
Şekil 5.7. Eroziv aşınma mekanizması.....	48
Şekil 5.8. Koroziv aşınma mekanizması	49
Şekil 5.9. Yorulma aşınma mekanizması.....	49
Şekil 6.1. Sinterleme işlemi ısıt çevrim grafiği.....	55
Şekil 6.2. Ötektoid üstü çeliklerde (% 1.2 C) ZSD (TTT) diyagramı	58
Şekil 7.1. Ötektoid üstü sade karbonlu çeliğin ZSD (TTT) diyagramı [99]	69
Şekil 7.2. 950 °C fırında 4 dk östenitlendikten sonra doğrudan su verilen numunenin X-Rd grafiği.....	77
Şekil 7.3. a) M350-30 numunenin X-Rd grafiği.....	78
Şekil 7.3. b) M400-30 numunenin X-Rd grafiği.....	78
Şekil 7.4. a) M210-60 numunenin X-Rd grafiği.....	80
Şekil 7.4. b) M350-60 numunenin X-Rd grafiği.....	80
Şekil 7.4. c) M400-60 numunenin X-Rd grafiği.....	80
Şekil 7.5. a) M210-90 numunenin X-Rd grafiği.....	82
Şekil 7.5. b) M350-90 numunenin X-Rd grafiği.....	82

Şekil	Sayfa
Şekil 7.6. M400-180 numunenin X-Rd grafiği.....	83
Şekil 7.7. a) M210-360 numunenin X-Rd grafiği.....	84
Şekil 7.7. b) M350-360 numunenin X-Rd grafiği.....	84
Şekil 7.8. Sinterleme ve martemperleme süresine bağlı olarak makro sertlik değişimi grafiği.....	85
Şekil 7.9. İzotermal tavlama zamanına göre aşınma katsayısı değişim grafiği a) 500 m, b) 1000 m sürtünme mesafesi	89
Şekil 7.10. İzotermal tavlama zamanına göre sürtünme katsayısı değişim grafiği (Sürtünme mesafesi; a) 500 m, b) 1000 m).....	93
Şekil EK-1.1. M210-30.....	110
Şekil EK-1.2. M210-60.....	110
Şekil EK-1.3. M210-180.....	111
Şekil EK-1.4. M350-30.....	111
Şekil EK-1.1. M350-60.....	112
Şekil EK-1.1. M350-180.....	112
Şekil EK-1.1. M350-360.....	113
Şekil EK-1.1. M400-60.....	113
Şekil EK-1.1. M400-90.....	114
Şekil EK-1.1. M400-360.....	114

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 2.1. 1913 yılına ait tungsten üretimi patent dokümanı	6
Resim 2.2. Otomobilde toz metalurjisi uygulama alanları	8
Resim 2.3. Toz metalurjisi ile üretilen dişli ve rulman örnekleri	9
Resim 2.4. Toz metalurjisi ile üretilen filament ve takım parçaları örnekleri	9
Resim 2.5. Explorer 3 uzay aracı ses kayıt cihazı görüntüsü.....	10
Resim 2.6. Toz şekilleri ve isimleri	11
Resim 4.1. 300 °C tuz banyosunda 2 dk bekletilen numuneye ait kalıntı östenit dağılımı	37
Resim 4.2. 300 °C tuz banyosunda 120 dk bekletilen numuneye ait kalıntı östenit dağılımı	38
Resim 4.3. Tuz banyosu sıcaklıkları a) 300 °C, b) 350 °C, c) 400 °C, d) 40 s 350 °C (B: beynit, RA: kalıntı östenit, F: ferrit, P: perlit)	38
Resim 4.4. Çelik numuneye ait karbürleri gösteren SEM görüntüleri a) 460 ° C’de 300 s temperlenmiş LC (düşük karbonlu) çelik, b) 460 ° C’de 3600 s temperlenmiş HS (yüksek silikonlu) çelik.....	39
Resim 4.5. 820 °C’de östenitlendikten sonra a) 400 °C, b) 600 °C’de temperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri	40
Resim 4.6. a) Tavlanmış AISI 52100 çelik, b) martemperlenmiş AISI 52100 çelik.....	41
Resim 4.6. c) 10 dk östemperlenmiş AISI 52100 çelik, d) 20 dk östemperlenmiş AISI 52100 çelik.....	41
Resim 4.6. e) 30 dk östemperlenmiş AISI 52100 çelik	41
Resim 6.1. Mikroyapı incelemeleri ve aşınma deneyleri için üretilen numunelerin şekillendirme kalıbı.....	51
Resim 6.2. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan Ø10x10 mm boyutuna sahip yüksek karbonlu toz metal çelik numuneler	52
Resim 6.3. Aşınma deneylerinde kullanılan Ø10x15 mm boyutuna sahip yüksek karbonlu toz metal çelik numuneler.....	52
Resim 6.4. Numune şekillendirmesi için kullanılan tek etkili presleme cihazı	53
Resim 6.5. Sinterleme fırını ve koruyucu gaz atmosfer düzeneği	54

Resim	Sayfa
Resim 6.6. Sinterleme sonunda elde edilen numuneler	55
Resim 6.7. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan dijital terazi	56
Resim 6.8. Isıl işlem ve martemperleme işlemi için kullanılan tuz banyosu düzeneği ..	57
Resim 6.9. Zımparalama işleminin yapıldığı cihaz	60
Resim 6.10. Parlatma işleminin uygulanması.....	60
Resim 6.11. JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)	61
Resim 6.12. Leica Microsystems marka optik mikroskop.....	61
Resim 6.13. XRD analizinde kullanılan Lynxeye XE markalı dedektör	62
Resim 6.14. XRD analizlerinde kullanılan D8 Advance markalı jeneratör ve analizde kullanılan tüm cihazların görüntüsü.....	62
Resim 6.15. SHIMADZU HVM2 marka sertlik ölçüm cihazı	63
Resim 6.16. TRIBOMETER T10/20 kuru ortam aşınma test cihazı	64
Resim 7.1. Sinterlenmiş numunenin a) 200X, b) 500X büyütme oranlı optik, c) 2500X büyütme oranlı SEM mikroyapı görüntüleri	67
Resim 7.2. Östenitleme işleminin ardından doğrudan su verilen numunenin martensitik a) optik, b) SEM mikroyapısı.....	68
Resim 7.3. a) M210-30 numune mikroyapı görüntüsü	70
Resim 7.3. b) M350-30 numune mikroyapı görüntüsü.....	70
Resim 7.3. c) M400-30 numune mikroyapı görüntüsü	70
Resim 7.4. a) M210-60 numune mikroyapı görüntüsü	71
Resim 7.4. b) M350-60 numune mikroyapı görüntüsü.....	71
Resim 7.4. c) M400-60 numune mikroyapı görüntüsü	71
Resim 7.5. a) M210-90 numune mikroyapı görüntüsü	73
Resim 7.5. b) M350-90 numune mikroyapı görüntüsü.....	73
Resim 7.5. c) M400-90 numune mikroyapı görüntüsü	73
Resim 7.6. a) M210-180 numune mikroyapı görüntüsü	74
Resim 7.6. b) M350-180 numune mikroyapı görüntüsü.....	74

Resim	Sayfa
Resim 7.6. c) M400-180 numune mikroyapı görüntüsü	74
Resim 7.7. a) M210-360 numune mikroyapı görüntüsü	76
Resim 7.7. b) M350-360 numune mikroyapı görüntüsü.....	76
Resim 7.7. c) M400-360 numune mikroyapı görüntüsü.....	76
Resim 7.8. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-30, b) M350-30, c) M400-30	95
Resim 7.9. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-60, b) M350-60, c) M400-60	96
Resim 7.10. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-90, b) M350-90, c) M400-90 ...	97
Resim 7.11. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-180, b) M350-180, c) M400-180.....	98
Resim 7.12. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-360, b) M350-360, c) M400-360.....	99

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler	Açıklamalar
C	Karbon
Fe	Demir
Fe₃C	Sementit
α	Ferrit
α'	Martensit
γ	Östenit
J	Joule
g	Gram
HV	Vickers sertlik değeri
HRc	Rockwell sertlik değeri
N	Newton
nm	Nanometre
μm	Mikrometre
s	Saniye
°C	Santigrat derece
mm	Milimetre
Kısaltmalar	Açıklamalar
Ac₁	Alt kritik sıcaklık çizgisi
Bs	Beynit başlangıç sıcaklığı
Bf	Beynit bitiş sıcaklığı
CIP	Soğuk izostatik presleme
EDS	Enerji Dağılım Spektroskopisi
GÜTF	Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi
Ms	Martenzit başlangıç sıcaklığı
Mf	Martenzit bitiş sıcaklığı
TM	Toz metalurjisi

Kısaltmalar**TTT (ZSD)****SAD****SEM****XRD****TEM****WDS****Açıklamalar**

Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm Diyagramı

Seçilen Alan Kırınımı

Taramalı Elektron Mikroskobu

X-Işınları Difraksiyonu

Geçirimli Elektron Mikroskobu

Dalgaboyu Dağılım Spektroskopisi

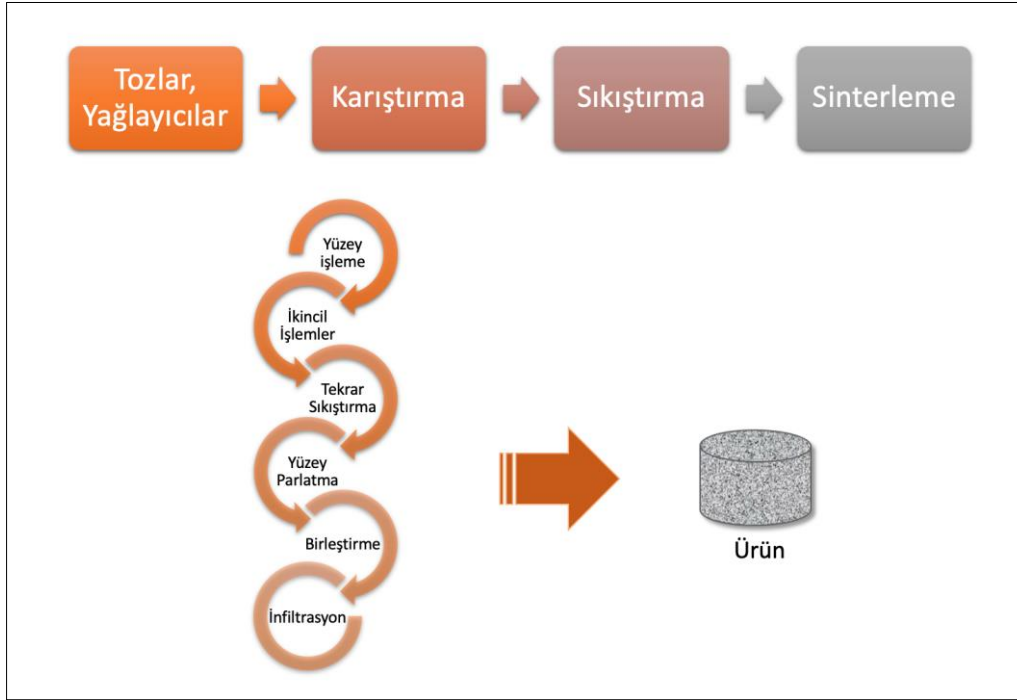
1. GİRİŞ

Gelişen teknoloji ile malzeme üretim yöntemlerinde çeşitli parça üretim tekniklerine ihtiyaç duyulmaktadır. Klasik üretim yöntemlerine alternatif olarak toz metalurjisi ile üretilen teknolojik malzemeler, endüstride oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Toz metalurjisi, ekonomik avantajından ve üretim kolaylığından dolayı tercih edilen malzeme üretim yöntemlerinden biridir. Ayrıca toz metalurjisi sayesinde karmaşık şekilleri diğer yöntemlere kıyasla daha kısa sürede ve daha az maliyetli olarak üretebilmek mümkündür. Bu nedenle, toz metalurjisi, otomotiv, havacılık, uzay, askeri sanayi başta olmak üzere endüstrinin birçok alanında kullanılmaktadır [1].

Toz metalurjisi, belirli bir şekil ve boyutlarda karışım tozlar oluşturulduktan sonra yüksek sıcaklıkta sinterlenen, sonrasında mekanik dayanım ve malzeme kalitesini artırmak amacı ile ısıt işlemler uygulanan, hammadde olarak tozları (metalik ve/veya seramik) kullanan bir metal şekil verme teknolojisidir.

Toz metalurjisinde, metalik ve metalik olmayan farklı malzemeler kullanılabilmektedir. Tozlar genellikle 1000 nm'den (1µm) daha küçük parçacıklar olarak tanımlanır. Endüstride yaygın olarak kullanılan tozların boyutu 5 ile 200 µm arasındadır. 100 µm'den daha küçük boyuta sahip olan tozlar genellikle seri üretim için kullanılır. Fakat toz metalurjisi şekil verme işlemi için genellikle boyutu 20 µm altındaki tozlar tercih edilmektedir [2].

Toz metalurjisi ile toz metal çelik üretebilmek için bir takım işlemler uygulanmaktadır. Sinterleme işlemi, toz metalurjisi işlemlerindeki en önemli adımlardan biridir ve sinterleme işlemi, kullanılan toz halindeki malzemenin erime sıcaklığı altındaki sıcaklıkta gerçekleştirilir. Şekil 1.1'de toz metalurjisi üretim aşamaları gösterilmektedir. Sinterleme işleminden sonra ısıt işlemler, talaşlı imalat vb. ikincil işlemler uygulanmaktadır. Bu çalışmada, toz metalurjisinde kullanılan üretim yöntemlerinden olan presleme, sinterleme ve martemperleme işlemleri uygulanmıştır.



Şekil 1.1. Toz metalurjisi üretim aşamaları [1]

Toz metalurjisi ile üretilen toz malzemelerin üretici tarafından istenilen sertlik ve dayanımda olabilmesi için farklı parametreler ve ısı işlemler uygulanmaktadır. Bu sebeple, toz metal çeliklere alaşım elementleri eklenerek toz metal çeliklerin aşınma dayanımı ve tokluğunun iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Yüksek aşınma dayanımı ve yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda kullanılan yüksek karbonlu çelikler, farklı ısı işlemler ile istenilen parametrelerde üretilmektedir. Isıl işlem parametrelerine bağlı olarak numune, faz dönüşümlerine uğramaktadır. Örneğin, martenzit fazı üretebilmek için östenitlenen numuneye oda sıcaklığında su verilir. Fakat çelikte oluşan iç gerilmeleri azaltmak için tekrar temperleme işlemi yapılması gerekmektedir. Özellikle karbon oranının artmasıyla östenitin su verilerek üretildiği çıta tip martensitin hacimce artışı nedeniyle su verme çatlakları meydana gelebilmekte ve/veya büyük hacimli malzemelerde iç bölgelerde martensite dönüşüm ihtimali de azalabilmektedir. Bu olumsuzlukları bertaraf edebilmek için martemperleme (marsuverme) ısı işlemleri önerilmektedir [3]. Ayrıca, yüksek karbonlu toz metal çeliklere martemperleme ısı işlemi uygulandıktan sonra tekrar temperleme işlemine gerek duyulmamaktadır [4].

Bu çalışmada yapılmış olan toz metal çeliklere martemperleme işleminin uygulanması literatürde yer almamaktadır. Martemperleme işlemi uygulanarak, anlık su verme çatlaklarını bertaraf etmek amaçlanmış, martenzite dönüşemeyen karbonların oluşturduğu

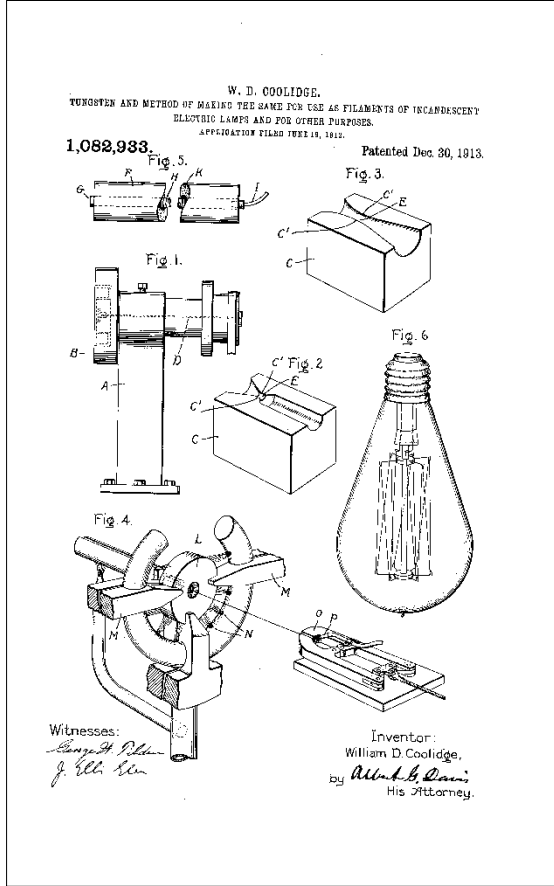
kalıntı östenit miktarı azaltılmaya çalışılmış ve mekanik özellikleri dengeli halde olan numuneler üretilmesi amaçlanmıştır. Bu nedenle, bu çalışmada ağırlıkça oranı % 1,5 olan grafit tozu içeren toz metal çeliklere farklı parametrelerde martemperleme ısıtma işlem yöntemleri uygulanarak mikroyapı, sertlik ve aşınma üzerine etkileri incelenmiştir.

2. TOZ METALURJİSİ

2.1. Toz Metalurjisi Tanımı ve Tarihçesi

Toz metalurjisi, metal tozlarının belirli oranlarda karıştırılıp, istenilen değerlere sahip basınç altında sıkıştırılarak, kontrollü atmosfer şartlarında fırınlanıp, isteğe göre ikincil işlemlerin uygulandığı bir parça üretim yöntemidir [5].

Toz metalurjisi, MÖ 3000’li yıllara dayanan en eski üretim yöntemlerinden biridir. Mısırlılar, tarihte ilk olarak günlük yaşamlarını kolaylaştırmak için birçok farklı alet üreterek toz metalurjisinin tekniklerinden faydalanmışlardır. Çizelge 2.1’de tarihsel gelişim süreci gösterilmektedir. Yakın geçmişte ise toz metalurjisi tekniği, Thomas Edison’un 19. yüzyılda ampül icat etmesi ile hız kazanmıştır. Ampülde kullanılan filament üretimine ihtiyaç duyulduğu için alternatif çözümler aranmıştır. Tungsten malzeme üretimi, filament üretiminde kullanılarak toz metalurjisinin gelişmesine katkıda bulunmuştur. İlk filamentlerin üretiminde karbon, tantal ve osmiyum kullanılarak elektrikli lambalar üretilmiştir. Ancak bu elektrikli lambalar oldukça kırılgan bir yapıya sahip olduğu için kullanışlı olmamıştır. Tungsten malzemesi, filament üretimi için yüksek erime noktası ve elverişli elektriksel özelliklerinden dolayı en uygun malzeme olarak değerlendirilmiştir [6]. William David Coolidge tarafından 1913 yılında patenti alınan tungsten filament üretiminin toz metalurjisi kullanarak yapılması, toz metalurjisinde büyük bir ilerleme sağlamıştır. Resim 2.1’de yer alan patent dokümanında tungsten toz karışımının belli bir basınç altında preslenmesi ve sinterlenmesi anlatılmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi yapılan tungsten malzemesi, gerekli olan sünekliğe sahip olduğundan dolayı oda sıcaklığında şekil verilebilmesi kolaylaşmıştır [7].



Resim 2.1. 1913 yılına ait tungsten üretimi patent dokümanı [8]

19. ve 20. yüzyılda, endüstriyel üretimde yüksek ertitme sıcaklığına sahip olan molibden ve tungsten için uygun eritme yöntemi bulunamadığından dolayı toz metalurjisi tekniklerine ihtiyaç duyulmuştur. 20. yüzyılın başlarında, bakırın veya gümüşün yüksek elektrik iletkenliğine ve grafitin yağlayıcı özelliklerine sahip ilk sinterlenmiş metal-karbon bazlı bileşikler ticari olarak üretilmeye başlanmıştır. Bu malzemelerin gelişimi, dinamolar ve elektrik motorları gibi makine ve ekipman teknolojisinin gelişmesiyle bağlantılı olmaktadır. 1920'den beri, "sert metaller veya sinterlenmiş karbürler" adıyla bilinen kompozit malzemeler geliştirilmeye başlanmıştır. Kompozit malzemelerin başlıca uygulama alanları, aşınmaya karşı direnci yüksek aletlerin imalatı ile yaygınlaşmıştır. 1930'dan sonra, kendinden yağlamalı yataklar, membranlar, metalik filtreler gibi kontrollü gözenekli yapıya sahip sinterlenmiş malzemelerin imalatına başlanmıştır. Örneğin; II. Dünya Savaşı'ndan sonra, demir ve bronz esaslı yataklara ve sürtünme malzemelerine ilgi artmıştır. Bunlar, yüksek sıcaklık gerektiren uygulamalar için kullanılan sermetler adı verilen metal - oksit esaslı kompozitlerdir. 1970'lerde, daha ince ve daha düzgün bir yapıya sahip ikinci nesil sermetlerin gelişimi başlamıştır. Bunlara örnek olarak, karbürler, borürler, nitrürler ve

bunların karışık fazları gibi metalik bağlayıcı ve oksit olmayan malzemeye dayalı özel alaşımlar verilebilir. İlerleyen zamanlarda gelişen teknoloji ile, elektrik ve geleneksel döküm, işleme ve talaşlı imalat yöntemlerine rakip olarak özel bileşenlerin üretimi için toz metalurjisinin kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır [9].

Çizelge 2.1. Toz metalurjisi tarihsel gelişim süreci [9]

Toz Metalurjisi Malzemeler	Üretim Yeri	Tarih
Demir Aletler	Mısır	M.Ö. 3000
Demir Sütunlar	Hindistan	M.S. 400
Kılıçlar	Arabistan	M.S. 1000
Değerli Metal Eşyalar	Güney Amerika	M.S. 1200 – 1500
Bakır Para	Almanya	1840
Platinyum Külçesi	İngiltere ve Rusya	1834

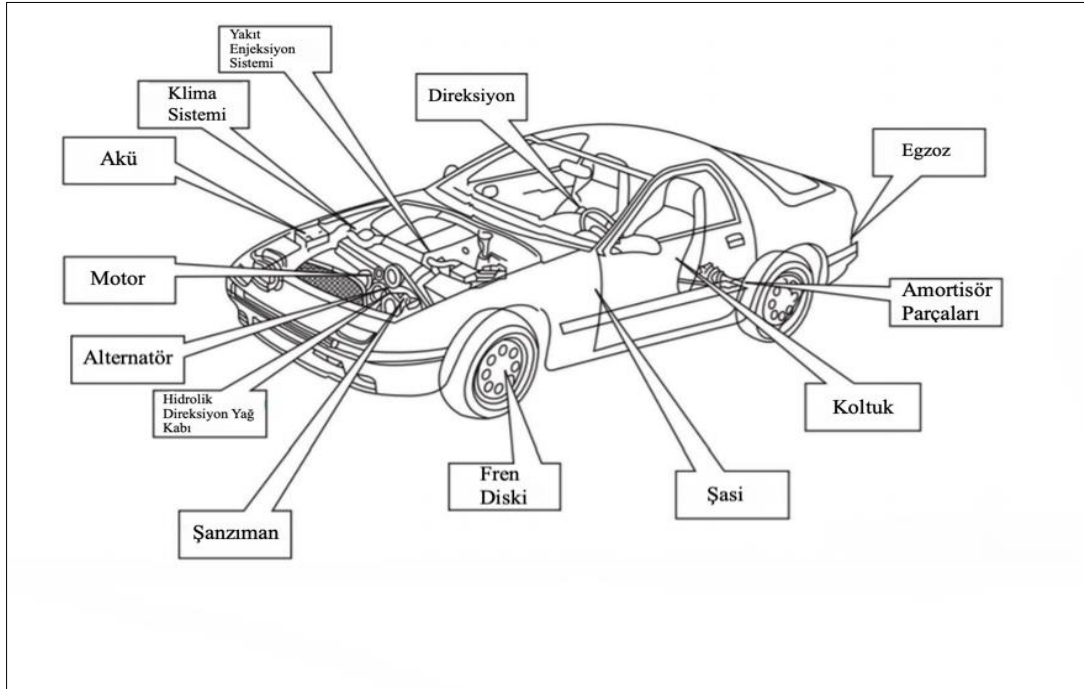
2.2. Toz Metalurjisi Teknolojisi

Toz metalurjisi, fiziko-kimyasal ve mekanik yöntemlerle metal ve metalik alaşımlarını toz karışımı haline getirdikten sonra toz karışımları basınç ve sıcaklık yardımıyla çeşitli iş parçaları şeklinde üretme işlemidir [10]. Bu yöntem sayesinde, metaller, plastikler, seramik malzemeler ve kompozit malzemeler birbirleri ile karıştırıldıktan sonra belli bir basınç altında presleme yapılır. Bir sonraki aşamada, metal tozların ergime noktasından daha düşük bir sıcaklıkta sinterleme işlemi uygulanır. Karışımı oluşturan malzemelerden en yüksek ergime sıcaklığına sahip olan malzemenin ergime sıcaklığı altında sinterleme işlemi yapılmaktadır.

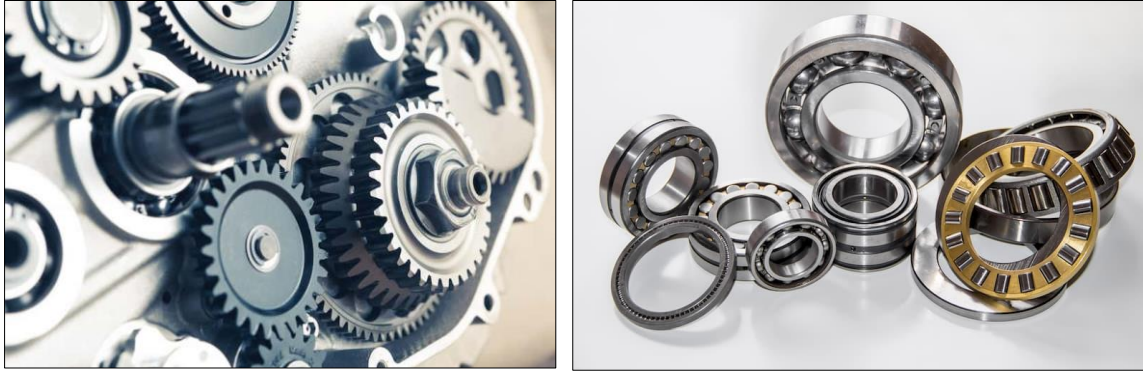
Karmaşık yapıya sahip olan parçalar için yüksek kalitede maliyetli parçalar üretme olanağı sağlayan toz metalurjisi, diğer işleme teknolojileri içinde farklı özelliğe sahip olan bir üretim tekniğidir. Yüksek miktarlardaki parçalar için yüksek hassasiyete sahip parça üretimine olanak sağlar. İstenilen oranlarda alaşımlar karıştırılarak parça üretilebilir [20]. Ayrıca günümüzde eklemeli imalat teknolojisi ile toz metalurjisi üretimi yapılabilmektedir. Gaz atomizasyon yöntemi ile üretilen tozlar, eklemeli imalat teknolojisi ile karmaşık geometrilere sahip olsa dahi kolaylıkla üretilebilmektedir. Özellikle havacılık ve uzay alanlarında karmaşık geometriye sahip yapıların üretimi için toz metalurjisinden faydalanarak eklemeli imalat ile üretim mümkündür.

2.3. Toz Metalurjisi Uygulama Alanları

Geçmişten günümüze kadar toz metalurjisi uygulama alanları geniş bir sektör yelpazesine sahip olup, gelecekteki çalışmalarda da gelişen teknoloji ile birlikte birçok uygulama alanına sahip olacaktır. Metal tozların kullanımı giderek artmakta ve uygulama alanları diğer metal işleme yöntemlerine kıyasla daha hızlı bir gelişme göstermektedir. Tungsten lamba teli, seramik filtreler, implant, güç aktarma dişlileri, diş dolguları, yağ emdirilen metal yatakları, mermiler, iş makinesi parçaları, şarj edilebilen piller, elektrik kontakları, mıknatıs çeşitleri, nükleer güç yakıtlarında kullanılan elemanlar, protezler, yüksek sıcaklık filtreleri, şarj edilebilir piller bunlara örnek olarak verilebilir [11]. Toz metalurjisi, ergitme kayıpları olmadan karmaşık şekilli parçaların maliyeti düşük bir şekilde üretilebilmesinden dolayı otomotiv, havacılık ve uzay sanayii gibi alanlarda geniş çaplı kullanıma sahiptir. Resim 2.2’de otomobilde toz metalurjisi ile üretilen parçalar gösterilmektedir. Fren balatalarından, motorda yer alan parçalara kadar otomobilin birçok bölümünde toz metalurjisi vazgeçilmez bir tekniktir. Resim 2.3 ve Resim 2.4’de toz metalurjisi ile üretilen parçalara örnekler verilmiştir.



Resim 2.2. Otomobilde toz metalurjisi uygulama alanları [12]



Resim 2.3. Toz metalurjisi ile üretilen dişli ve rulman örnekleri [13,14]



Resim 2.4. Toz metalurjisi ile üretilen filament ve takım parçaları örnekleri [15,16]

Toz metalurjisi ürünleri, hem geleneksel havacılık uygulamalarında hem de oldukça özel amaçları karşılamak için kapsamlı geliştirme programları gerektiren uzay aracı sistem bileşenlerinde de kullanılmaktadır.

Uzay aracı sistemlerinde kullanılan bazı toz metalurjisi ürünlerine örnek olarak, Explorer 3 uzay aracında yer alan ses kayıt cihazında 93 gün başarıyla çalışan sinterlenmiş bronz yataklar ve bazıları yedi aya kadar başarıyla faaliyet gösteren navigasyon uydularında yer alan spin mekanizmasında kullanılan sinterlenmiş mıknatıslar verilebilir. Kimyasal erozyona, ısı gerilmeye ve erime noktasına yakın yüzey sıcaklıklarına karşı dirence sahip olan ve yüksek ısı akısı uygulamalarında kullanılan gümüş infiltre tungsten, yalnızca toz metalurjisi işlemleriyle üretilmektedir. Bununla birlikte, toz metalurji yöntemi ile üretilen berilyum, insanlı uzay istasyonlarında araç kaplamaları ve meteoroid (göktaşı) kalkanlama gibi yapısal uygulamalar için kullanılabilir. Resim 2.5’de Explorer 3 uzay aracında yer alan ses kayıt cihazı görülmektedir [17].



Resim 2.5. Explorer 3 uzay aracı ses kayıt cihazı görüntüsü [18]

2.4. Toz Metalurjisi Üretim Yöntemleri

Toz metalurjisinde kullanılan tozların ortalama boyutu $200\ \mu\text{m}$ 'den daha küçük teknolojik katı parçacıklar olarak tanımlanmaktadır. Çoğunlukla kullanılan karışım tozlar, seramik ve/veya metalik esastır. Tozun kimyasal bileşimi, toz parçaların mekanik bileşimi, kalıcı gözenek miktarı ve dağılımı, gözenek tipi, büyüklüğü ve şekli, nihai ürünün özelliği için önemli bir faktördür. Toz metalurjisi kullanılarak üretilen numunelerin istenilen özelliklerde olması için farklı üretim yöntemleri bulunmaktadır. Ticari olarak en çok tercih edilen üretim teknikleri dört başlıkta incelenmiştir [2].

1- Kimyasal Üretim Yöntemleri

2- Elektroliz Yolu ile Üretim Yöntemleri

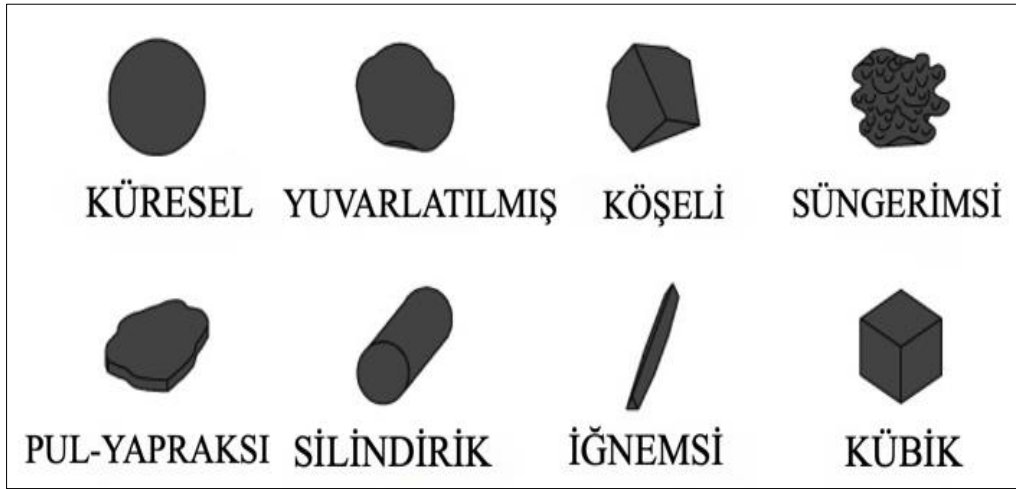
3- Mekanik Üretim Yöntemleri

- a) Talaş Kaldırma
- b) Değirmende Öğütme
- c) Darbe Yöntemleri
- d) Mekanik Alaşımlama

4- Atomizasyon Yöntemleri

Karışım tozların üretiminde yaygın olarak kimyasal işlemler, atomizasyon, mekanik alaşımlama ve elektroliz yöntemleri kullanılmaktadır. Bunlardan atomizasyon üretim yöntemi, diğerlerine kıyasla endüstride parça üretimi için daha çok tercih edilmektedir. Ergitilebilen tüm metalik malzemelerin üretimi bu yöntemle yapılabilmektedir.

Toz üretiminde kullanılan malzeme ve yöntemler toz şeklini belirleyen ana değişkenlerdir. Toz parçacıkları benzer şekillere sahip olabilir, ancak hiçbir parçacık şekli tamamen aynı değildir. Buna bağlı olarak, toz karışım içinde bir şekil dağılımı olacaktır. Bir araya getirilen farklı şekil ve boyuttaki tozlar, parçacık şeklinde önemli farklılıklara ve şekil dağılımlarına sahiptir. Parçacık şekli, toz yoğunluğu, akışı ve paketlemeyi etkilemektedir. Aynı zamanda presleme ve sinterleme işlemini etkileyen önemli bir faktördür. Birkaç tür temel toz parçacık şekli vardır. Resim 2.6’da bazı tozların tane şekilleri gösterilmektedir [19].



Resim 2.6. Toz şekilleri ve isimleri [19]

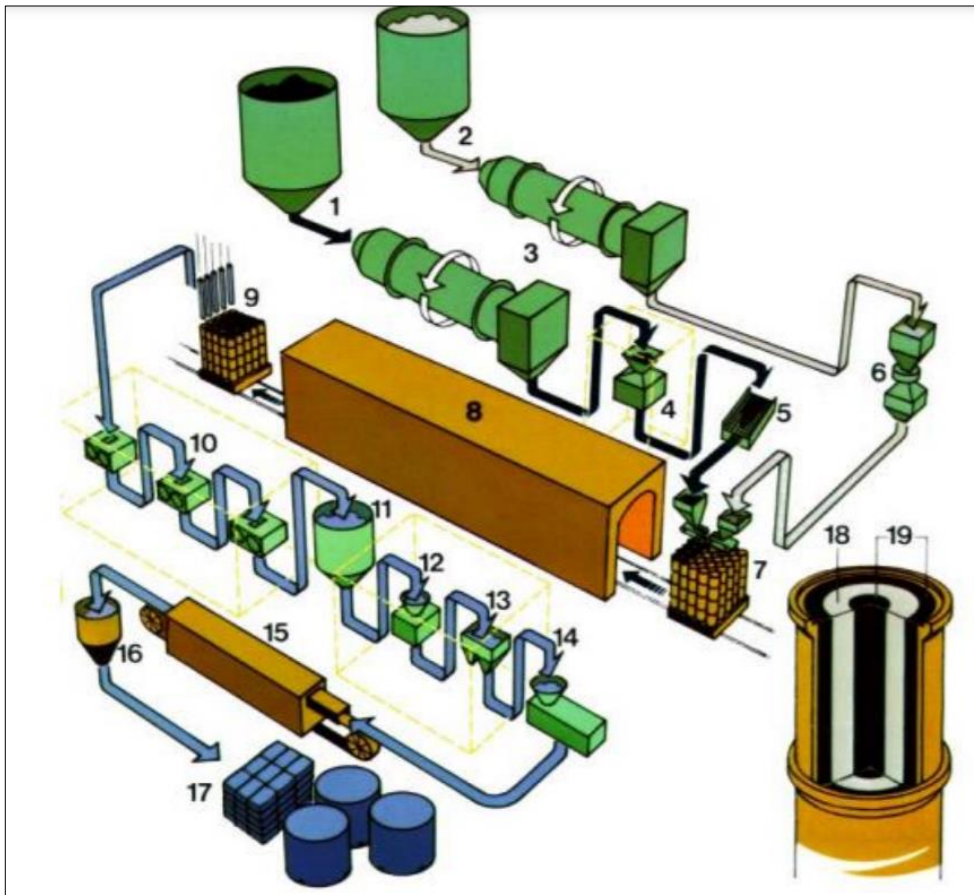
Parçacıkların şeklini ölçmek için imalat analizinde şekil indeksi ve en-boy oranı olmak üzere iki yöntem kullanılmaktadır. Şekil indeksi, partikülün yüzey alanını partikül hacmiyle ilişkilendirir ve elde edilen değeri, en düşük şekil indeksine sahip bir küre ile karşılaştırır. En-boy oranı, toz parçacığının en büyük boyutu ile en küçük boyutu arasındaki orandır. İdeal bir küre 1 en boy oranına, yuvarlak bir partikül 1,5 en boy oranına, sivri veya pullu parçacıklar ise 3, 5 veya 10 en boy oranlarına sahip olabilir [19].

2.4.1. Kimyasal üretim yöntemleri

Kimyasal üretim yöntemi, ilk olarak bakır tozların üretiminde kullanılmış ve günümüzde giderek yaygınlaşmıştır. Kimyasal üretim yöntemi, kimyasal indirgenme ve kimyasal ayrışma olarak sınıflandırılmaktadır.

Karışım tozların, kimyasal yöntem ile üretimi, nikel, kobalt, demir, bakır gibi metal oksitlerin, hidrojen veya karbonmonoksit gibi indirgeyici gazlarla indirgenmesi işlemidir [21]. Örneğin, sünger demir tozu, demir oksit indirgenmesi ile süngerimsi yapıya sahip toz

olarak üretilir [22]. Demir cevher, kok ile karıştırılıp indirgenmesi için devamlı fırından geçirilir ve süngerimsi parçacıklara sahip olan toz karışım elde edilir. Daha sonra toz karışım öğütülür ve elenir. Şekil 2.1’de kimyasal üretim yöntemi aşamaları gösterilmektedir. Bu aşamalar sırasıyla; indirgeme karışımı (1), demir cevheri (2), kurutma (3), kırma (4), eleme (5), manyetik ayırma (6), seramik tüplere doldurma (7), 1200 °C fırın (8), boşaltma (9), ham kırma (10), depolama (11), kırma (12), manyetik ayırma (13), öğütme ve eleme (14), 800-900 °C fırında tavlama (15), dengeleme (16), paketlenme (17), demir cevheri (18) ve indirgeme karışımından (19) oluşmaktadır.

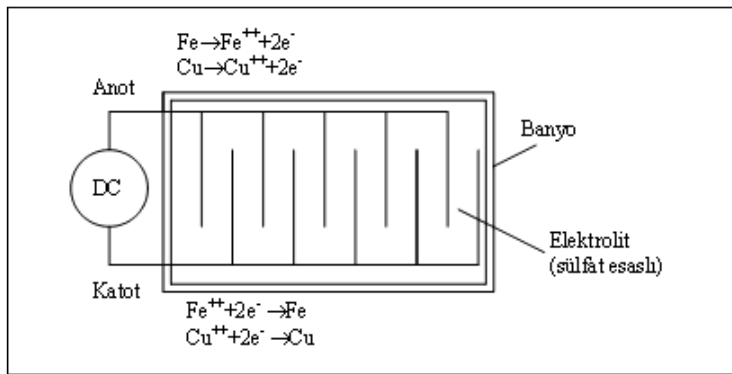


Şekil 2.1. Kimyasal üretim yöntemi [23]

2.4.2. Elektroliz yolu ile üretim yöntemleri

Elektroliz yöntemi ile demir, bakır, çinko gibi metal tozların üretimi yapılmaktadır. Bu işlemde, elektrot pozisyonunun koşulları, yumuşak süngerimsi bir tortu oluşacak şekilde ayarlanır ve böylece metalik toz oluşturulur [24].

Elektroliz işleminin etkili olması için elektrolit bileşimi, konsantrasyon, yoğunluk ve sıcaklık gibi koşullar önemlidir. Uygun koşullar sağlandığında elektroliz yöntemi ile çok saf ve yoğun metal tozları oluşturabilir. Elektroliz, metal tozlar üretmek için diğer yöntemlere göre daha fazla maliyetlidir. Yüksek saflığa sahip olan metallerde, özellikle yüksek iletkenliğin gerekli olduğu uygulamalar için bakırda kullanımı yaygındır. Anot, katot ve elektroliz banyosundan oluşan bu yöntem ile toz üretimi, hammaddenin anotta çözünüp, katot üzerinde birikmesi ile gerçekleşir. Katotta toplanan metal, toz haline getirilmektedir [25]. Şekil 2.2’de elektroliz yöntemi ile toz üretimi şematik gösterimi yer almaktadır.



Şekil 2.2. Elektroliz yöntemi ile toz üretimi şematik gösterimi [26]

2.4.3. Mekanik üretim yöntemleri

Mekanik üretim yöntemi, kimyasal bağları zayıf ve karmaşık kristalli yapıya sahip olan alaşımların çarpıştırılarak toz haline getirilme işlemidir. Yüksek karbonlu çeliklerin üretildiği talaşlı üretim, bilyalı değirmen kullanılarak metal tozu üretilen mekanik öğütme, yüksek dayanımlı kompozit malzeme üretimi için mekanik alaşımlama yöntemleri, mekanik üretim yöntemlerine örnek olarak verilebilir. Bu yöntemle, Şekil 2.3’de gösterildiği gibi hem öğütme hem de alaşımlama işlemi uygulanabilmektedir. Bilyalı öğütmede, malzemenin birbiri üzerine sıvanmasını engellemek amacıyla sünekliği az olan malzeme tercih edilip, bilyalar vasıtasıyla malzeme ince toz haline getirilir. Bilyalar ve toz karışım arasında darbe meydana gelerek malzeme tozlarının kırılması sağlanır. Mekanik alaşımlamada ise, katı haldeki toz karışımların birbirine kaynaklanması ve tekrar kaynakların kırılması sağlanarak homojen ve dayanımı yüksek kompozit malzeme üretilir [27]. Şekil 2.3’de aşındırıcı bilyalar vasıtasıyla ham toz malzemeye uygulanan mekanik alaşımlama öğütme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Mekanik alaşımlama öğütme yöntemi [27]

2.4.4. Atomizasyon yöntemleri

Atomizasyon yöntemi, endüstride en yaygın olarak kullanılan, genellikle ergitilebilen tüm metalik tozların üretildiği yöntemlerden biridir. Sıvı haldeki metalin sıvı damlacıklar halinde parçalanıp, damlacıkların ani bir şekilde aşırı soğutulması ile sıvı parçacıkların katı hale geçerek toz haline gelmesi işlemidir. Bu sıvı damlacıklar 100-150 μm ' den daha küçük boyutlarda olabilmektedir [28].

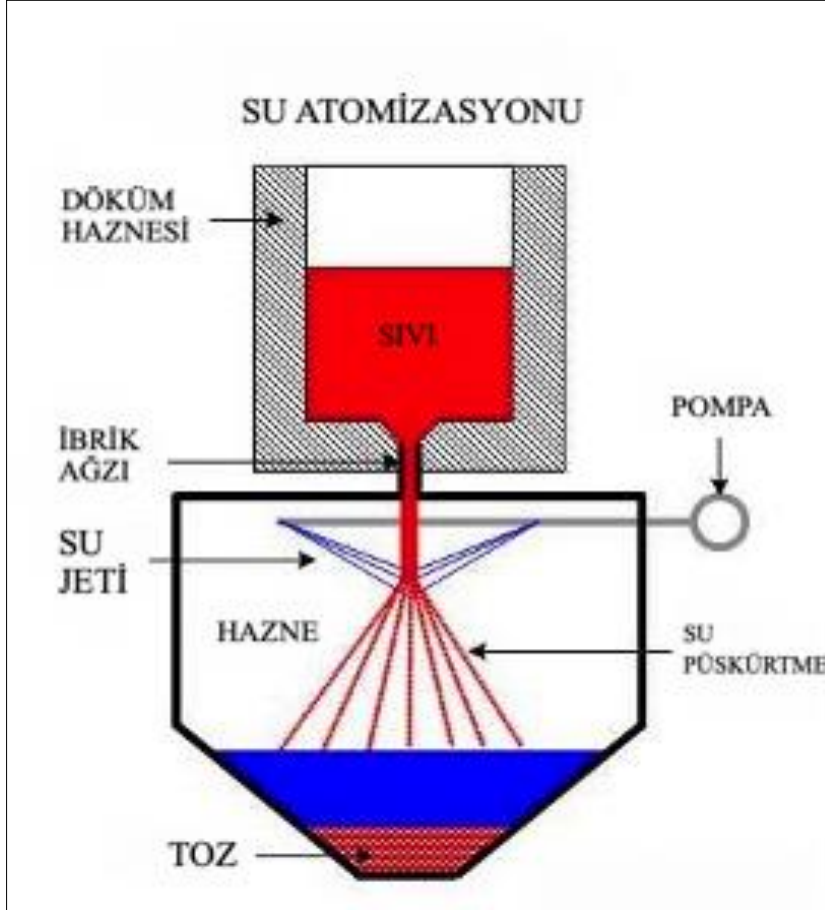
Diğer üretim tekniklerine göre; toz şekli, tane büyüklüğü ve dağılım kontrolü daha kolaydır. Homojen tozlar üretildiği için, özellikle alaşım tozlarının üretimi için çok uygundur. Atomizasyon yöntemi ile toz üretiminde;

- 1- Su atomizasyonu
- 2- Gaz atomizasyonu
- 3- Döner disk atomizasyonu
- 4- Dönen elektrot atomizasyonu gibi değişik teknikler kullanılır [29].

Su atomizasyonu

Su atomizasyon yönteminin endüstride kullanımı oldukça uygundur, ancak üretilen tozlar azımsanamayacak derecede oksit içerir ve düzensiz şekle sahiptir. Bu yöntem, genellikle 1600°C'nin altında eriyen metallerden alaşım tozları üretmek için yaygın olarak kullanılmaktadır. Atomizasyonla üretilen metal tozlarının % 30'u su jeli ile elde edilir. Şekil 2.4'de su atomizasyon yöntemi için gereken ekipmanlar şematik olarak gösterilmektedir. Serbest düşüşle akmakta olan sıvı metalin kullanılan jetlerden dışarı sıçramasını ve

saçılmasını önlemek gerekir. Sıvı metal dağınıma uğrayana kadar hazne içinde kalmalıdır. Bu sebeple, enerji verimliliği için açık su jetleri, kapalı veya dörtlü jetlere oranla daha yüksek basınçlarda çalışmak zorundadır [30].

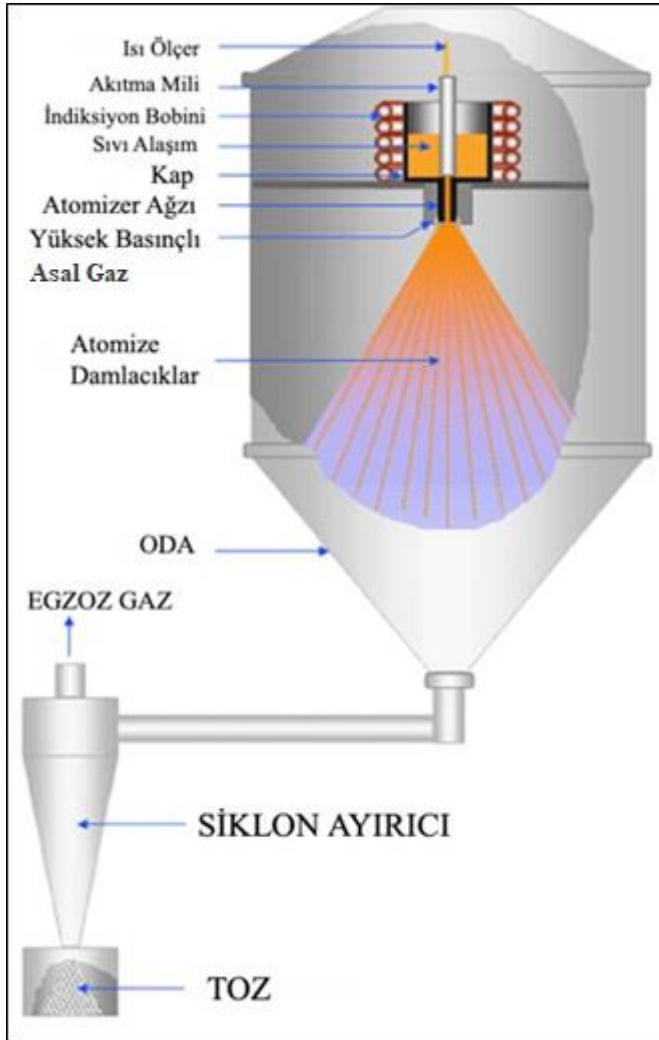


Şekil 2.4. Su atomizasyonu şematik gösterimi [31]

Gaz atomizasyonu

Gaz atomizasyonu yönteminde, su atomizasyon yönteminden farklı olarak ergiyik metaller yüksek hıza sahip olan helyum, azot, argon gibi gazlar vasıtasıyla dağıtılabilmektedir [32]. Gaz atomizasyonunda gaz ve metal akış hızı, gaz basıncı ve metalin aşırı ısıtılması gibi parametreler önceden belirlenerek istenilen şekil ve boyutta toz üretebilmek mümkün olmaktadır. Ayrıca alaşımlı çelikler, nikel-kobalt alaşımlar, paslanmaz çelikler gibi daha birçok alaşımlar bu yöntem ile küresel toz şeklinde üretilmektedir [33]. Küresel toz şeklinin tercih edilme sebebi sıkıştırılabilirliğinin fazla olmasıdır. Bundan dolayı gaz atomizasyonu en çok tercih edilen toz üretim tekniklerinden biridir.

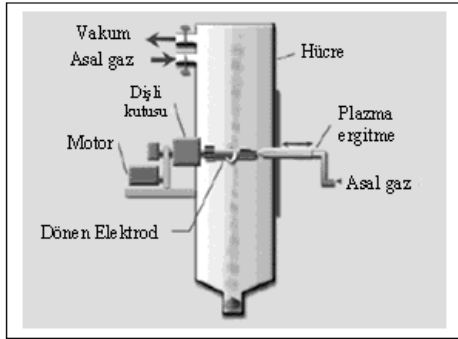
Yatay ve düşey olmak üzere iki çeşit gaz atomizasyonu bulunmaktadır. Düşük ergime sıcaklığına sahip metaller için yatay gaz atomizasyon tasarımı tercih edilmektedir. Su atomizasyonu yöntemine benzer olarak sıvı metal, yüksek basınç etkisi ile parçacıklara ayrılır. Bu yöntemde basınç kaynağı olarak yüksek basınç gaz pompaları kullanılmaktadır. Ayrıca nozul tasarımına bağlı olarak toz şekil ve boyutu belirlenebilir [34]. Nozul sayesinde akış hızı artar ve sıvı metal, parçacıklara ayrılır. Parçacıklara ayrılan sıvı metalin soğutulması için atomizasyon haznesine helyum ilave edilmektedir. Çapları 1 μm 'den 1 mm'ye kadar değişebilen katılaştırmış parçacıklar küresel şekle sahiptir. Şekil 2.5'de düşey gaz atomizasyonu gösterilmektedir.



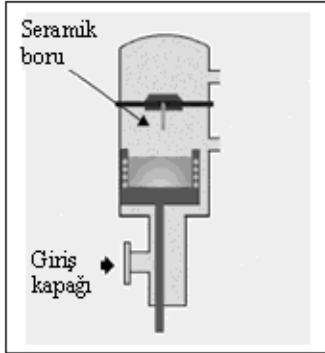
Şekil 2.5. Düşey gaz atomizasyonu şematik gösterimi [35]

Bu yöntem, toz boyutu ve toz dağılımının kontrol edilebilmesi, hızlı katılaşma gibi avantajlar sağladığı için diğer yöntemlere kıyasla gaz atomizasyonu ile mikroyapısı daha üstün metal alaşım tozları üretilebilmek mümkündür [36].

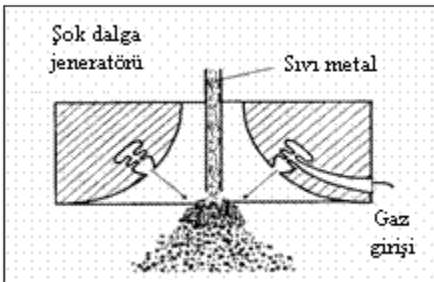
Üretilmek istenen tozun şekil, boyut ve karakteristik özelliğine bağlı olarak çeşitli atomizasyon yöntemleri mevcuttur. Küresel ve eşit parçacık büyüklüğüne sahip toz üretmek için genellikle Şekil 2.6’da gösterilen dönen elektrot atomizasyonu yöntemi kullanılmaktadır. Dönen elektrot atomizasyon yönteminde, metal çubuğa etki eden tungsten malzemesi katot görevi görerek çubuk üzerinde elektriksel ark oluşturmaktadır. Oluşan ark sayesinde metal çubuk eriyik hale geçerek merkezkaç etkisi ile üzerinden parçacıklar kopar. Bu sayede eşit tane boyutuna sahip küresel metal tozlar üretilmektedir [29]. Şekil 2.7 ve 2.8’de ise ince küresel tozlar elde etmek için kullanılan vakum ve ultrasonik üretim yöntemleri gösterilmektedir.



Şekil 2.6. Dönen elektrot atomizasyon yöntemi [26]



Şekil 2.7. Vakum atomizasyon yöntemi şematik gösterimi [26]



Şekil 2.8. Ultrasonik gaz atomizasyonu yöntemi şematik gösterimi [37]

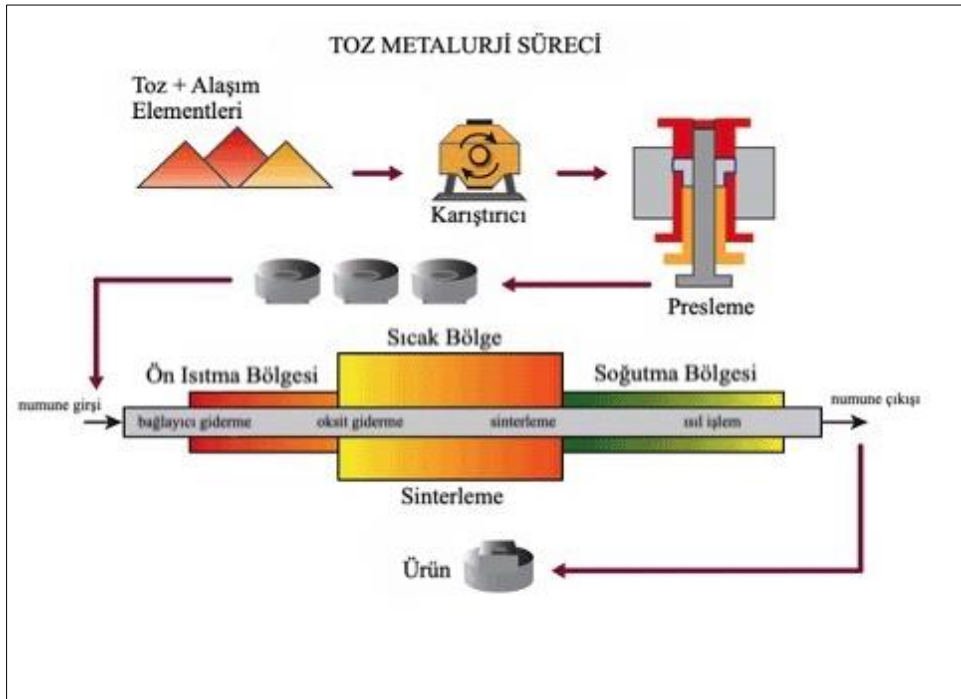
Bunlara ek olarak, yağ atomizasyonu, vakum atomizasyonu, ultrasonik gaz atomizasyonu, döner disk atomizasyonu, silindir atomizasyonu, santrifüj, titreşim elektrot yöntemi gibi çeşitli üretim yöntemleri bulunmaktadır.

2.5. Toz Metalurjisi ile Malzeme Üretimi

Toz metalurjisi ile malzeme üretimi, isteğe bağlı olarak alaşımların eklenmesi ile metal tozlar üretildikten sonra, toz karışıma şekil vermeyi ve özelliklerini iyileştirmek için yapılan çeşitli işlemleri kapsamaktadır. Şekil 2.9'da toz metalurjisi ile malzeme üretim aşamaları gösterilmektedir.

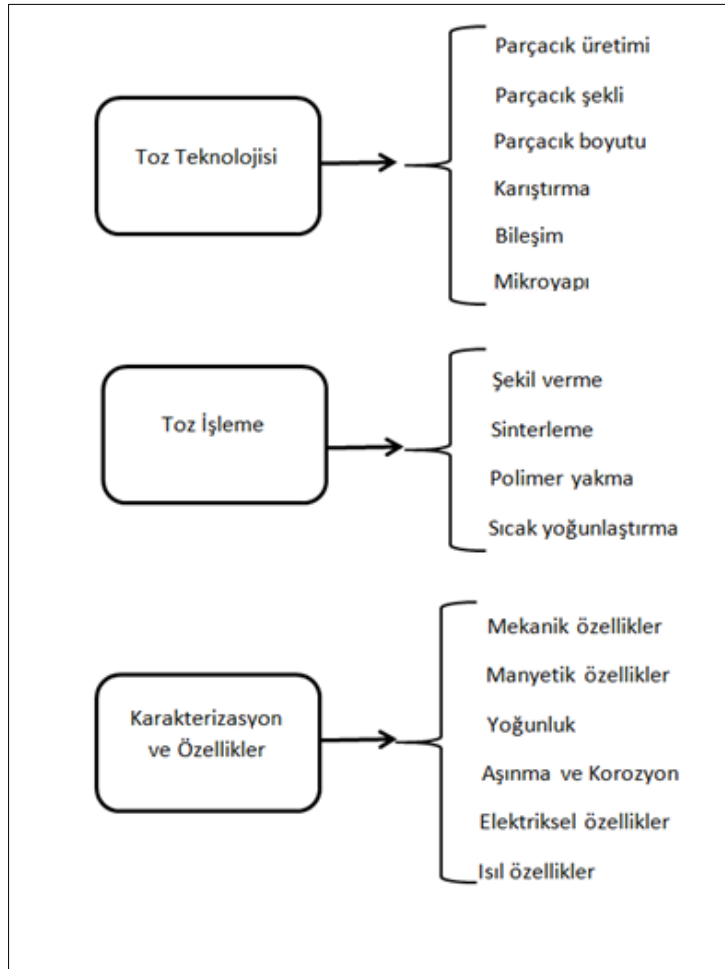
Toz metalurjisi ile parça üretimi dört aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar,

- 1- Karıştırma
- 2- Presleme
- 3- Sinterleme
- 4- İkincil işlemlerdir.



Şekil 2.9. Toz metalurjisi ile malzeme üretim aşamaları [38]

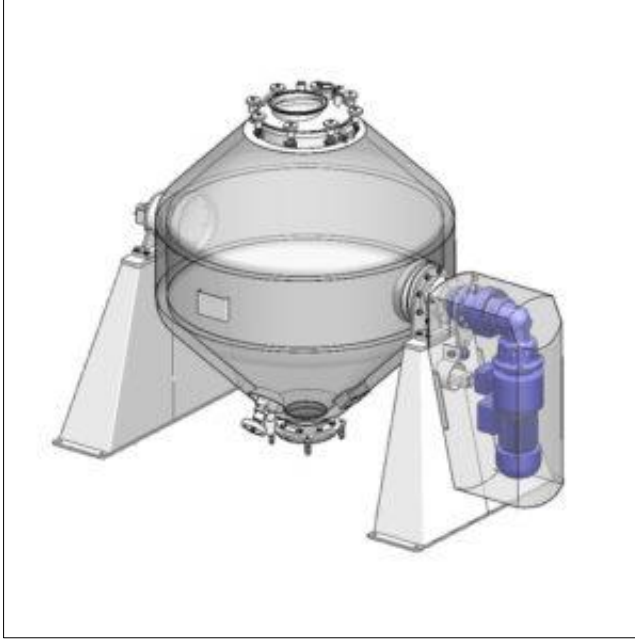
Şekil 2.10’da toz metal malzeme üretebilmek için gerekli olan aşamalar ve bu aşamaları etkileyen faktörler sunulmuştur.



Şekil 2.10. Toz metalurjisi parça üretimi

2.5.1. Karıştırma

Bu aşamada, metal toz ve toz parçacıkları arasındaki sürtünmeyi azaltmak için yağlayıcı homojen olarak karıştırılmaktadır. Toz taneciklerinin karıştırılması için birçok farklı yöntem bulunmaktadır [39]. Şekil 2.11’de çift konili karıştırıcı görülmektedir. Homojen bir karışım elde edilebilmesi, üretilen parçanın dayanımı ve bir sonraki aşama olan presleme için oldukça önemlidir.



Şekil 2.11. Çift konili karıştırıcı [40]

Presleme işlemi sırasında tanecikler arasındaki sürtünmeyi azaltmak ve preslenen parçayı kalıptan daha kolay alabilmek için yağlayıcı kullanılmaktadır. Bu yağlayıcılar genellikle kuru toz şeklinde olmaktadır. Bunun nedeni, sıvı yağlayıcıların tozun akma özelliğini bozmasıdır. Çinko streat ve parafin en çok kullanılan yağlayıcılardır [41].

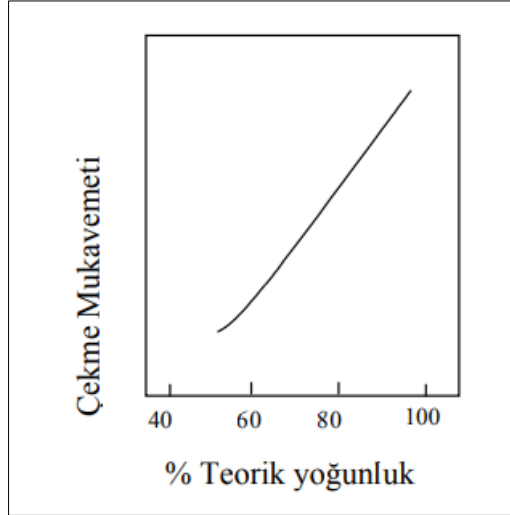
Karıştırma işlemini karıştırıcı tipi, karıştırıcı hacmi, karıştırıcı iç yüzeyi, karışımda kullanılan toz taneciklerin şekli, boyutu, karıştırma ortamı, karıştırma hızı, karıştırma süresi gibi birçok parametre etkilemektedir. Üretilmek istenen ürün özelliğine göre karıştırma süresi 5-30 dakika arasında değişebilmektedir. Karışımın verimli olabilmesi için karışım toz, karıştırıcı hacminin en az yarısını oluşturmmalıdır [42].

2.5.2. Presleme

Karıştırma işlemi sona erdikten sonra, mekanik özelliklerde iyileştirme sağlamak için oda sıcaklığında çelik kalıplar kullanılarak presleme işlemi yapılmaktadır. Genellikle çelik kalıplar, ısıl işlem ile sertleştirilen sementit esaslı takım çelikleridir [43].

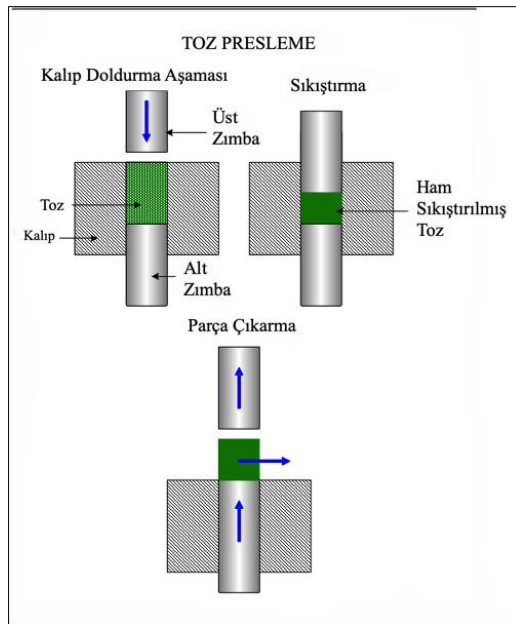
Karışım toza uygulanan basıncın artması ile gözenek miktarı azalır. Bununla birlikte, presleme basınç değeri artarsa, toz taneciklerin birbirlerine temas ettikleri yüzey alanı artar. Karışım tozlarda, gözenekler bol miktarda bulunmaktadır ve gözenek artışı hacmi artırdığından yoğunluğu azaltmaktadır. Gözenek miktarı malzemenin mukavemetini

olumsuz yönde etkilemektedir [44]. Şekil 2.12’de teorik yoğunluğa bağlı olarak çekme mukavemetinin arttığı gösterilmektedir.



Şekil 2.12. Toz metalurjisi ürünlerinde çekme kuvvetinin % teorik yoğunlukla değişim grafiği [44]

Şekil 2.13’de presleme işleminin adımları görülmektedir. İlk olarak toz ve yağlayıcıdan oluşan karışım kalıba aktarılır. Sonraki aşamada karışım preslenir ve bir sıyırıcı yardımı ile şekil verilen parça kalıptan çıkarılır.



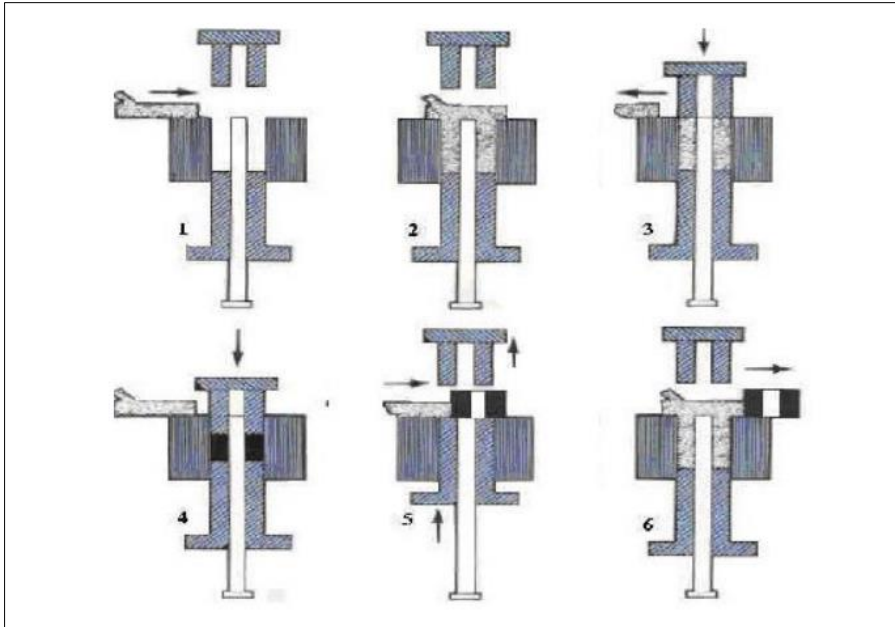
Şekil 2.13. Klasik presleme aşamaları [45]

Aşağıda metal tozların presleme işlemi üç grupta anlatılmaktadır:

Tek hareketli sıkıştırma

Klasik toz sıkıştırma işlemi olan tek etkili presleme yöntemi Şekil 2.14’de gösterilmektedir. Tek hareketli sıkıştırma yönteminde, karışım toz, kalıba aktarıldıktan sonra üst plaka vasıtasıyla basınç uygulanarak karışım toza şekil verilir. Altta yer alan piston ise karışımı kalıptan ayırmayı sağlamaktadır. Preslenen parçanın kalıptan daha kolay ayrılmasını sağlamak için kalıp duvarlarına yağlayıcı sürülmektedir. Tek hareketli sıkıştırma yönteminde karışım toza uygulanan basınç artarsa üretilen parçanın yoğunluğuda artar. Bunun sebebi, gözeneklerin basınç artışına bağlı olarak azalmasıyla hacmin düşmesi ve bunun sonucunda yoğunluğun artmasıdır [46].

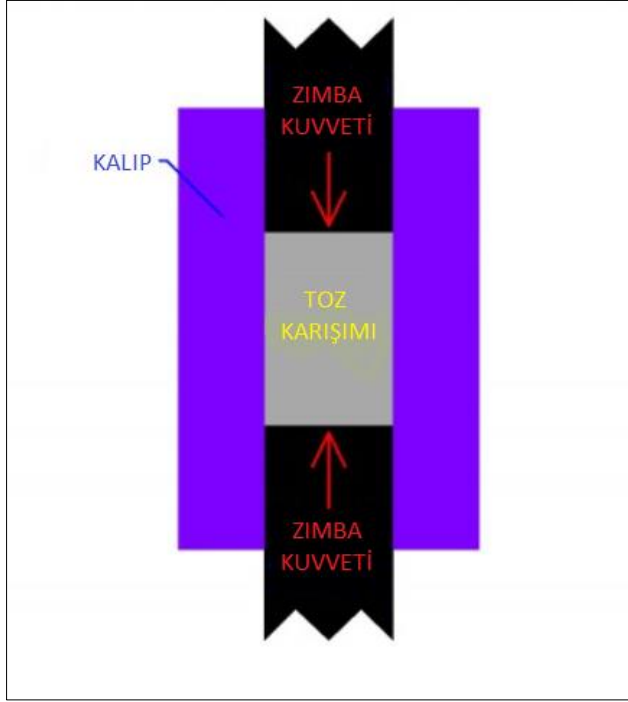
Bu yöntem maliyet açısından avantajlı olsada boy/en oranı yüksek karmaşık şekillerin üretilmesinde istenilen ham yoğunluğu sağlayamadığı için çok etkin kullanılmamaktadır. Karmaşık şekillerin üretimi genellikle soğuk izostatik presleme ile gerçekleştirilir. Soğuk izostatik presleme uygulamasında, kalıba konulan tozlar yağ ile doldurulup basınç uygulandığı için homojen yoğunluğa sahip parçalar elde edilmektedir [47].



Şekil 2.14. Tek etkili presleme yöntemi - (1) Karışımın kalıba aktarılması, (2) Besleme, (3) Presleme, (4) Karışımın sıkıştırılması, (5) Parçanın kalıptan alınması, (6) Yeniden besleme [48]

Çift hareketli sıkıştırma

Çift hareketli sıkıştırma yönteminde ise karışıma, hareket eden alt ve üst zimbalar vasıtasıyla alttan ve üstten değişebilen değerlerde basınç uygulanarak şekil verilmesi sağlanmaktadır. Şekil 2.15’de çift etkili presleme işlemi gösterilmektedir.



Şekil 2.15. Çift etkili presleme işlemi [49]

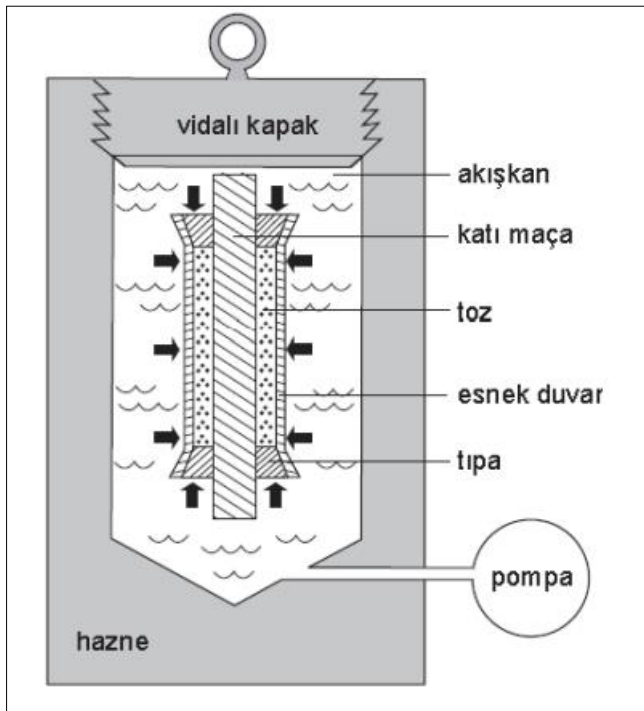
İzostatik hareketli sıkıştırma

İzostatik sıkıştırma, toz karışımların bir akışkan basıncı ile sıkıştırılması işlemidir. Soğuk ve sıcak izostatik sıkıştırma olarak iki yöntem bulunmaktadır.

Soğuk izostatik sıkıştırma

Sıkıştırma işlemi, oda sıcaklığında yapılıyorsa işleme soğuk izostatik presleme (CIP) adı verilir. Tek eksenli kalıpla sıkıştırmada karşılaşılan gözenekliliğin homojen olmaması problemini çözmek için, toz karışımlarının çok eksenli sıkıştırılmasına ihtiyaç duyulmuştur. Bundan dolayı, soğuk izostatik presleme işlemi, 70 yıldan daha uzun bir süredir özellikle seramik tozlarının şekillendirilmesinde kullanılmaktadır [50].

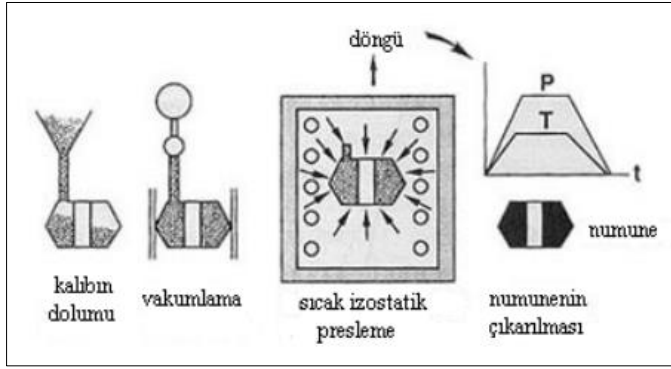
Soğuk izostatik presleme yönteminde, malzemeye temas eden her yüzeye eşit miktarda basınç uygulamak için plastik veya kauçuktan üretilen esnek bir kalıp kullanılır. Kalıba aktarılan karışım toz, yağ veya su vb. akışkan sıvının uyguladığı kuvvet ile şekil alır. Bu yöntemde uygulanan basınç değeri diğerlerine kıyasla daha az olmaktadır. Tek hareketli sıkıştırmaya kıyasla üretilen parçanın kalitesi bakımından daha az tercih edilebilir [51]. Bu yöntemle üretilen parçalara örnek olarak uçak türbini diskleri ve takım çelikleri verilebilir [47]. Şekil 2.16’da soğuk izostatik presleme yöntemi gösterilmektedir.



Şekil 2.16. Soğuk izostatik presleme yöntemi şematik görünümü [52]

Sıcak izostatik sıkıştırma

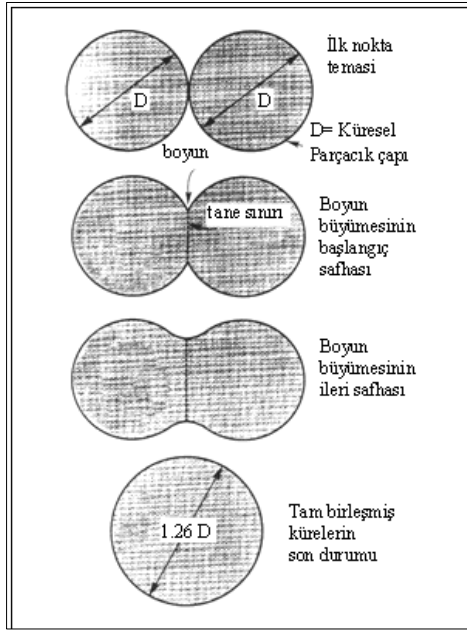
Sıcak izostatik presleme yöntemi ile kapalı bir hazne içinde ısıtıcı vasıtasıyla karışım toza şekil verilmektedir. Karışım tozun her noktasına temas edebildiği için üç boyutlu ve yoğunluğu yüksek parça üretilebilmektedir. Her noktadan eşit uygulanan sıcaklık ve basınç sayesinde kaliteli bir parça üretilir. Basınç kaynağı olarak genellikle argon gazı kullanılmaktadır [53]. Şekil 2.17’de sıcak izostatik presleme işleminin adımları gösterilmektedir.



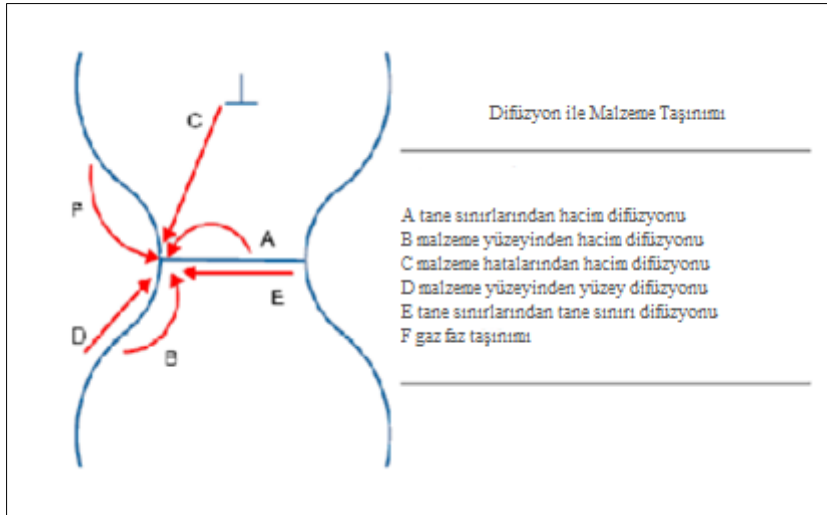
Şekil 2.17. Sıcak izostatik presleme işleminin aşamaları [54]

2.5.3. Sinterleme

Sinterleme işlemi, presleme işleminin ardından parçada yer alan gözenekleri yok etmek, parçaya mukavemet ve sertlik kazandırmak için parçayı oluşturan tozların ergime sıcaklık değerinin altındaki bir sıcaklıkta uygulanan bir yöntemdir. Sinterleme işlemi öncesinde parçanın mikroyapısına bakıldığında parçacıkların birbirlerine temas ettikleri noktalarda boyun oluşumu gözlemlenmektedir. Sinterleme işlemi sırasında ise difüzyon (malzeme taşınımı) ile boyun oluşumu azaltılarak parçacıkların birleşmesi esas alınmıştır. Şekil 2.18’de sinterleme işlemi sırasında çift kürelerin difüzyon ile birleşmesi gösterilmektedir. Parçacıkların yüzey alanı azaldığı için mukavemeti ve sertliği yüksek bir parça elde edilir [55]. Şekil 2.19’da tane sınırlarından hacim, malzeme yüzeyinden hacim, malzeme hatalarından hacim, tane sınırlarından tane sınırı difüzyonu, malzeme yüzeyinden yüzey difüzyonu, gaz faz taşınımı olmak üzere altı değişik şekilde gerçekleşen malzeme taşınımları ve boyun oluşumu gösterilmektedir.

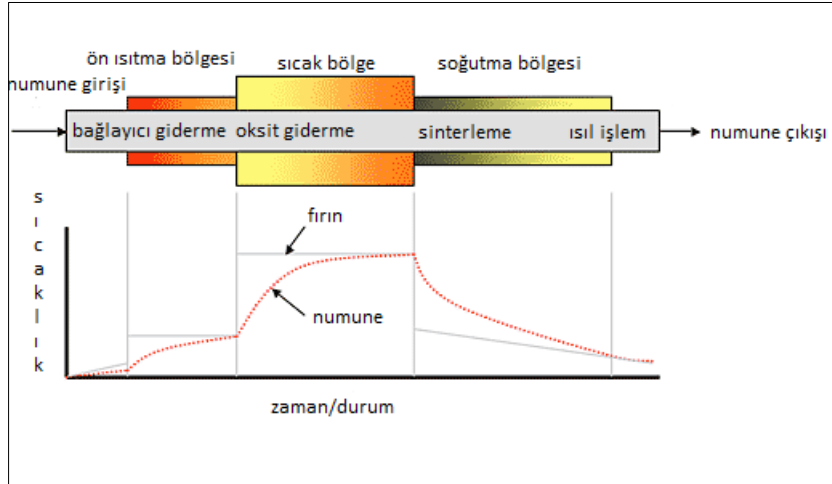


Şekil 2.18. Çift küre sinterleme modeli [56]



Şekil 2.19. Sinterleme esnasında difüzyon ile malzeme taşınımı ve boyun oluşumu [55]

Sinterleme işleminde öncelikli olarak, preslenen parça sinterleme fırınına aktarılır. Ön ısıtma bölgesinde bağlayıcı malzemelerden kurtulabilmek için parça yavaş yavaş ısıtılır. Parça, buharlaşan bağlayıcı malzemelerden uzaklaştırıldıktan sonra, en sıcak olan bölgeye geldiğinde oksitlerinde uzaklaştırılması ile sinterleme bölgesi olan yere ulaşır. Soğutma bölgesinin ardından nihai ürün fırından alınır [54]. Sinterleme işleminde fırın ve numuneye ait sıcaklık – zaman grafiği ve ürün elde edilme aşamaları Şekil 2.20’de gösterilmiştir.



Şekil 2.20. Sinterleme işlem aşamaları ve sıcaklık-zaman grafiği [57]

Sinterlemeyi gerçekleştiren itici güç, sistemin iç enerjisindeki azalmadır. Bu azalmayı sağlayan etkenler; parçacık temas alanlarının büyümesinden dolayı yüzey alanının azalması, gözenek hacmindeki azalma veya gözeneklerin küreselleşmesi, çok bileşenli sistemlerde katı fazın sıvı faz içerisindeki çözünmesi ile oluşan konsantrasyon farklılığının giderilmesi gibi etkenlerdir [58]. Şekil 2.21’de sinterleme işlem değişkenlerinin parça üretimindeki etkileri sunulmuştur.

Sinterleme İşlem Değişkenleri	Etkileri
Parçacık boyutunun küçülmesi	Daha hızlı sinterleme Daha fazla masraf Daha fazla impürite miktarı Artan sağlık riski
Artan sinterleme süresi	Daha fazla masraf Tane kabalaşması Verimlilikte azalma
Artan sinterleme sıcaklığı	Daha yüksek yoğunluk Daha hızlı sinterleme Isıl parçalanma Tane büyümesi Daha fazla masraf Gözenek kabalaşması Fırın kullanım ömrünün azalması
Artan yaş yoğunluk	Daha az sinterleme çekmesi
Artan alaşım düzeyi	Daha yüksek dayanım Homojenlikte azalış kaygısı
Sinterleme yardımcılarının kullanımı	Daha düşük tokluk Daha düşük sinterleme sıcaklığı Hızlı yoğunlaşma Daha yüksek son yoğunluk Sürünme dayanımında azalma Çekme ile şekil bozulması Tane büyümesi

Şekil 2.21. Sinterleme işlem değişkenleri ve etkileri [59]

2.5.4. İkincil işlemler

İkincil işlemler, sinterleme işleminin hemen ardından yüksek kalitede parça üretimi için uygulanan çeşitli işlemlerdir. Bu işlemler, ısıl işlemler, yağ emdirme, temperleme, ikinci presleme, boyutlandırma, yüzey sertleştirme, talaşlı imalat, yüzey kaplama, çapak alma, infiltrasyon, gibi işlemlerden oluşmaktadır [42].

Üretilen parçadaki gözenek miktarını azaltmak için ikinci presleme işlemi uygulanmaktadır. İlk sinterleme işleminin ardından parçada yer alan yağlayıcılar işlevini kaybettiğinden dolayı kristalleşme meydana gelir ve parça sünekliğini tekrar kazanır [42].

Yağ emdirme işlemi, gözeneklere sahip parçalara, gözenekleri dolduracak şekilde yağ emdirme ile gerçekleşmektedir. Kendinden yağlamalı parçalara örnek olarak sinter burçları verilebilir [42].

Yüzey kaplama işlemi, elektrokaplama, kimyasal buhar biriktirme benzeri yöntemler ile yapılmaktadır [42].

İnfiltrasyon işlemi ise parçanın mekanik özelliklerini iyileştirmek için, metal tozların sinterleme sıcaklığının altında bir değere sahip olan ergime sıcaklığındaki bir alaşım ile gözeneklerinin doldurulması işlemidir [60].

Sinterleme işlemi sonrasında, toz metal çeliklerin mukavemetini artırmak için genellikle su verme ve temperleme işlemleri uygulanmaktadır.

İkincil işlemlerden biri olan ısıl işlemler, 3. bölümde “Çeliklere Uygulanan Isıl İşlemler” başlığı altında incelenmiştir.

3. ÇELİKLERE UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Isıl işlemler, son şeklini almış parçalara belirli nitelikler kazandırmak, mekanik özelliklerini düzenlemek, alaşım elementlerinin dağılımını ayarlamak gibi sebeplerle sıkça kullanılan kontrollü ısıtma ve soğutma yöntemleridir [61].

Bir başka deyişle, metal veya alaşımlara belirlenen sıcaklıkta tavlama işlemi yapılarak metal yapılarını istenilen faza getirmek için uygulanan metalurjik bir işlemdir [61]. Isıl işlemleri etkileyen başlıca parametreler aşağıdaki gibi sıralanmaktadır;

- Isınma hızı,
- Tutma sıcaklığı ve süresi,
- Soğutma hızı ve bekleme süreleri,
- Yeniden ısıtma süreleri,
- Son soğuma hızı ve atmosfer [61].

Tüm bu parametrelerin uygun bir yapı-özellik birleşimini elde etmek için belirli sıra ve süre ile uygulanmasına ısıl işlem adı verilmektedir [62].

Çeliklerin kullanım alanları, katı haldeki çeliklere ısıl işlemlerin uygulanması ile çeliklerin nitelikleri değiştiği için artmaktadır. Isıl işlemler uygulandıktan sonra demir veya demir alaşımlarının faz dönüşümü gerçekleşmektedir. Östenit-ferrit faz dönüşümü görülmeyen demirlerde normalizasyon ya da sertleştirme gibi ısıl işlemler yapılamamaktadır. Isıl işlemlerin çeliklere uygulanması, ısıtma, tutma ve soğutma olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmektedir [63].

Isıtma

Oda sıcaklığındaki parçanın tavlama sıcaklığına doğru ısıtılması ile gerçekleşir. İstenilen ürünü elde edebilmek için tavlama sıcaklığı ya da ısıtma hızı gibi parametreler değiştirilebilmektedir [63].

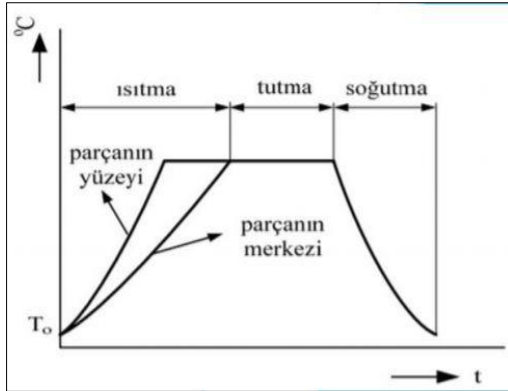
Tutma

Tüm yapının homojen olabilmesi için malzemenin boyutlarına göre belirlenen bir sürede parça bekletilmektedir [63].

Soğutma

Farklı mikroyapılara sahip olan parçalar üretebilmek için parçalar, havada, yağda veya suda soğutulmaktadır [63].

İstenilen parçayı elde edebilmek için değişik parametrelere sahip olan ısıtma, tutma ve soğutma süreleri belirlenmektedir. Şekil 3.1’de ısıtma işlem basamaklarının sıcaklık-zaman grafiği sunulmuştur.



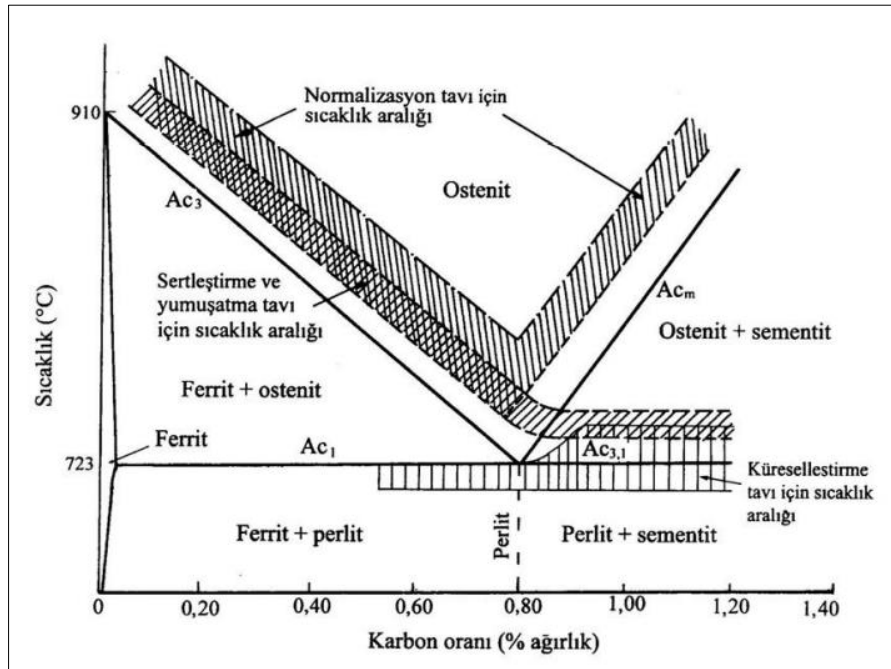
Şekil 3.1. Isıl işlem aşamaları sıcaklık-zaman grafiği [63]

Sertleştirme amaçlı olup olmamasına göre çeliklere uygulanan ısıtma işlemleri Şekil 3.2’de gösterilmektedir. Parçaya sertleştirme amacıyla su verme, östemperleme, martemperleme gibi işlemler uygulanırken, amaç sertleştirme değil ise normalizasyon, gerilim giderme, tam tavlama gibi işlemler uygulanır.



Şekil 3.2. Çeliklere uygulanan ısıl işlemler [64]

Şekil 3.3’de karbon oranı ile bağlantılı olarak farklı sıcaklıklarda alaşımsız çeliklerin kazandığı özellikler ve alaşımsız çeliklere uygulanan farklı ısıl tavlama sıcaklık bölgeleri sunulmuştur.



Şekil 3.3. Alaşımsız çeliklere uygulanan ısıl işlemler tavlama sıcaklık aralıkları [65]

Aşağıda çeliklerin ısıl işlem sonucunda kazandıkları özellikler açıklanmıştır.

Tam tavlama

Tam tavlama, çeliğin tek faz östenit bölgesine ısıtılması ve faz dönüşümü için fırın içerisinde yavaş soğutulması ile gerçekleşen bir ısıtım işlemi türüdür. Bu ısıtım işlemin amacı, çeliğin sünekliğini ve tokluğunu artırarak daha yumuşak bir yapı elde etmek, elektrik ve manyetik özellikleri daha iyi bir çelik üretmek, perlit lamelleri arasındaki mesafeleri artırmaktır [66].

Yumuşatma tavlama

Ağırlıkça karbon oranı % 0,4'den büyük olan yüksek karbonlu çeliklerde talaşlı işlemeyi kolaylaştırmak, karbon oranı % 0,4'den küçük olan düşük karbonlu çeliklerde ise soğuk şekillendirmeyi kolaylaştırmak amacı ile uygulanmaktadır. Genellikle yüksek karbonlu çeliklerde, talaşlı işlemeyi ve soğuk şekillendirmeyi kolaylaştırmak, çeliği en yüksek yumuşaklığına erdirmek, düşük mukavemet ve sertlikte yüksek uzama elde etmek için kullanılan bir ısıtım işlemi yöntemidir [67].

Küreselleştirme tavlama

Çeliğin A₁ sıcaklık çizgisinin üzerinde veya aşağısında uzunca bir süre tutulması ve soğumanın yavaşça yapılmasıyla karbürlerin küresel forma sahip olmasına olanak sağlayan, çeliği yumuşatmak ve talaş kaldırma kabiliyetini artırma amacı ile yapılan ısıtım işlemi yöntemlerinden biridir. Genellikle yüksek karbonlu çeliklere uygulanmakta olup, düşük karbonlu çelikler bu işlem sonunda daha çok yumuşama özelliği gösterdiği için parça işleme zor hale gelmektedir [68].

Gerilim giderme tavlama

Plastik deformasyon, talaşlı işlem, kaynak, döküm ve sertleştirme gibi işlemler uygulanan numunede meydana gelen iç gerilmelerin giderilmesi için kullanılan bir ısıtım işlemi yöntemidir. İç gerilmeler; deformasyon, çatlama, çarpılma gibi etkiler oluşturarak parçanın performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Gerilim giderme tavlama, normalizasyon ve yumuşatma tavlama ile birlikte de kullanılabilir. Bu sayede iç gerilmeler azaltılarak, malzemenin performansı ve mekanik özellikleri iyileştirilmiş olur [69].

Normalizasyon

En yaygın ısıtıl işlem yöntemlerinden biri olan normalizasyon, çeliği östenit fazına ısıtma, sonrasında havada soğutma işlemlerini kapsamaktadır. Tavlama işlemi ile kıyaslandığında soğutma süresi daha kısadır. Düşük karbonlu çeliklerin işlenebilirliğini artırmak, düzenli ve homojen bir iç yapı elde etmek, tane boyutunu küçültmek, çeliklerin sertlik ve mukavemetini artırmak amacıyla uygulanmaktadır.

Normalizasyon ile tavlama işlemine benzer mikroyapıda ferrit, sementit ve lamelli perlit oluşturulmaktadır. Fakat normalizasyon işleminde daha yüksek soğutma hızı sebebi ile östenit dönüşümü tavlama işleminden daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşmektedir. Bundan dolayı perlit daha ince ve lameller arası mesafeler daha kısadır [64].

Su verme

Çelikten üretilen parçanın soğutulma işlemi yavaş veya orta hızda olduğunda, başka bir deyişle, havadaki soğuma hızından daha hızlı bir şekilde soğutulduğunda, karbon atomlarının östenit yapısında çözünmüş halde bulunması, malzeme taşınımı ile östenit yapıdan giderek uzaklaşması anlamına gelmektedir. Parçanın soğuma hızı artmasıyla difüzyon ile katı çözültiden ayrılmak için zaman bulamayan karbon atomları, katı çözültinin içinde kalmaktadır. Hızlı soğuma sonucu oluşan ve sertleşme yeteneği olan bu yapıya martenzit fazı adı verilmektedir. Çeliğin sertleşme kabiliyeti, karbon oranına, sertlik derinliği ise alaşım elementlerine bağlı olarak değişmektedir [70, 71].

Temperleme

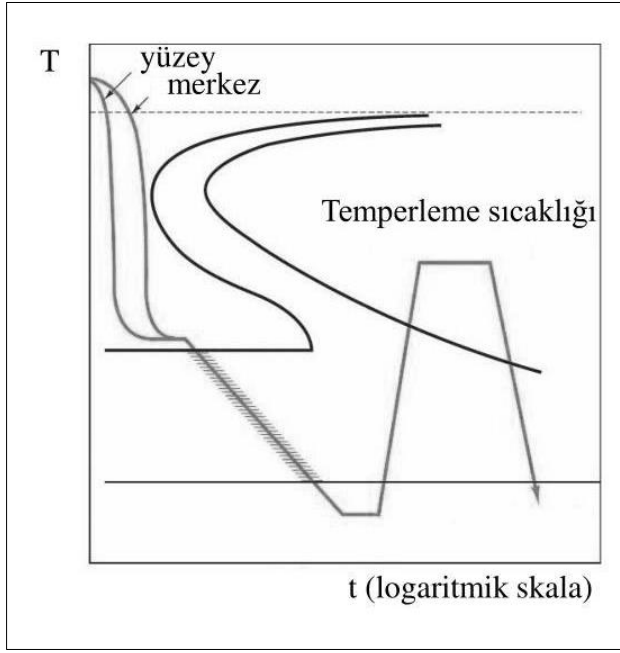
Su verme işlemi ile oluşturulan martenzit fazına sahip olan parça, çok sert ve kırılgan bir yapıdadır. Endüstride kullanılmaya elverişli olmayan bu yapının, süneklik ve darbe tokluğunu artırmak, mukavemet sağlamak, gevrekliği yok etmek ve homojen bir yapı elde etmek için temperleme ısıtıl işlemi uygulanmaktadır. Temperleme işlemi, 300 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda düşük sıcaklık temperlemesi ve 500°C-700°C arasındaki sıcaklıklarda yüksek sıcaklık temperlemesi olmak üzere iki tane sıcaklık aralığında yapılmaktadır. Düşük sıcaklıkta yapılan temperlemenin amacı, çelikteki gerilimi azaltmaktır. Yüksek sıcaklıkta yapılan temperleme ise, çelikte sertlik kaybına neden olabilmektedir.

Martemperleme

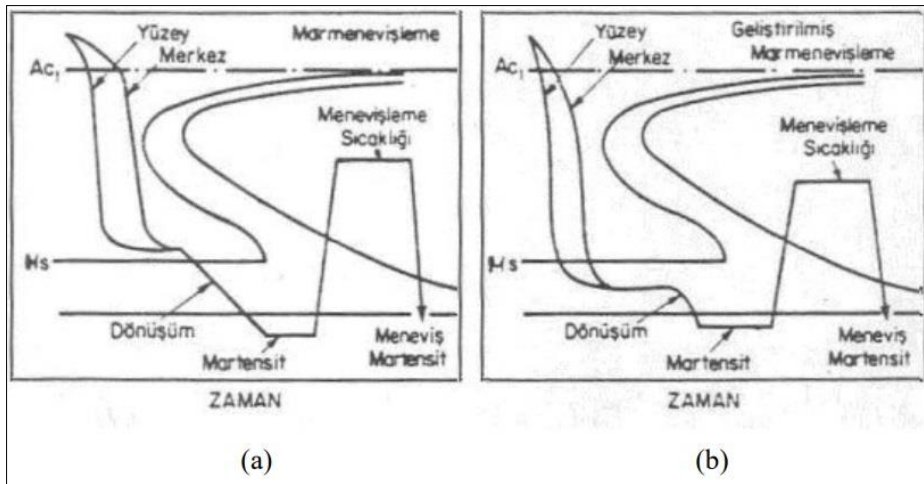
Martemperleme ısıtıl işlemi, çelik iş parçasının kritik soğuma hızından daha yüksek bir hızda ve martenzit dönüşümünün başlama sıcaklığının (M_s) hemen üzerindeki bir sıcaklığa soğutulularak, kısmen daha yumuşak bir yapı olan beynite dönüşemeyecek süre kadar bekletilip ardından parçanın soğutulması için yağ veya su kullanılması işlemidir. Parça yüzeyi ve merkezi aynı sıcaklığa ulaşana kadar parça tuz banyosunda bekletilir. Daha sonraki aşamada malzemeye su verilmesi ile malzeme iç yapısının tamamen martenzit yapı olması sağlanmaktadır. Bunun sonucunda istenilen mekanik özelliklere ve farklı mikroyapıya sahip parça elde edilmiş olur. Martemperleme ısıtıl işlemi ile, martenzit oluşurken parça tuz banyosuna bir süre daldırılıp bekletildiğinden dolayı, parçanın yüzeyi ve iç yapısında homojen bir martenzitik yapı oluşturulmaktadır [72].

Martemperleme ısıtıl işleminin amacı, sertleştirme sırasında malzemede oluşan çatlama ve distorsiyonu azaltmaktır. Büyük ve farklı kesit alanlarına sahip parçaların klasik su verme işlemlerinde, ince kesitleri ve parka yüzeyleri hızlı bir şekilde soğuduğu için martenzite dönüşür ancak hızlı soğuyamayan parça merkezi ve kalın kesitli olan yerler martenzit yapıya dönüşemeyebilir [72].

Şekil 3.4’de martemperleme ısıtıl işleminin uygulandığı Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı verilmiştir. Şekil 3.4’e göre sıcaklık arttıkça beynitik dönüşüm süresi azalmaktadır. Şekil 3.5 (a)’da gösterilen klasik martemperleme işleminde, çelik iş parçası östenitleme sıcaklığından, martenzit dönüşümü başlama sıcaklığının hemen üzerindeki bir sıcaklık değerine sahip olan yağ ya da tuz banyosunda belirli bir süre bekletilir. Parçanın iç ve dış yapısı aynı sıcaklığa gelecek süre kadar bekletilerek soğutulur. Daha sonrasında ise havada soğutulularak martenzitik yapı elde edilmiş olur. Şekil 3.5 (b)’de gösterilen gelişmiş martemperleme işleminde ise, çelik iş parçası, östenitleme sıcaklığından martenzit dönüşüm başlama sıcaklığı ile martenzit dönüşüm bitiş sıcaklığı arasında yer alan sabit bir sıcaklıkta soğutulur. Böylece soğutma hızları daha hızlı olmaktadır [63,72].



Şekil 3.4. Martemperleme işlemi Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı [72]



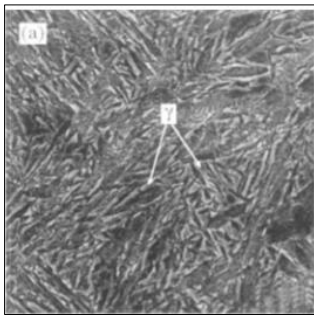
Şekil 3.5. Isıl çevrim diyagramları a) klasik martemperleme işlemi b) gelişmiş martemperleme işlemi [73,74]

4. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

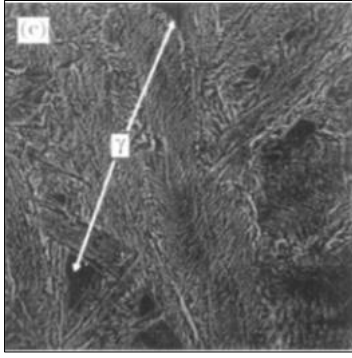
4.1. Martemperlenmiş Çeliklerde Martensit Faz Dönüşümü, Kalıntı Östenit ve Karbür Çökmesi

Bu bölümde yüksek karbonlu çeliklere uygulanan ısıl işlemler ile ilgili literatürde bulunan deneysel çalışmalar ve sonuçları özetlenmiştir. Bu kapsamda, ayrıntılı bir şekilde literatür araştırması sunulmuştur.

Shaeri ve Saghafian yapmış oldukları deneysel çalışmalarında kalıntı östenit varlığının krom molibden çelik alaşımları üzerindeki etkilerini incelemişlerdir. Krom molibden çelik alaşımlarda, kalıntı östenit varlığının, aşınma direnci ve kırılma mukavemeti ile ilgili olumsuz etkileri gidermek için su verme, östemperleme, martemperleme ısıl işlemlerinin etkileri incelenmiş ve mikroyapı analizi değerlendirilmiştir. Numuneler, 950°C’de östenitlenmiş ve 200, 300 ve 400 °C sıcaklığa sahip tuz banyosunda 2-8-30- ve 120 dk bekletilmiştir. Numunelerin SEM ve optik görüntüleri ile XRD ve mikrosertlik testleri incelenmiştir. Sonuçlara göre, kalıntı östenit miktarı en az olan numune 300 °C’de 120 dk bekletilen numune olmuştur. Bununla birlikte, 200 °C’de bekletme süresi arttıkça numunedeki kalıntı östenit miktarı azalmıştır. Kalıntı östenit miktarı, 300 °C sıcaklığa sahip olan tuz banyosunda numuneyi bekletme süresi arttıkça logaritmik olarak artarken bir süre sonra azalmaya başlamaktadır. Martenzit başlama sıcaklığı üzerindeki sıcaklıklara sahip tuz banyosunda bekletilme süresi artan numuneler de kalıntı östenit miktarı azaldığı gözlemlenmiştir. Resim 4.1’de görüldüğü üzere kalıntı östenit miktarı, Resim 4.2’de yer alan kalıntı östenit miktarından daha fazladır. Aynı sıcaklığa sahip tuz banyosunda bekletilen numunelerin, bekletilme süreleri arttıkça kalıntı östenit miktarı azalmaktadır [75].

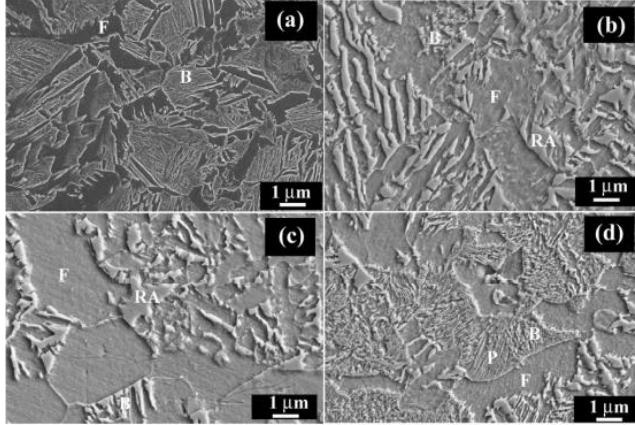


Resim 4.1. 300 °C tuz banyosunda 2 dk bekletilen numuneye ait kalıntı östenit dağılımı [75]



Resim 4.2. 300 °C tuz banyosunda 120 dk bekletilen numuneye ait kalıntı östenit dağılımı [75]

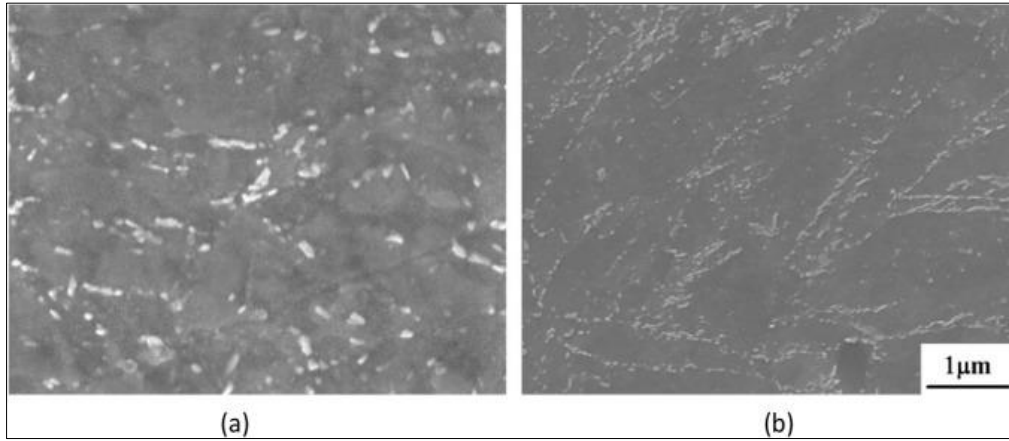
Varshney ve Sangal yapmış oldukları deneysel çalışmalarında ağırlıkça % 0,6 karbon oranına sahip çeliklerde 300, 350 ve 400 °C sıcaklıklarına sahip tuz banyolarında östemperleme ısı işlemleri uygulandığında, karbon miktarının artışı sonucu beynitik oluşum tamamlandığında dönüşmemiş östenitik fazlar görüldüğü değerlendirilmiştir [76]. Resim 4.3’de tuz banyosu sıcaklığına bağlı olarak değişen faz dönüşümleri ve kalıntı östenitler görülmektedir.



Resim 4.3. Tuz banyosu sıcaklıkları a) 300 °C, b) 350 °C, c) 400 °C, d) 40 s 350 °C (B: beynit, RA: kalıntı östenit, F: ferrit, P: perlit) [76]

Malherios ve Rodriguez yapmış oldukları deneysel çalışmalarında geniş sıcaklık ve süre aralığında temperlenen martensitik çeliklerin mekanik karakterizasyonunu değerlendirmişlerdir. Mekanik özellikler, sertlik, temperleme koşulları arasındaki ilişkiler incelenmiştir. Mikroyapısal özelliklere bakıldığında, karbür çökmesi olduğunu ve buna bağlı olarak, temperleme ile katı çözelti içindeki karbonun azaldığı görülmektedir. Vakum indüksiyon eritme yöntemi kullanılarak, farklı miktarlarda C, Mn, Si ve Al’dan oluşan beş farklı alaşıma sahip çeliğin farklı kombinasyonları üretilmiştir. 870 ve 950 °C’de 100 sn

östenitlenen numunelere su verilmiş, ardından yağ banyosunda 10 sn'den 3 saate kadar 150 °C, 200 °C ve 500 °C'de temperlenmiştir. Temperlenen numuneler soğutulmuştur. Farklı kimyasal bileşimlere sahip çeliklerin temperleme koşulları ile mekanik davranışları ve değişimleri incelenmiştir. Farklı sıcaklık ve sürelerde temperlenen numunelere çekme deneyleri yapılmıştır. Temperleme parametleri ve mekanik özellikler arasında doğrusal bir ilişki kurulmuştur. Yapılan deney sonuçlarına göre, temperlemeden dolayı, silikonun sertliğindeki azalma yavaşlamıştır. Resim 4.3'de düşük karbonlu bileşiğin (LC) ve yüksek silikon içeren (HS) çeliklerin temperlenmiş numunelerinde karbürlerin oluştuğu görülmektedir ve bu durum, silikonun sementit büyümesi üzerindeki geciktirici etkisini dolaylı olarak doğrulamaktadır. Yüksek silikon içeren çeliğin (HS) karbür çöktürücüleri, düşük karbon içeren çeliğe (LC) göre daha ince plakalar şeklindedir ancak yüksek silikon içeren çelik (HS), daha uzun süre temperlenmiştir [77].

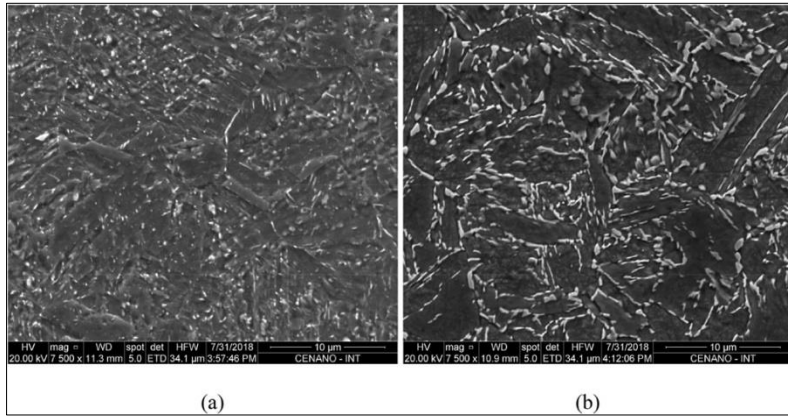


Resim 4.4. Çelik numuneye ait karbürleri gösteren SEM görüntüleri a) 460 °C'de 300 s temperlenmiş LC (düşük karbonlu) çelik, b) 460 °C'de 3600 s temperlenmiş HS (yüksek silikonlu) çelik [77]

Tavares ve Cunha yapmış oldukları çalışmada, % 9'luk Nikel düşük karbonlu çelikleri 400 °C ve 600 °C'de 1 saat temperleyerek mikroyapı ve kırılma özellikleri arasındaki ilişkiyi araştırmışlardır. Bu malzeme, petrol ve gaz endüstrilerindeki kriyojenik hizmetlerde kullanılmaktadır. Hatalı temperleme sıcaklığı seçimi, çeliğin kriyojenik tokluğunu büyük ölçüde azaltan meneviş gevrekleşmesine neden olmaktadır. Tane boyutunun büyük olması nedeniyle, 1000 °C'de östenitlenen numuneler, 820 °C'de östenitlenen numunelere göre daha düşük tokluğa sahiptir. Resim 4.5'de % 2 nital çözeltisi ile dağlanmış numunelerin SEM mikroyapısal karakterizasyonunu göstermektedir. 820 °C'de östenitlendikten sonra 400 °C'de temperlenen numunelerde, östenit taneleri boyunca ince mikro bileşenler

gözlenirken, 600°C’de temperlenen numunelerde daha iri parçacıklar gözlenmiştir. Sertlik sonuçları karşılaştırıldığında, östenit tane sınırı ve martenzit lataları arasında Fe₃C karbürleri olabileceği düşünülmektedir. % 9 Nikel içeren düşük karbonlu çelikler, 400 °C’de temperlendiğinde meneviş gevrekleşmesi göstermektedir. Kırık yüzey, taneler arası çatlaklar ve yarı bölünme yüzeyleri içermektedir [78].

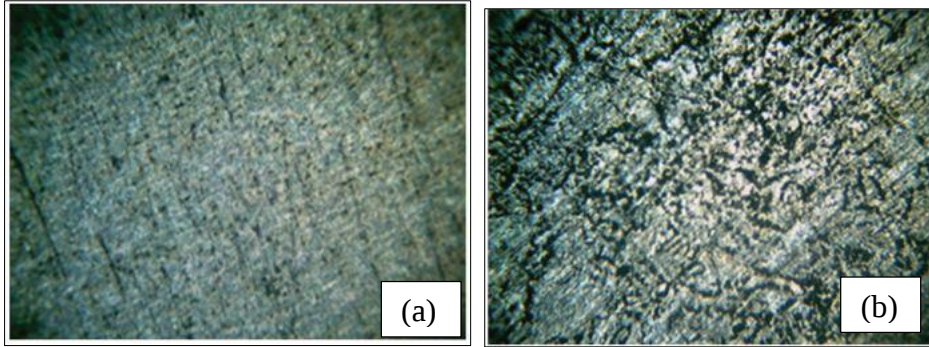
Fe₃C taneler arası karbürler, EDS, WDS (Dalgaboyu Dağılım Spektroskopisi) ve SEM karakterizasyonları ile kanıtlanmıştır. Bu parçacıkların, taneler arası gevrekleşmeye neden olduğu düşünülmektedir [78].



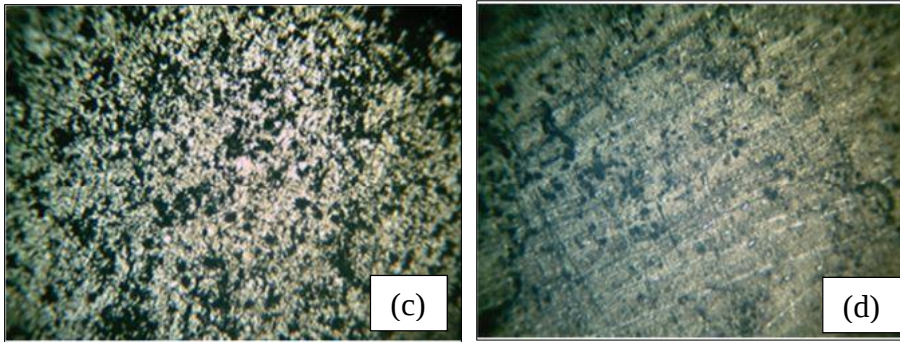
Resim 4.5. 820 °C’de östenitlendikten sonra a) 400 °C, b) 600 °C’de temperlenmiş numunelerin SEM görüntüleri [78]

Krishna ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmada, , östemperleme ve martemperleme ısı işlemlerinin AISI 52100 çeliği üzerindeki etkisini deneysel olarak araştırmışlardır. Isıl işlem sonrası mikroyapı analizi, sertlik testi, darbe testi, aşınma testleri yapılmıştır. Tavlanmış çeliğin daha az sert ve aşınmaya daha yatkın olduğu, martemperlenmiş çeliğin ise daha sert ve aşınmaya karşı daha az yatkın olduğu görülmüştür. Östemperlenmiş çelik en yüksek darbe dayanımına sahip olup, tuz banyosunda bekletilme süresi ile beraber darbe dayanımı artmaktadır. Hem aşındırmada hem de kuru kaymada martemperlenmiş numunede en az aşınma oranı görülmektedir. Ancak en düşük sürtünme katsayısına tavlanmış numuneler sahiptir. Resim 4.6 (a)’da iyi dağılıma sahip siyah noktalardan oluşan tavlanmış numunenin mikroyapısı gösterilmektedir. Siyah noktalar, yapıda bulunan karbür olarak yorumlanmıştır. Resim 4.6 (b)’de martemperlenmiş numunenin yapısı tamamen karbürle kaplıdır ve tüm yüzeyinde yoğun miktarda karbür bulunmaktadır. 10 dk suya daldırma süresine sahip Resim 4.6 (c)’de gösterilen östemperlenmiş numune, karbür yoğunluğuna sahiptir ancak yapısında bulunan karbür yoğunluğu martemperlenmiş numuneden daha azdır. Resim 4.6 (d)’de

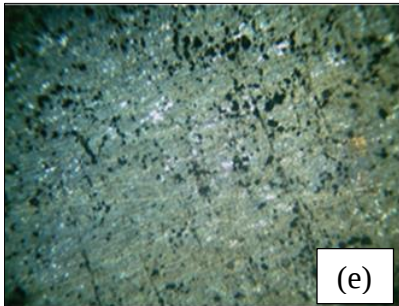
gösterilen 10 dk suya daldırma süresine sahip numuneye kıyasla, 20 dk suya daldırma süresine sahip numunede daha az karbür olduğu görülmektedir. Resim 4.6 (e)'de, 30 dk suya daldırma süresine sahip östemperlenmiş numunenin mikroyapısı görülmektedir. Numunede çok sayıda karbür olduğu ancak yalnızca bazı bölgelerde yoğun olarak bulunduğu görülmektedir. Numunelerin sertlikleri de karbür miktarına göre değişmektedir [79].



Resim 4.6. a) Tavlanmış AISI 52100 çelik, b) martemperlenmiş AISI 52100 çelik [79]



Resim 4.6. c) 10 dk östemperlenmiş AISI 52100 çelik, d) 20 dk östemperlenmiş AISI 52100 çelik [79]



Resim 4.6. e) 30 dk östemperlenmiş AISI 52100 çelik [79]

Tavlanmış numuneler martemperlenmiş numunelere oranla daha az karbür yoğunluğuna sahiptir ve sertliği daha azdır. Martemperleme işlemi ile AISI 52100 çelikten üretilen

numunelerin sertliklerinin arttığı gözlemlenmiştir. En yüksek darbe mukavemetine östemperlenmiş numunelerin sahip olduğu belirtilmiştir. Östemperlenmiş numunelerde, belli bir seviyeye kadar suya daldırma süresi ile darbe dayanımı artmıştır. Östemperleme işlemi ile % 20 iyileşme görülmüştür. En yüksek aşınma değerine tavlanmış numuneler sahipken, en az aşınma değerine martemperlenmiş numunelerin sahip olduğu belirtilmiştir. Martemperleme işlemi ile yaklaşık % 50 - 60 oranında aşınma direnci artırılmıştır [79].

5. AŞINMA TEORİSİ

Triboloji bilim dalı, birbirleri ile temas eden malzemelerin birbirlerine göre yaptıkları bağlı hareket sonucu malzemelerde oluşan sürtünme, yağlama ve aşınma davranışlarını incelemektedir. Tribolojik sistemi oluşturan elemanlar; ana malzeme (aşınan), karşıt malzeme (aşındıran), ara malzeme (yağlayıcı), yük, hareket ve çevre gibi elemanlardır [80].

Tribolojik bir sistemden bahsedebilmek için aşındırıcı, aşınan, yük gibi elemanların çoğunluğu gerekmektedir. Aşınan malzeme ve aşındıran malzeme aşınma çiftini oluşturmaktadır ve aralarında belli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket halinde olduklarında aşınma başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri gibi katı cisimlerdir. Aşındıran malzeme ise; metal, mineral, plastik, ağaç olabileceği gibi sıvı ve gazlarla karışım durumunda da olabilir. Ara malzemeler ise yağlar, aşınma parçacıkları gibi malzemelerdir. Çalışma ortamı, tribolojik sistemin çevresini belirlemektedir. Yükleme; darbeli, darbesiz, sabit, değişken şekilde veya bunların birkaçının bir arada olması şeklinde, hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe gibi şekillerde olabilmektedir [81].

Aşınma, birbiri ile temas eden malzemeler arasında mekanik, fiziksel ve kimyasal faktörlerden dolayı mikro boyuttaki parçaların kopması sonucu malzeme kaybı ve istenmeyen yüzey değişikliği oluşmasıdır [82].

Şekil 5.1’de aşınmaya etki eden faktörler gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Aşınmaya etki eden faktörler

Ana malzemeye bağlı faktörler;

- Malzemenin kristal yapısı
- Malzemenin sertliği
- Elastisite modülü
- Deformasyon davranışı
- Yüzey pürüzlülüęü
- Malzemenin boyudur.

Çalışma koşullarına bağlı faktörler;

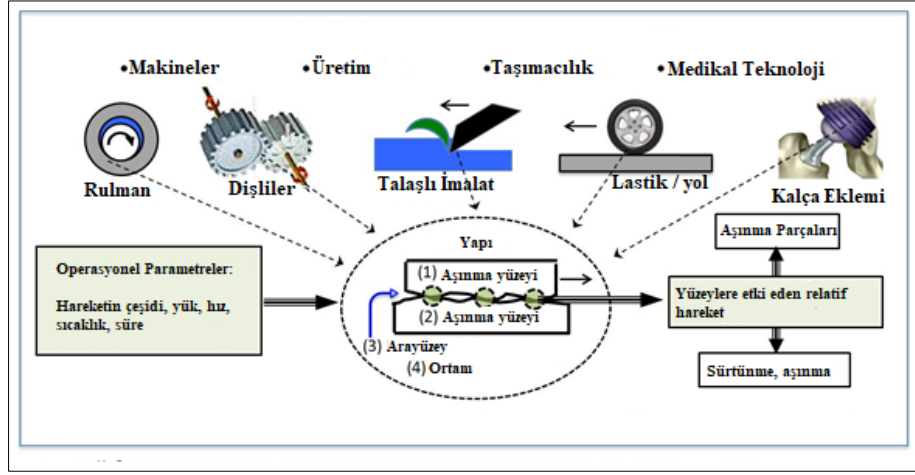
- Sıcaklık
- Nem
- Atmosferdir.

Ortamın etkisine bağlı faktörler;

- Basınç
- Hız
- Kayma yolu gibi faktörlerdir.

Triboloji biliminin alt dalı olan aşınma, makine, makine elemanları ve mühendislik malzemelerinin performansını olumsuz etkilemekte ve malzeme ömrünü kısaltmaktadır. Bundan dolayı, malzemelerdeki aşınma problemi, ekonomik olarak da olumsuz bir etki oluşturmaktadır. Aşınmaya maruz kalan parçaların değiştirilmesi, bakımı ve bunlar için harcanan süre ekonomik bir kayıptır [82].

Şekil 5.2’de tribolojinin üretim, taşımacılık, medikal teknoloji gibi çeşitli alanlarda kullanım örnekleri yer almaktadır.



Şekil 5.2. Tribolojinin çeşitli alanlardaki örnekleri [83]

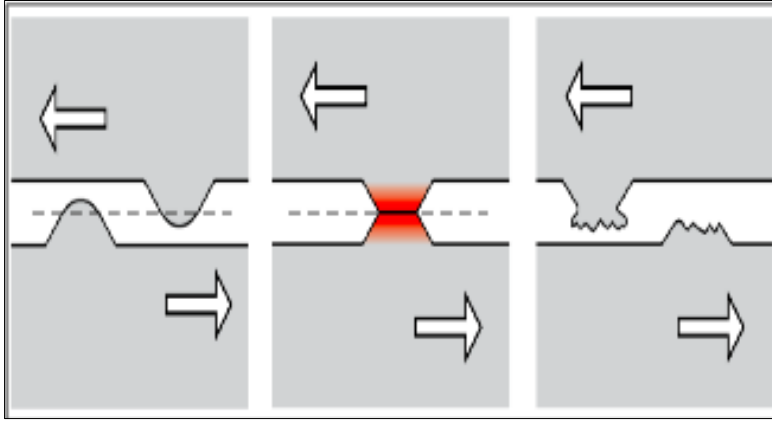
5.1. Aşınma Mekanizmaları

Aşınma mekanizmaları aşağıda belirtilen kategorilerde sınıflandırılmaktadır:

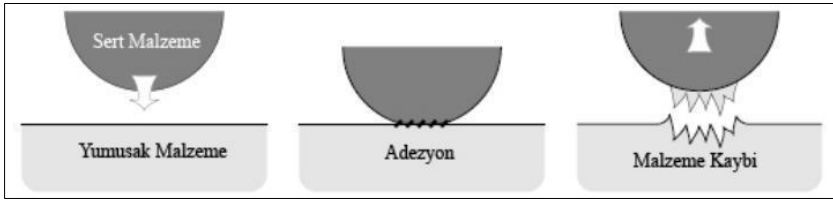
- Adheziv Aşınma
- Abrasif Aşınma
- Erozif Aşınma
- Korozyon Aşınma
- Yorulma Aşınması

5.1.1. Adheziv aşınma

Birbirleri ile kayma sürtünmesi hareketi yapan malzemelerde; metal-metal aşınma çiftinde meydana gelen sürtünme ile aşınma oluşmaktadır. Sıcaklık ve yük değişkenlerinin etkileriyle birlikte yumuşak malzemeden kopan parçalar, sert malzeme üzerinde kaynaklanma bölgeleri oluşturur. Basınç altındaki malzemelerde bulunan karşılıklı pürüzler, birbirlerine bağ yaparlar. Yüzeylerin rölatif hareketi nedeni ile kaynak bağı kopar ve yumuşak malzemenin aşınan yüzeyinde boşluklar meydana gelir, diğer yüzeyde ise tam tersi bir şekilde çıkıntılar oluşur. Adhesiv taneler iki yüzeye de dolmaktadır [84,85,86]. Şekil 5.3 ve Şekil 5.4’de adhesiv aşınmanın meydana gelişini sunulmaktadır.



Şekil 5.3. Adhesiv aşınma meydana gelişi [87]



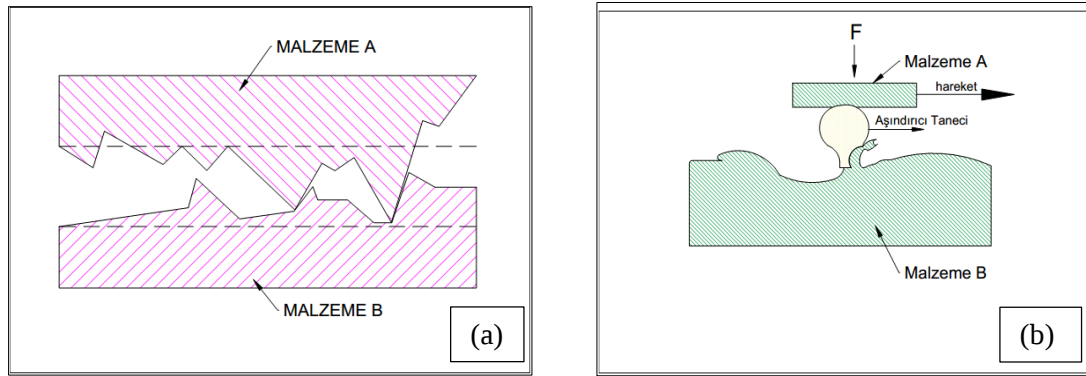
Şekil 5.4. Adhesiv aşınma mekanizması [86]

5.1.2. Abrasif aşınma

Abrasif aşınma; biri diğerinden daha sert ve pürüzlü olan metal yüzeylerinin birbiri ile temas ettiklerinde kayma sırasında oluşan aşınma türüdür [88].

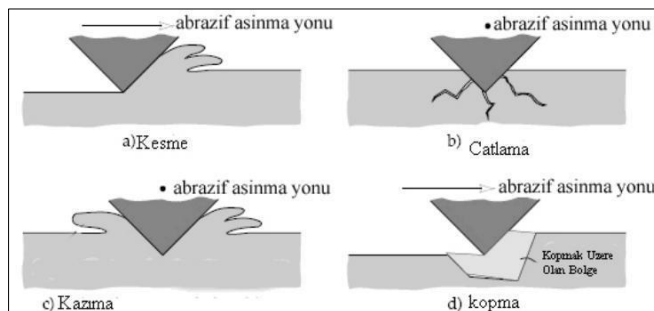
Abrasif aşınmanın meydana gelmesinde iki alternatif bulunmaktadır. İki malzemenin yer aldığı abrasif aşınma olayında, biri diğerinden daha fazla sert olan bir yüzeye maruz kaldığında, yumuşak olan yüzey deformasyona uğrar. Sert olan yüzeyin yumuşak yüzeye uyguladığı kuvvet ve basıncın etkisiyle yumuşak malzeme hasar görebilir. Zımparalama, toprak işlenmesi, kazı makinaları iki cisimli abrasif aşınmaya örnektir [85,89]. Şekil 5.5 (a)'da iki cisimli abrasif aşınma şematik olarak gösterilmektedir.

Şekil 5.5 (b)'de görülen üç cisimli abrasif aşınma olayı ise, ara yüzeylerde sürtünme elemanlarını çizerek onları tahrip eden sert tanecikler bulunduğu gerçekleşmektedir.



Şekil 5.5. Abrasif aşınma çeşitleri a) iki cisimli abrasif aşınma, b) üç cisimli abrasif aşınma

Abrasif aşınma mekanizmaları genel olarak malzemenin cinsine ve yüzey yapısına bağlı olarak kesme, çatlama, sürtme (kazıma), kopma olarak gruplandırılmaktadır. Şekil 5.6'da kesme, çatlama, sürtme (kazıma), kopma olayları gösterilmektedir.



Şekil 5.6. Abrasif aşınma şematik gösterimi [86]

5.1.3. Erozif aşınma

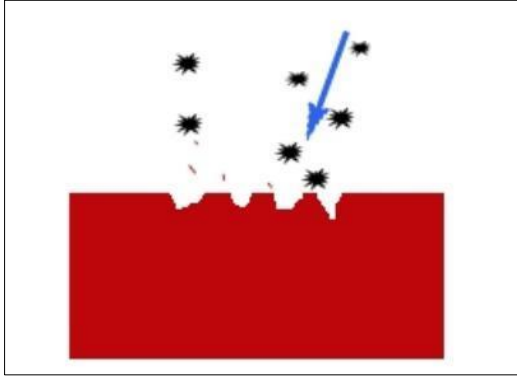
Erozif aşınma, katı bir yüzeyin, bir sıvı veya katı parçacığı içeren sıvı ile temas etmesi halinde mekanik etkileşim sonucunda meydana gelen ve bundan dolayı malzeme kaybına neden olan aşınma mekanizması türüdür [90].

Erozif aşınmanın abrasif aşınmadan temel farkı, aşınmanın, sert partiküllerin yüzeyi kazınması yerine yüzeye çarpması sonucunda oluşmasıdır [91].

Erozif aşınma, toz bulutundan geçen bir uçağın pervanelerinden pompa pervanelerine kadar birçok alanda meydana gelmektedir. Erozif aşınma, malzemenin dayanımından çok, parçacığın çarpma açısı, çarpma hızı ve parçacık boyutu gibi birçok parametreye bağlı olmaktadır. Örneğin, parçacık bir sıvı ise erozyona uğrar fakat sert ve katı halde ise abrasif

aşınma gerçekleşebilir. Çarpma açısı yüksek olan malzemeler erozyon aşınmasına maruz kalırken, çarpma açısı düşük olan malzemede abrasif aşınma meydana gelmektedir. Yüzeyde plastik deformasyondan ziyade statik yorulmanın meydana geldiği görülürse parçacık yüzeye daha yavaş çarpmış demektir. Plastik deformasyonun oluşması için parçacığın yüzeye hızlı bir şekilde çarpması beklenmektedir. Yüzeyde kısmen oluşan ergimeye ise çok yüksek hızda çarpan parçacıklar neden olmaktadır. Parçaların keskinliği, sertliği, aşınma hızını ve deformasyon miktarını belirleyen parametrelerdir [92].

Şekil 5.7’de erozif aşınma mekanizması oluşumu gösterilmektedir.



Şekil 5.7. Erozif aşınma mekanizması [86]

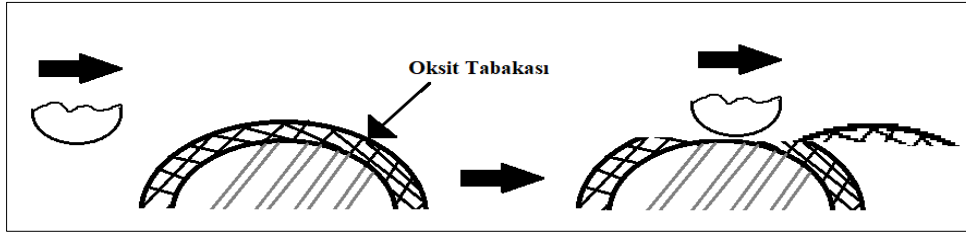
5.1.4. Koroziif aşınma

Korozyon aşınma, kayma aşınmasının koroziif ortamda meydana gelmesiyle oluşmaktadır. Hava bilindiği üzere koroziif bir ortamdır. Bundan dolayı, havadaki koroziif aşınma oksidatif aşınma olarak adlandırılmaktadır. Korozyon aşınmasında, alaşımlar ve metaller bileşik oluşturmak için çevre ile kimyasal veya elektrokimyasal etkileşimde bulunurlar [93,94]. Bu sayede çeşitli bileşikler oluşturarak metalin iç yapısında zayıflamaya sebebiyet verirler. Meydana gelen bu bileşikler sayesinde ana metalle bağlantıları zayıflayıp, bileşikler ana metalden kopar ve böylece koroziif aşınma oluşur [88].

Metalik malzeme yüzeylerinde genellikle içerdikleri alaşım elementlerine bağlı olarak oksit tabakası bulunabilmektedir. Kendiliğinden oluşan oksit tabakası sayesinde malzeme koroziif ortamlara karşı bir direnç oluşturmaktadır. Oksit tabakası, malzeme yüzeyinde koruyucu bir tabaka olarak görev yapmaktadır. Fakat malzeme yüzeyinde aşındırıcı ortamlardan dolayı hasar oluşur ve malzeme üzerindeki oksit tabakası zamanla malzeme yüzeyinden koparak işlevsiz hale gelir. Bunun sonucunda malzeme, korozyon etkisine karşı dirençsiz kalır.

Düşük sıcaklık korozyon aşınması adı verilen bu durum korozyon etkisi ile malzemenin aşınmasına yol açmaktadır [93,94].

Korozyon korozif ortamlarda, yüksek sıcaklıklarda ve yüksek nem oranlarında daha çok olmaktadır [89].

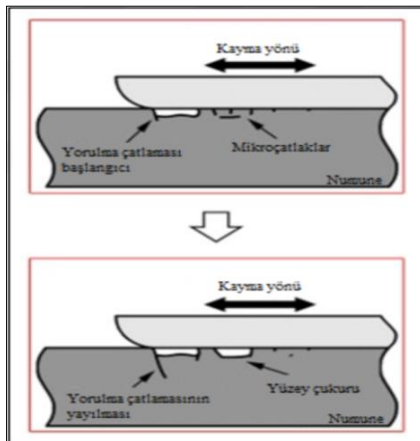


Şekil 5.8. Korozif aşınma mekanizması

5.1.5. Yorulma aşınması

Yorulma aşınması, rulmanlı yataklar, dişli çarklar ve kam mekanizmaları gibi birbirleri ile sürekli temas halinde olan yüzeylerde yaygın olarak görülen bir aşınma türüdür. Temas alanları çok küçük olan rulman gibi makina elemanlarında temas yüzeylerinde Hertz basınçları oluşmaktadır. Basıncın etkisi ile yüzeyin hemen altında kayma gerilmeleri meydana gelmektedir. Kayma gerilmelerinin en yüksek olduğu noktalarda plastik deformasyon oluşmakta ve bu deformasyon zamanla yüzeye ilerleyerek yüzeyde çukurcuklar meydana getirmektedir [93].

Şekil 5.9’da yorulma çatlamasının giderek artması ile oluşan yorulma aşınma mekanizması gösterilmektedir.

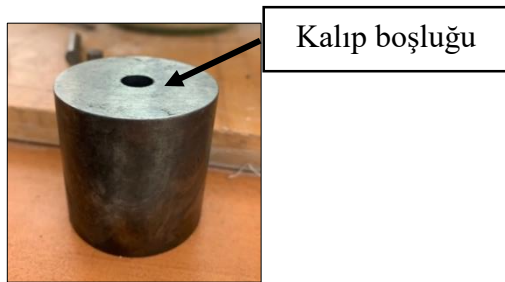


Şekil 5.9. Yorulma aşınma mekanizması [95]

6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

6.1. Malzeme

Bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemiyle üretilen yüksek karbonlu toz metal çeliklere, martemperleme ısı işlemi uygulanarak martensitik yapının beynite ulaşma süresi, dengeli martensitik dönüşümlerinin incelenmesi ve aşınma özelliklerine etkileri araştırılmıştır. Bu amaçla, su atomizasyonu yöntemi ile üretilmiş saf demir tozlarına (ATOMET 1001) karbon kaynağı olarak ağırlıkça % 1,5 oranında yüksek saflıkta doğal grafit tozu ilave edilerek, yüksek karbonlu toz metal çelikleri üretilmiştir. Çizelge 6.1’de kimyasal bileşimi ve özellikleri verilen ATOMET 1001, yüksek yoğunluklu, yüksek mukavemetli toz metalurjisi ve toz dövme uygulamaları için özel olarak tasarlanmıştır. Demir-grafit karışım tozlarından Resim 6.1’de gösterilen şekillendirme kalıbında mikroyapı incelemelerinde kullanılmak amacıyla 10x10 mm ölçülerinde (Resim 6.2.) ve ASTM G99-05 standardına göre 10x15 mm ölçülerinde aşınma test numuneleri (Resim 6.3.) imal edilmiştir. Çalışmalarda kullanılan Ø10x10 mm boyutlarına sahip numunelerin yukarıda belirtildiği gibi kimyasal bileşim hazırlanmasında 1×10^{-4} hassasiyetine sahip elektronik hassas terazide her bir numune ağırlığı ölçülerek, 6,12 g ATOMET 1001 demir tozu ve 0,09 g grafit tozu olacak şekilde hazırlanıp, karıştırılmıştır. Ø10x15 mm boyutuna sahip numuneler için ise 0,135 g grafit tozu ve 9 g ATOMET 1001 kullanılmıştır. Ayrıca, kalıpta sıkışmayı önlemek için yağlayıcı olarak % 0,5 Zn stearat karışıma eklenmiştir.



Resim 6.1. Mikroyapı incelemeleri ve aşınma deneyleri için üretilen numunelerin şekillendirme kalıbı



Resim 6.2. Mikroyapı incelemelerinde kullanılan Ø10x10 mm boyutuna sahip yüksek karbonlu toz metal çelik numuneler



Resim 6.3. Aşınma deneylerinde kullanılan Ø10x15 mm boyutuna sahip yüksek karbonlu toz metal çelik numuneler

Çizelge 6.1. ATOMET 1001 kimyasal bileşimi ve özellikleri

Kimyasal Bileşimi (%)	C	O	S	Mn	Fe	Fiziksel Özellikleri	Yoğunluk (g/cm ³)
	0,004	0,09	0,01	0,18	99,4		7,10

6.2. Presleme

ATOMET 1001 saf demir ve yüksek saflık oranına sahip doğal grafit tozu homojen bir şekilde karıştırılmıştır. Karışım kalıba yerleştirilerek, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan Hidroliksan marka maksimum 160 ton kapasiteli tek yönlü presleme cihazında oda sıcaklığında 700 MPa basınç uygulanarak preslenmiştir. Toz karışım, kalıp içerisine doldurulmadan önce kalıp duvarlarına etanol içerisinde % 10 oranında çözündürülmüş çinko stearat sürülmüştür. Bu işlemle presleme sonrası numunelerin kalıptan daha kolay çıkartılması ve numunede çatlama oluşturulmaması amaçlanmıştır.



Resim 6.4. Numune şekillendirmesi için kullanılan tek etkili presleme cihazı

Hazırlanan numunelere presleme işleminde uygulanacak olan basınç miktarı MPa yerine kgf olarak hesaplanmıştır ve gereken bu basınç presleme cihazına ayarlanmış ayrıca presin set presleme hızı 0,6 mm/sn olarak uygulanmıştır. Eşitlik 6.1’de belirlendiği gibi hesaplamalar sonucunda presleme cihazının göstergesinde okunan yük 5600 kgf set edilmiştir.

$$700 \text{ MPa (presleme basıncı)} = \frac{F}{78,5 \text{ mm}^2} \quad (6.1)$$

$$F = 5,5 \text{ ton} \cong 54,950 \text{ N (5600 kgf)}$$

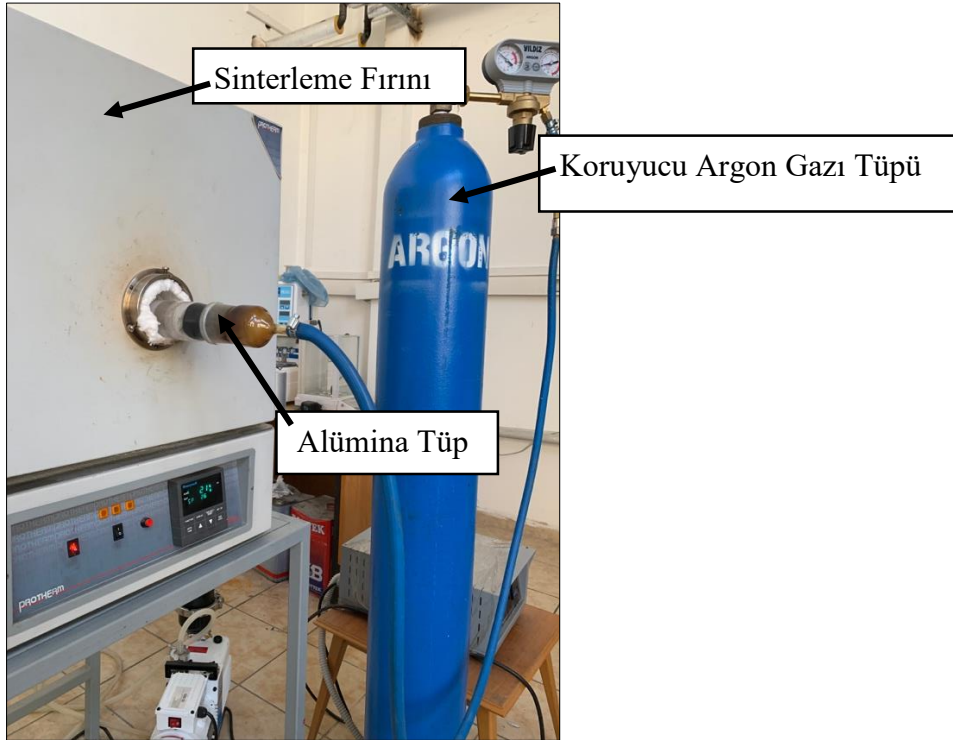
Öncelikle altlık kalıba önceden yerleştirilmiş olup toz karışım, kalıp içerisine konulmuştur. Daha sonra presleme cihazına yerleştirilmiş ve 700 MPa değerinde tek yönlü basınç uygulanmıştır. Okunan yük 5600 kgf olana kadar basınç uygulanmış ve değer okunduğunda presleme yükü kaldırılmıştır.

Kalıbın içerisinden, preslenmiş numuneyi çıkarmak için altlık çıkarılarak numunenin çıkışı için boşluk açılmıştır. Daha sonra iteleme zımbası çıkarılarak preslenmiş numunenin üst kısmına altlık yerleştirilip, altlığın üzerine tekrar iteleme zımbası konulmuştur. Böylece yük uygulandığında kalıp içerisinden numunenin çıkışı kolaylaştırılmıştır. Kalıp tekrar presleme

cihazına yerleştirilerek tekrar 700 MPa basınç uygulanmış ardından kalıp içerisinde preslenmiş numune alınmıştır.

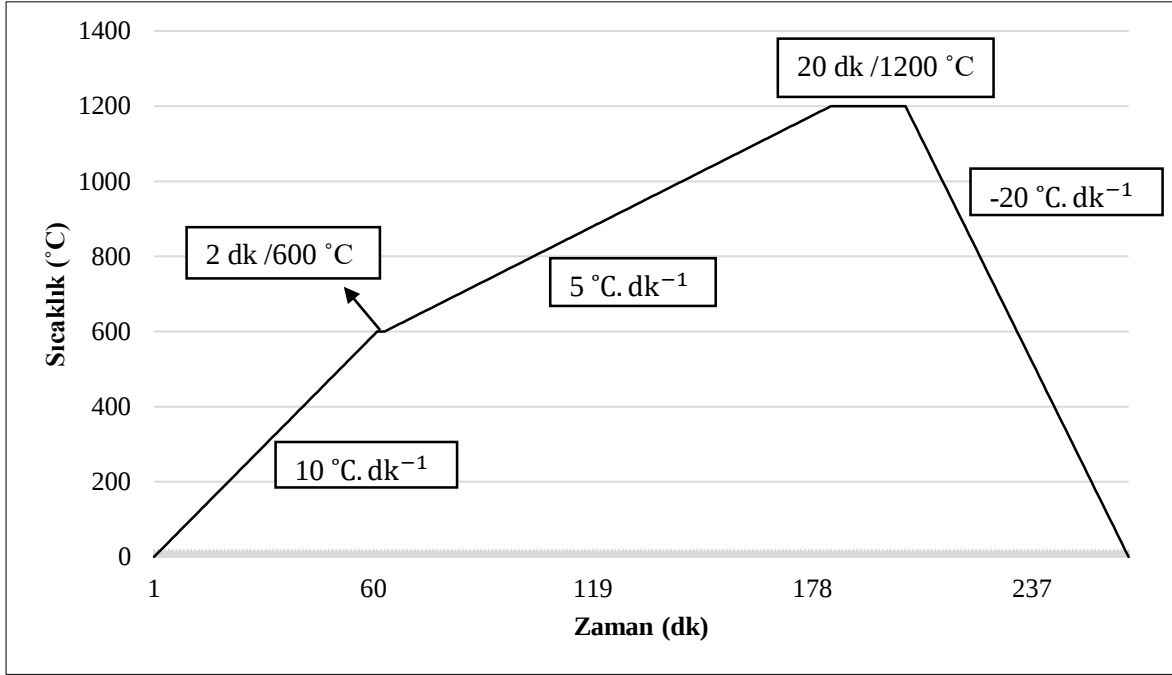
6.3. Sinterleme İşlemleri

Presleme işleminin ardından sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Isıl İşlem Laboratuvarı'nda bulunan Resim 6.5'de görülen Protherm marka SFL (sc 1206 model) yatay yüksek sıcaklık fırını kullanılmıştır. Presleme işlemi yapılan numunelerin sinterleme işlemi, fırına ait 6x110 cm ebadındaki saf alümina tüp içerisinde homojen sıcaklık bölgesinde, 1200 °C sıcaklıkta 20 dakika bekletilerek gerçekleştirilmiştir. Oda sıcaklığında numuneler belirlenen homojen sıcaklık bölgesine yerleştirilmiştir. Alümina tüpün ortasında kalan toplam 20 cm'lik bölgenin homojen sıcaklık bölgesi olduğu tespit edilmiş ve numuneler bu bölgeye yerleştirilerek sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tüpün ön ve arka kısmı Argon gazının giriş ve çıkışına izin verecek şekilde grafit kapaklarla kapatılmıştır. Sinterleme işlemi özel koruyucu atmosfer veya vakum altında yapılmalıdır. Numunelerin karbonca fakirleşmesine ve oksitlenmelerine karşı koruması için koruyucu atmosfer olarak %99,99 saflıkta argon gazı ve sünger titanyum kullanılmıştır. Resim 6.5'de sinterleme işlemi ekipmanları verilmiştir.



Resim 6.5. Sinterleme fırını ve koruyucu gaz atmosfer düzeneği

Sinterleme işlemi için kullanılan fırın kademeli olarak ısıtılmıştır. 600°C'ye kadar 10°C.dk⁻¹ ısıtma hızı, 600°C'de 2 dk bekletme, 600°C'den 1200°C'ye kadar 5 °C.dk⁻¹ ısıtma hızı, 1200°C'de 20 dk bekletme ve 20 °C.dk⁻¹ fırında serbest soğutma hızı seçilmiştir ve tüm sinterleme işlemleri her numune için aynı şartlarda gerçekleştirilmiştir. Şekil 6.1'de sinterleme işlemi için ısıtma çevrimi grafiği gösterilmektedir.



Şekil 6.1. Sinterleme işlemi ısıtma çevrimi grafiği

Resim 6.6'da sinterleme işlemi sonrasında elde edilen numuneler gösterilmiştir.



Resim 6.6. Sinterleme sonunda elde edilen numuneler

6.4. Yoğunluk Ölçümleri

Preslenen numunelerin ham halde, sinterleme işlemi sonrası ve ısıtma işlemi sonrası olmak üzere farklı işlem aşamalarında yoğunluk ölçümleri yapılmıştır. Presleme işlemi sonrasında

ölçülen yoğunluk, ham yoğunluk olarak kabul edilmiştir. Presleme işlemi sonrası numunelere sinterleme işlemi uygulanmış ve tekrar yoğunluk ölçülmüştür. Son olarak ısıtma işlemi uygulandıktan sonra yoğunluk ölçümü tekrarlanmıştır.

Ölçümler, hassasiyeti 0,1 mg olan dijital terazi ile kütle tespiti ve dijital kumpas kullanılarak kütle/hacim hesabı üzerinden yapılmıştır. Ayrıca Arşimed Prensibi kullanılarak yoğunluk ölçümü teyit edilmiştir. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan cihaz Resim 6.7’de görülmektedir.



Resim 6.7. Yoğunluk ölçümlerinde kullanılan dijital terazi

6.5. Isıl İşlemler

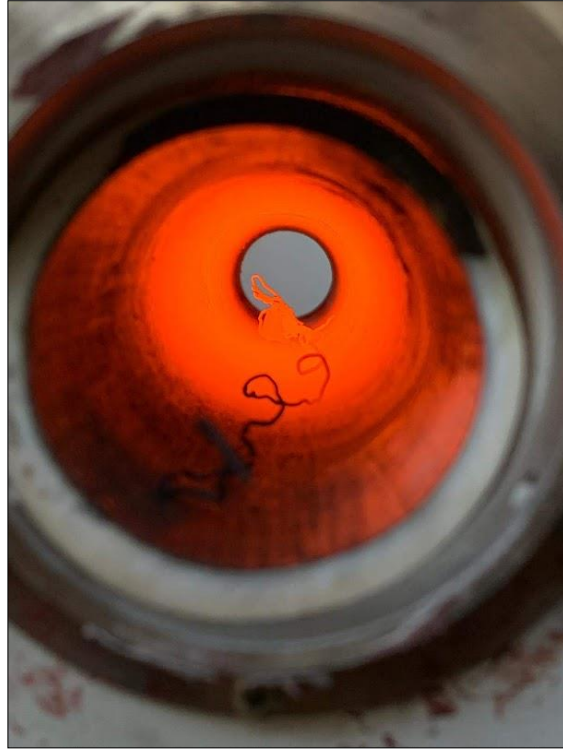
Sinterlenen numunelere uygulanan ısıtma işlemleri için, Resim 6.8’de görülen SFL (sc 1206 model) Protherm marka yatay yüksek sıcaklık fırını, tuz banyosu ve soğutma suyu kullanılmıştır.

Sinterlenen numuneler, daha önceden belirlenen sıcaklıkta (950 °C) yüksek sıcaklık fırınının homojen sıcaklık bölgesine seramik kayıkçık içerisinde yerleştirilmiştir. Tuz banyosu önceden belirlenen sıcaklığa (210, 350 ve 400 °C) getirilip, numuneler belirlenen belli bir süre sonunda (4 dk) fırından çıkarılarak, tuz banyosuna daldırılmıştır. Tuz banyosunda belli süre bekletilen (30, 60, 90, 180, 360 s) numuneler, bu işlemin ardından, su verme işlemleri

için, hızlı soğutma amacıyla oda sıcaklığındaki su içerisine daldırılmıştır. Atmosfer kontrollü önlemler, sinterleme işlemleri için alınan önlemler ile aynıdır.

Tuz banyosu olarak, %50 potasyum nitrat, %50 sodyum nitrat içeriğine sahip nötr tuz banyosu kullanılmıştır.

Sinterlenen numunelere yukarıda anlatılan sıralı işlem ile martemperleme ısıl işlemi uygulanmıştır. Tuz banyosu sıcaklığı ayrı ayrı 210, 350 ve 400 °C olan üç farklı sıcaklık değeri kullanılmış ve her bir numune 30, 60, 90, 180 ve 360 sn olmak üzere farklı sürelerde tuz banyosunda bekletilmiştir. Tuz banyosundan çıkarılan numuneler, oda sıcaklığında bulunan suda bekletilmiştir.



Resim 6.8. Isıl işlem ve martemperleme işlemi için kullanılan tuz banyosu düzeneği

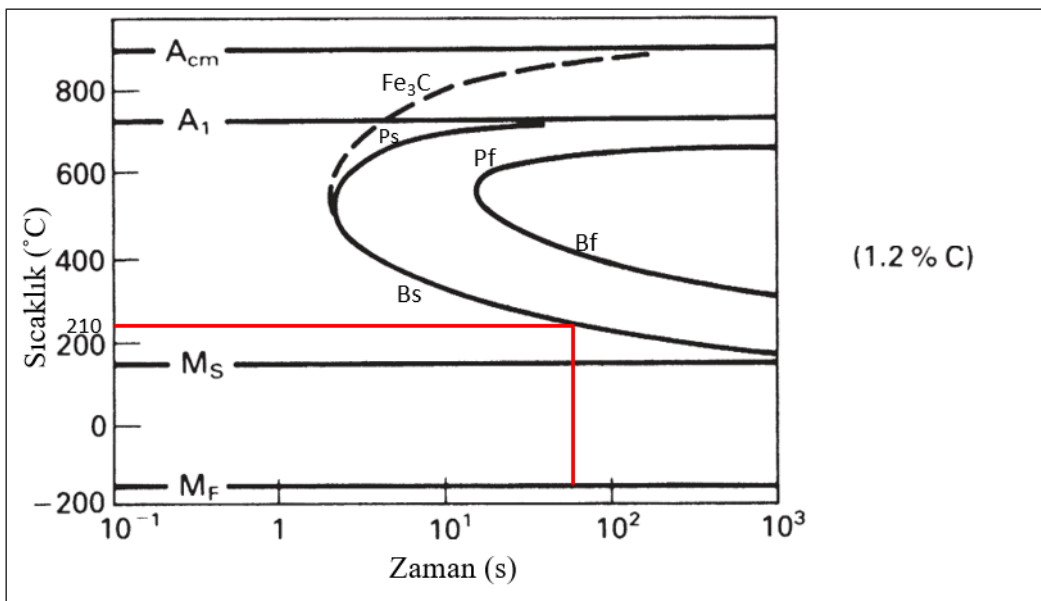
1200 °C’de 20 dk boyunca sinterlenen numuneler fırının homojen sıcaklık bölgesine yerleştirilip, yatay yüksek fırın sıcaklığı 950 °C’ye getirilerek 4 dk fırında bekletilerek östenitleme işlemi uygulanmıştır. Resim 6.8’de numunenin östenitleme işlemi yapılırken fırındaki görünümü yer almaktadır. Fırından çıkarılan numuneler, 210 °C’ye sahip nötr tuz banyosuna daldırılmıştır. Her bir numune, tuz banyosunda sırasıyla 30, 60, 90, 180, 360 sn

olmak üzere farklı sürelerde bekletilmiştir. Tuz banyosundan çıkarılan numunelere, bekleme yapılmaksızın oda sıcaklığındaki su verilmiştir.

Bir diğer sinterlenen numuneler, fırın $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de iken 4 dk fırının içerisinde östenitlenmiştir. Fırından çıkarılan numuneler bekletilmeden $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de olan tuz banyosuna daldırılmıştır. Numuneler, 30, 60, 90, 180 ve 360 sn olarak farklı sürelerde tuz banyosunda bekletilmiştir. Tuz banyosunun hemen ardından bekleme olmaksızın numunelere oda sıcaklığında olan su verilmiştir.

Bir diğer sinterlenen numuneler, fırın $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de iken 4 dk fırının içerisinde östenitlenmiştir. Fırından çıkarılan numuneler bekletilmeden sıcaklığı $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ olan tuz banyosuna daldırılmıştır. Numunelerin her biri 30, 60, 90, 180 ve 360 sn olarak farklı sürelerde tuz banyosunda bekletilmiştir. Tuz banyosunun hemen ardından bekleme olmaksızın numunelere oda sıcaklığında doğrudan su verilmiştir.

Literatürde yüksek karbonlu toz metal çelik için Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı bulunmamaktadır. Bu çalışmada yüksek karbonlu çelikler için literatürde yer alan ZSD diyagramı, yüksek karbonlu toz metal çelikler için oluşturulmaya çalışılmıştır. Şekil 6.2'de % 1,2 oranında karbon oranına sahip otektoid üstü çeliklere ait ZSD (TTT) diyagramı yer almaktadır. Martenzit başlama sıcaklığı $190\text{ }^{\circ}\text{C}$ olmakla birlikte, $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'de $\sim 80\text{ s}$ 'e kadar bekletme sürelerinde martenzit dönüşümü beklenmektedir.



Şekil 6.2. Ötektoid üstü çeliklerde (% 1.2 C) ZSD (TTT) diyagramı [96]

Bundan sonraki bölümlerde, ısıtma işlemi uygulanan numuneler Çizelge 6.2’de verilen kısaltmalara göre kodlanarak tanımlanmıştır.

Çizelge 6.2. Uygulanan işlemlere göre tanımlanan kısaltmalar

Uygulanan İşlem	Tanımlanan Kısaltma
210 °C tuz banyosunda 30 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M210-30
210 °C tuz banyosunda 60 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M210-60
210 °C tuz banyosunda 90 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M210-90
210 °C tuz banyosunda 180 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M210-180
210 °C tuz banyosunda 360 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M210-360
350 °C tuz banyosunda 30 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M350-30
350 °C tuz banyosunda 60 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M350-60
350 °C tuz banyosunda 90 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M350-90
350 °C tuz banyosunda 180 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M350-180
350 °C tuz banyosunda 360 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M350-360
400 °C tuz banyosunda 30 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M400-30
400 °C tuz banyosunda 60 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M400-60
400 °C tuz banyosunda 90 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M400-90
400 °C tuz banyosunda 180 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M400-180
400 °C tuz banyosunda 360 sn bekletildikten sonra su verilen numune	M400-360

6.6. Mikroyapı Analizleri

Isıl işlem uygulanan numunelerin mikroyapı özellikleri incelenmiştir. Numune yüzeyleri zımparalanıp, sonrasında parlatma işlemi uygulanmıştır. Resim 6.9’da zımparalama işleminin yapıldığı cihaz görülmektedir. Zımparalama işlemi için kalından inceye doğru sırasıyla, 120 ve 1200 gridlik zımparalar kullanılmıştır.

Zımparalama işlemi sonrasında numunelere önce 3µm’lik daha sonra 1 µm’lik elmas pasta ile parlatma işlemi yapılmıştır. Resim 6.10’da parlatma işlemi uygulaması görülmektedir.



Resim 6.9. Zımparalama işleminin yapıldığı cihaz



Resim 6.10. Parlatma işleminin uygulanması

Zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından numuneler, % 3’lük nital çözeltisi ile dağlanmıştır. Dağlama işlemi, numunelerin hazırlanmış çözelti içerisinde 10-15 sn arasında tutularak gerçekleştirilmiştir. İşlemlerin ardından numunelerin yüzeyleri yıkanıp alkolle kurutulmuştur.

Mikroyapı incelemelerinde G.Ü.T.F. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nde bulunan Resim 6.11'de görülen, JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. Resim 6.12'de ise Leica Microsystems marka optik mikroskop görülmektedir.



Resim 6.11. JEOL JSM-6060LV marka Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)



Resim 6.12. Leica Microsystems marka optik mikroskop

6.7. XRD Analizleri

Isıl işlem sonrası numunelere X-ışınları kırınımı analizi yapılmıştır. Bu analizler Gazi Üniversitesi Fotonik Uygulama ve Araştırma Merkezi'nde bulunan ve Resim 6.13 ve 6.14'de gösterilen cihaz yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Numuneler metalografik olarak cihaza uygun hale getirildikten sonra X-ışınları analizi uygulanmıştır.



Resim 6.13. XRD analizinde kullanılan Lynxeye XE markalı dedektör



Resim 6.14. XRD analizlerinde kullanılan D8 Advance markalı jeneratör ve analizde kullanılan tüm cihazların görüntüsü

6.8. Sertlik Ölçümleri

Numunelere uygulanan metalografi işlemlerinin ardından sertlik ölçümleri yapılmıştır. Farklı ısı işlemler uygulanan numunelerin sertlik değişimleri bu çalışma için önem arz etmektedir. Numunelerin sert faz olan martenzit fazından beynit fazına dönüşme süresinin belirlenebilmesi için sertlik değişiminin de bulunması gerekmektedir.

Sertlik ölçümleri Resim 6.15’de görülen, SHIMADZU marka sertlik ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Metot olarak Vickers, test skalası olarak HV1, yük olarak 9,8 N kullanılmıştır. Vickers sertlik yönteminde elmas kare piramit malzeme yüzeyine batırılır ve köşegen uzunluklarına göre hesaplama yapılır. Sertlik ölçümleri beş farklı yerden alınarak ortalama bir sertlik değeri belirlenmiştir.



Resim 6.15. SHIMADZU HVM2 marka sertlik ölçüm cihazı

6.9. Mekanik Özellikler

6.9.1. Aşınma deneyleri

ASTM G99-05 disk üzeri aşındırma test cihazı standardına uygun olarak üretilen aşınma test numuneleri disk üzerinde abrasif aşınma testine tabi tutulmuştur. Resim 6.16’da kuru ortam aşınma testinde kullanılan TRIBOMETER T10/20 cihazı gösterilmektedir. Aşındırıcı yüzey olarak kullanılan disk, sertliği 55 HRC olan Hardox 500 çeliğinden hazırlanmıştır. Aşındırma

testi öncesi ve sonrası numune ağırlıkları 0,1 mg hassasiyetinde SARTORIUS marka terazide yapılmıştır. Numunelerin kuru ortam aşınma testleri; 10N sabit yük altında, 1,00 m/s kayma hızında ve 500 – 1000 m kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma testi sonucunda numunelerin ortalama ağırlık kayıpları ölçülmüştür. Ayrıca sürtünme katsayısı, sürtünme kuvveti ve aşınma derinliği sistemin bağlı olduğu yazılım tarafından otomatik olarak kaydedilmiştir.



Resim 6.16. TRIBOMETER T10/20 kuru ortam aşınma test cihazı

Bununla birlikte Eşitlik 6.2’de verilen Archard prensibi [97] kullanılarak aşınma katsayıları hesaplanmıştır.

$$\frac{v}{s} = KN \quad (6.2)$$

V, temas eden yüzeyde oluşan hacim kaybı (m³), s, kayma mesafesi (m), K, spesifik aşınma katsayısı (m³/Nm) ve N, uygulanan normal yüküdür.

Aşınma testleri sonrasında aşınma mekanizmalarını anlamak ve yorumlamak amacıyla numunelerin aşınmış yüzeylerinin görüntülenmesi SEM ile yapılmıştır.

7. DENEYSEL SONUÇLAR

7.1. Yoğunluk Ölçümleri

Bu bölümde belirtilen deneysel yöntemlerle oda sıcaklığında tek etkili soğuk presleme yöntemi kullanılarak 700 MPa basınç altında şekillendirilen numunenin ham ve sinterleme sonrası çinko streat uzaklaştırıldığındaki yoğunlukları sırasıyla 6,9 ve 7,1 g.cm⁻³ olarak hesaplanmıştır.

Tüm numunelerde ısıtıl işlemler sonrası yoğunluk değerinde ciddi bir değişime rastlanmamıştır.

Yoğunluklarda kısmen bir değişim olsa da birbirlerine çok yakın değerler olup ihmal edilebilecek düzeydedir. Teorik yoğunluk değeri 7,8 g/cm³ olmakla birlikte üretilen numunelerde bu değere ulaşabilmek geleneksel toz metalurjisi yöntemiyle hemen hemen imkânsızdır. Genel olarak bakıldığında teorik yoğunluk değerinin altında bir yoğunluk değerine ulaşıldığı görülmektedir. Bunun nedeni olarak toz metalurjisi üretim yöntemlerinde numunelerde tek etkili soğuk kalıplamada toz taneleri arasında açık gözeneklerin sinterleme sırasında izole olması ile iç basınç direcinin artması nedeniyle küçülememesi veya tamamen kapanamamasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu gözenekler sinterleme yoğunluğunun, teorik yoğunluktan düşük olmasına neden olmaktadır. Sinterlenmiş numunenin yapısında bulunan boşluklar birim hacimde kütleyi düşürdüğü için yoğunluk değerini düşürmektedir.

Numunelerin presleme sonrası ham ve sinterleme sonrası yoğunlaşma oranı sırasıyla %88 ve %91 olarak belirlenmiştir. Soğuk kalıplamada basınç arttıkça metalik tozlar plastik deformasyona uğrar ve temas alanları artar. Bundan dolayı gözenek oranının daha da azalması beklenir. Böylece teorik olarak yoğunlaşma değerinin artması sağlanarak teorik yoğunluğa ulaşılacağı düşünülmektedir. Ancak kalıplama işleminde metalik tozların soğuk plastik deformasyon beraberinde deformasyon sertleşmesi de artmaktadır. Bu da tozlar arasında gözeneklerin kapanıp yoğunluğun artırılmasını güçleştirmektedir.

Toz metalurjisi ile üretilen malzemelerde, gözeneklere bağlı olarak hacim genişlemesi, yoğunluk değerlerini de düşürebilmektedir. Ancak sıcak izostatik presleme ya da lazer sinterleme teknikleri ile yüksek yoğunlukta toz metal malzeme üretilebilmektedir. Bazı

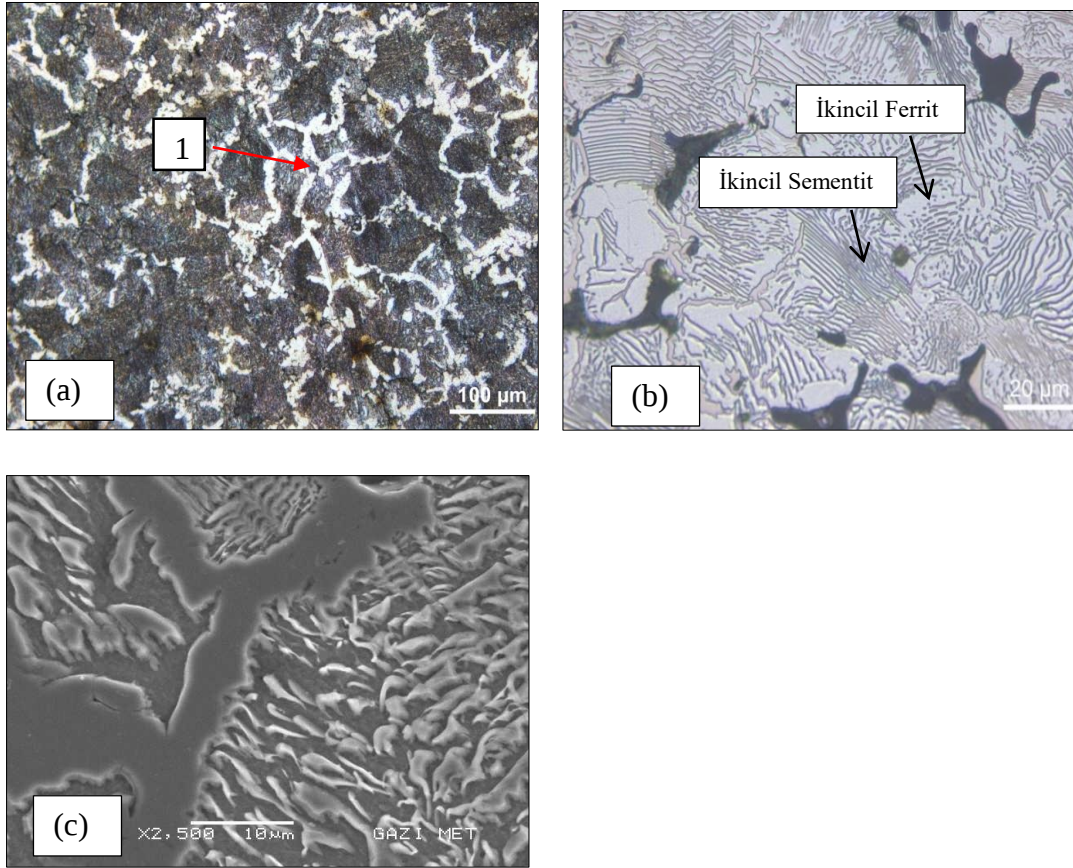
uygulamalarda ise ılık presleme basıncının artırılması ile yoğunluğun fazla olması da sağlanabilir. Ancak bu durumda numune plastik deformasyona uğrayarak şekil değiştirebilir ve bunun sonucunda tozlar arasında mekanik kilitleme ile bir mekanik bağ meydana gelebilmektedir.

7.2. Mikroyapı Analizleri

Bu bölümde, %1,5 C oranına sahip toz metal çeliklere 1200 °C’de 20 dk sinterleme işlemleri sonrası, 950 °C’de 4 dk östenitlendikten sonra, % 50 NaNO₃ ve % 50 KNO₃ içeriğine sahip olan nötr tuz banyosunda farklı sıcaklık ve sürelerde bekletip oda sıcaklığında doğrudan su verilerek martemperleme uygulanan ısıt işlemler sonucunda oluşan faz dönüşümlerine bağlı olarak mikroyapı analizleri sunulmuştur.

Martemperleme ısıt işlemleri uygulanan numunelerin başlangıç mikroyapısı olan sinterlenmiş yüksek karbonlu toz metal çeliğin mikroyapısı Resim 7.1 (a – c)’de verilmiştir. Sinterlenmiş numunenin mikroyapısında tipik ötektoid üstü karbon bileşiminden dolayı belirgin bir şekilde birincil sementit ve yoğun perlit kolonileri birlikte bulunmaktadır. Resim 7.1 (a)’da 1 numaralı bölge ötektoid öncesi (birincil) sementit fazını ve perlit kolonilerini kuşatmış allotromorf morfolojisini göstermektedir. Resim 7.1 (b)’de perlitik yapıyı göstermekte olup perlit, ötektoid sonrası (ikincil) sementit ferrit fazının birleşiminden oluşan bir yapıdır. Ferrit fazı, perlit kolonisinde bulunan sementite göre oldukça düşük sertliğe sahip olmasına rağmen yüksek karbonlu ötektoid üstü çeliklerin süneklik seviyeleri, birincil sementit ağları ve lamelli ikincil sementit fazlarından dolayı oldukça kısıtlıdır.

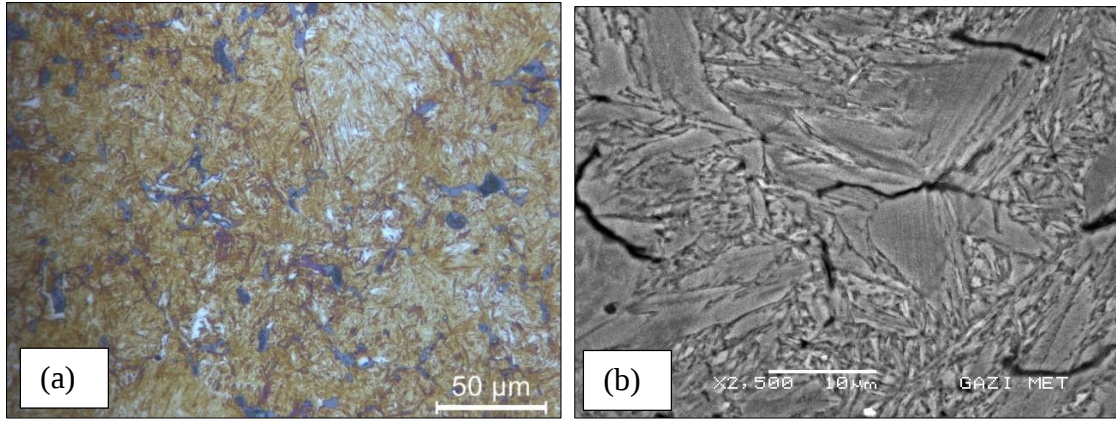
Resim 7.1 (c)’de görüldüğü gibi ayrıntılı SEM mikroyapısı birincil sementit ve perlit içerisindeki ikincil sementit ve ferrit fazlarının aralarındaki uyumu göstermektedir. Bu mikroyapıdan dikkati çeken durum, allotromorf birincil sementit ile idiomorf ikincil sementitler arasında bir uyumun söz konusu olmasıdır. Bu durumu açıklayabilmek için TEM incelemesi ile SAD paternleri analizlerine ihtiyaç vardır.



Resim 7.1. Sinterlenmiş numunenin a) 200X, b) 500X büyütme oranlı optik, c) 2500X büyütme oranlı SEM mikroyapı görüntüleri

Resim 7.1’de mikroyapıları verilmiş % 1,5 karbon oranına sahip toz metal çelik numunelere martemperleme ısı işlemleri ilk defa bu çalışmada uygulanmıştır. Sinterleme sonrası östenitlenen numuneler, üç farklı sıcaklığa sahip nötr tuz banyosunda farklı sürelerde izotermal olarak bekletilmiştir. İşlemin ardından numunelerde dönüşüm reaksiyonlarının kesilmesi amacıyla hızla oda sıcaklığında su verme işlemi uygulanmıştır.

Martemperleme ısı işlemleri için seçilen farklı bekletme sürelerine bağlı olarak üretilen mikroyapıları, geleneksel doğrudan su verme mikroyapıları ile karşılaştırılmıştır. Resim 7.2 (a –b)’de verilen mikroyapının östenitleme işleminin ardından oda sıcaklığına doğrudan su verme sonunda numunenin çoğunlukla plaka tipi martenzit fazında olduğu görülmektedir.



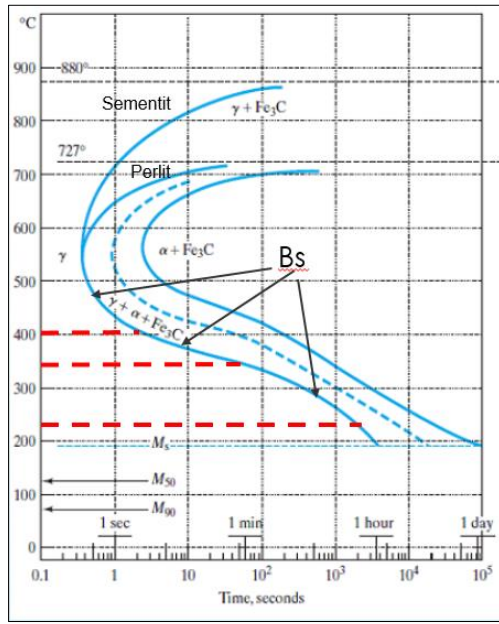
Resim 7.2. Östenitleme işleminin ardından doğrudan su verilen numunenin martensitik a) optik, b) SEM mikroyapısı

Östenit içerisinde çözülmüş olan karbon atomları hızlı soğutma yapıldığında difüzyon için zaman bulamazlar ve yapıdan ayrılamazlar. Bunun sonucunda östenit yüzey merkezli kübik yapıdan karbonla aşırı doymuş hacim merkezli tetragonal yapıya dönüşür. Bu yapıya martenzit denir. İğne biçimindeki taneler martenzit fazını, beyaz bölgeler ise martenzite dönüşemeyen kalıntı östenitleri göstermektedir [98].

Östenitik yapıya yavaş soğuma işlemi uygulanması halinde, öncelikle sementit lamel oluşumu ardından sıcaklık düşmeye devam ettikçe perlit yapısının oluşması beklenmektedir. Bunun sonucunda perlit ve sementitin bir arada olduğu bir yapı görülecektir. Bu deneyde ise, hızlı soğutma uygulanarak östenitin hızlı soğuması ile martenzit dönüşümü gerçekleşmiştir. Martenzit fazı, östenit fazının difüzyonsuz gerçekleşen kristalografik katı faz dönüşümleridir. Hızlı soğutma esnasında reaksiyon hızlı olduğu için faz içindeki karbon atomları difüzyon için zaman bulamamaktadır.

Resim 7.3 (a – c)’ de M210-30, M350-30, M400-30 numunelerinin optik ve SEM mikroyapısı görülmektedir. Optik mikroyapı görüntülerinden tam olarak anlaşılamayan mikro oluşumları detaylı görebilmek için SEM incelemesi de yapılmıştır. Optik mikroyapıların anlaşılıp yorumlanabilmesi için Şekil 7.1’de örnek olarak gösterilen bir ötektoid üstü ZSD (TTT) diyagramı verilmiştir. Bu çalışmada, martemperleme ısı işlemlerin uygulandığı sıcaklıklar (210, 350, 400 °C) Şekil 7.1’de yer alan diyagram üzerinde kırmızı kesikli çizgilerle işaretlenmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi, düşük martemperleme sıcaklığında alt beynit dönüşüm zamanı (Bs) daha uzun iken (martemperleme ısı işleminde Ms sıcaklığının üzerinde Bs zamanı başlamadan su verilerek faz dönüşümü kesilmeli ve

martensit veya oto-temperlenmiş martensit fazının üretilmesi gerekmektedir), daha yüksek martemperleme sıcaklığında Bs dönüşüm zamanının azaldığı Şekil 7.1'den açıkça görülebilir. Genel itibariyle tüm numunelerde geleneksel toz metalurjisi malzeme üretim yöntemlerinde gerçekleşen iç kapalı gözenekler (izole) mevcuttur. Ferrit ve sementit fazlarının hızlı soğuma etkisi ile martenzit fazına geçtiği görülmektedir. Yüksek karbonlu çeliklerde martenzite dönüşemeyen karbon miktarı fazla olduğu için buna paralel olarak kalıntı östenit miktarıda fazla olmaktadır. Mikroyapılara bakıldığında, tuz banyosu sıcaklığı arttıkça martenzit oluşumuna geçişin daha net olduğu görülmektedir.

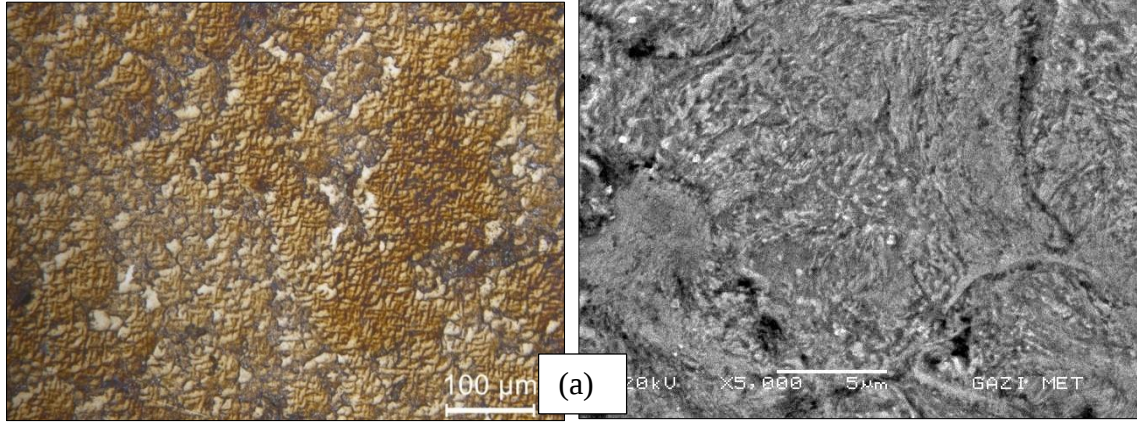


Şekil 7.1. Ötektoid üstü sade karbonlu çeliğin ZSD (TTT) diyagramı [99]

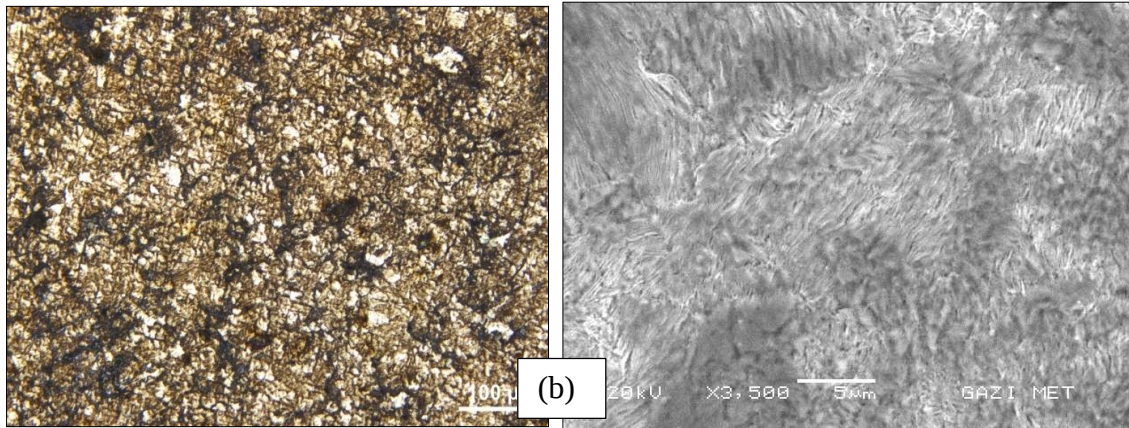
Resim 7.3 (a)'da M210-30 numunede temperlenmiş martenzit fazına benzer yapılar görülmektedir. Karbon miktarı arttıkça martenzit dönüşüm sıcaklıkları düşmektedir. Ayrıca yapıda kalıntı östenitlerinde bulunduğu düşünülmektedir.

Resim 7.3 (b)'de M350-30 numunede alt beynit yapıları ve blok şeklinde martenzit yapıları görülmektedir. Sementitler oldukça belirgin ve sayıca fazladır. Optik mikroskop görüntüsüne bakıldığında beyaz bölgelerin kalıntı östenit olduğu düşünülmektedir. SEM mikroyapısına bakıldığında perlitik dönüşümün başladığı ve beynit yapılarının bir arada bulunduğu görülmektedir.

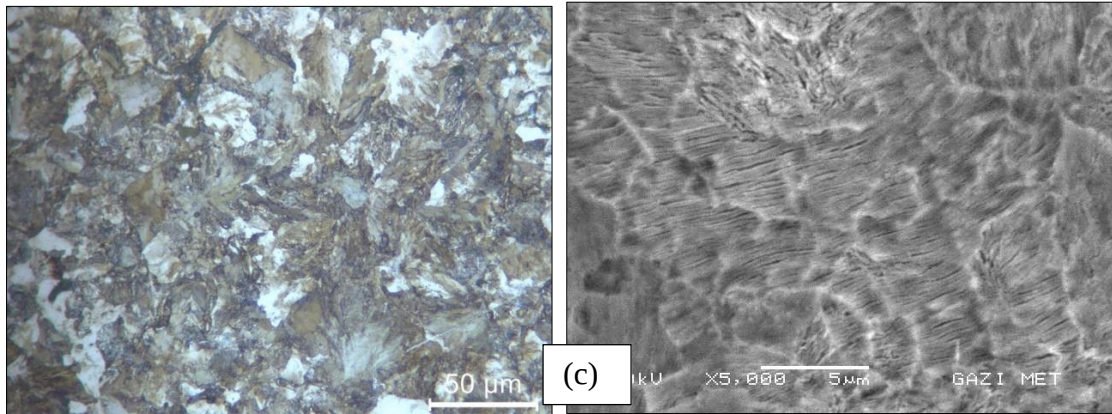
Resim 7.3 (c)'de M400-30 numunede optik mikroyapısında yelpaze şeklinde üst beynit oluşumları görülmektedir. SEM mikroyapı görüntüsünde ince perlitle beynit dönüşümüne başladığı düşünülmektedir.



Resim 7.3. a) M210-30 numune mikroyapı görüntüsü



Resim 7.3. b) M350-30 numune mikroyapı görüntüsü



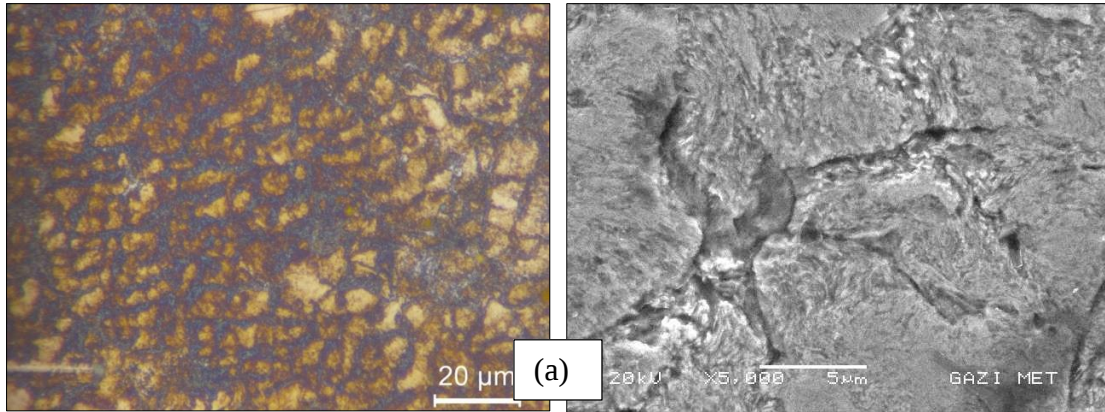
Resim 7.3. c) M400-30 numune mikroyapı görüntüsü

Resim 7.4 (a – c)’ de M210-60, M350-60, M400-60 numunelerinin optik ve SEM mikroyapısı görülmektedir. 210 °C, 350 °C ve 400 °C’de tuz banyosu sıcaklığında 60 sn bekletilen numunelerde soğuma süresi, tuz banyosunda 30 sn bekletilen numunelere göre daha fazladır.

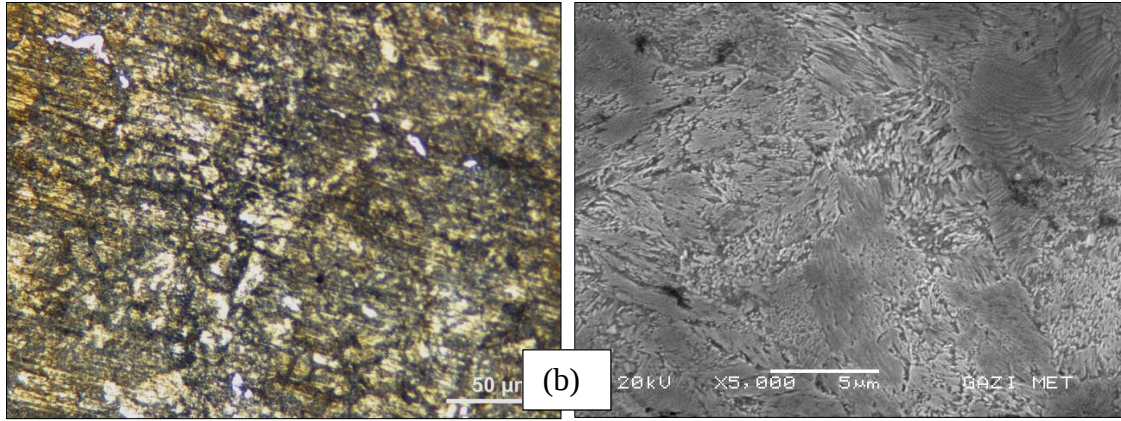
Resim 7.4 (a)’da M210-60 numunedeki karbür miktarı, M210-30 numunesine göre daha azdır. Beynit oluşumunun başlamadığı ve aşırı dağlanmadan kaynaklı kalıntı östenitlerin olabileceği düşünülmektedir. Bundan dolayı, numunenin sertlik değeri düşebilmektedir. Sementitlerin allotromorf biçimde çökmesine bağlı olarak tuz banyosuna daldırma süresi önem kazanmaktadır.

Resim 7.4 (b)’de M350-60 numunesinin mikroyapısına bakıldığında beynit dönüşümünün tamamlanmış olduğu düşünülmektedir. Aynı anda beynit, martensit ve kalıntı östenit varlığından söz edilebilir.

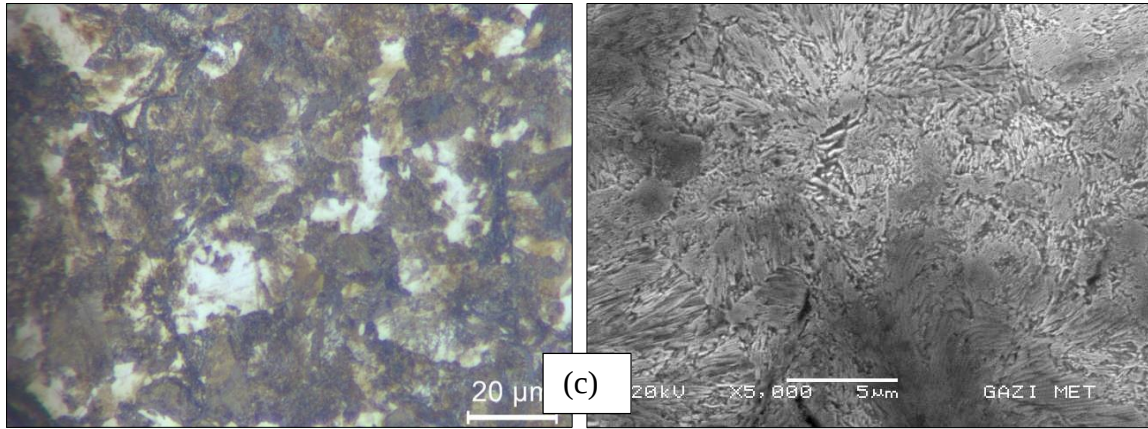
Resim 7.4 (c)’de M400-60 numunesinde tam olarak martenzit olmadığı ve M350-60 numunesine göre daha az martenzit yapının yer aldığı düşünülmektedir.



Resim 7.4. a) M210-60 numune mikroyapı görüntüsü



Resim 7.4. b) M350-60 numune mikroyapı görüntüsü



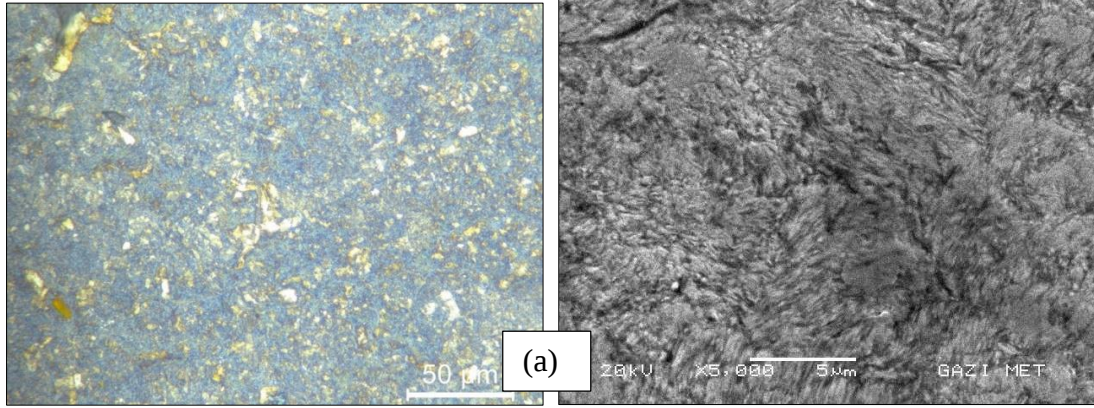
Resim 7.4. c) M400-60 numune mikroyapı görüntüsü

Resim 7.5 (a – c)’ de M210-90, M350-90, M400-90 numunelerinin optik ve SEM mikroyapısı görülmektedir. Tuz banyosunda 90 sn bekletilen numunelerin soğuma hızı 30 ve 60 sn bekletilen numunelere göre yavaş olduğu için yapıda beynite dönüşümün başladığı düşünülmektedir. Beynitik yapı, östenitin dönüşüm sırasında ferrit fazının sementit içinde iğnemsiz veya bağımsız küçük plakacıklar şeklinde oluşmasıdır. Yapıda görülen sementit ve ferrit fazının martenzit ve bir miktar beynitik yapıyı oluşturduğu savunulabilir.

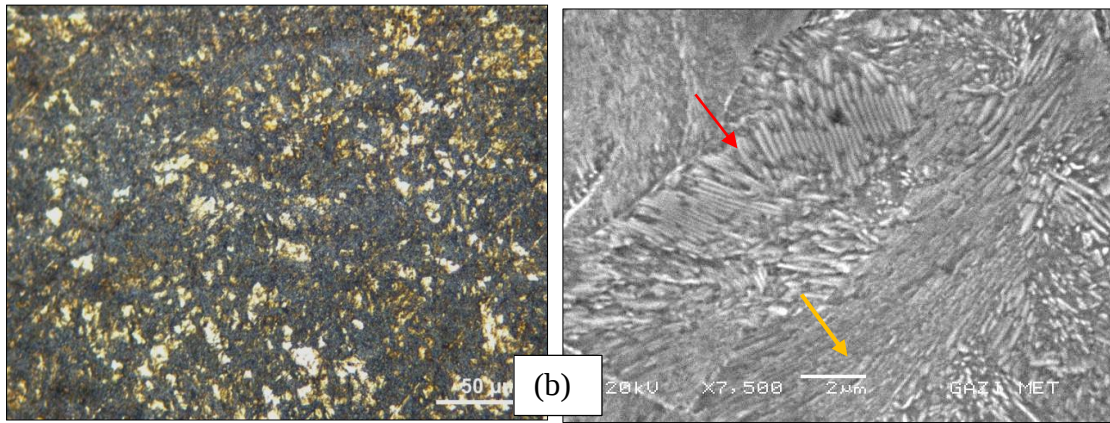
Resim 7.5 (a)’da M210-90’da beynitik yapılar az da olsa görülmeye başlanmıştır.

Resim 7.5 (b)’de M350-90 numunede, beynit ve perlit yapıları bir arada görülmektedir. Kırmızı ok ile gösterilen perlit oluşum miktarı, sarı ok ile gösterilen beynit oluşum miktarına göre daha azdır.

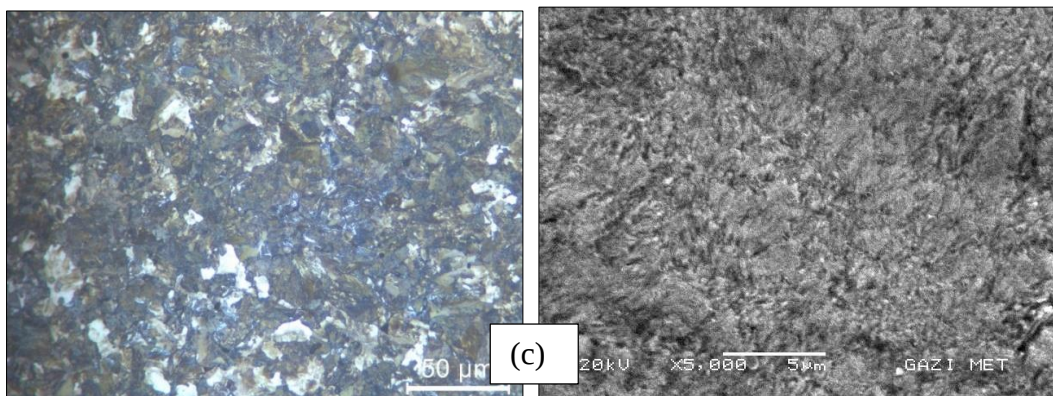
Resim 7.5 (c)'de M400-90 numunede, tam beynit oluşumu gerçekleşmiş ve belirgin beynitik yapılar görülmektedir.



Resim 7.5. a) M210-90 numune mikroyapı görüntüsü



Resim 7.5. b) M350-90 numune mikroyapı görüntüsü



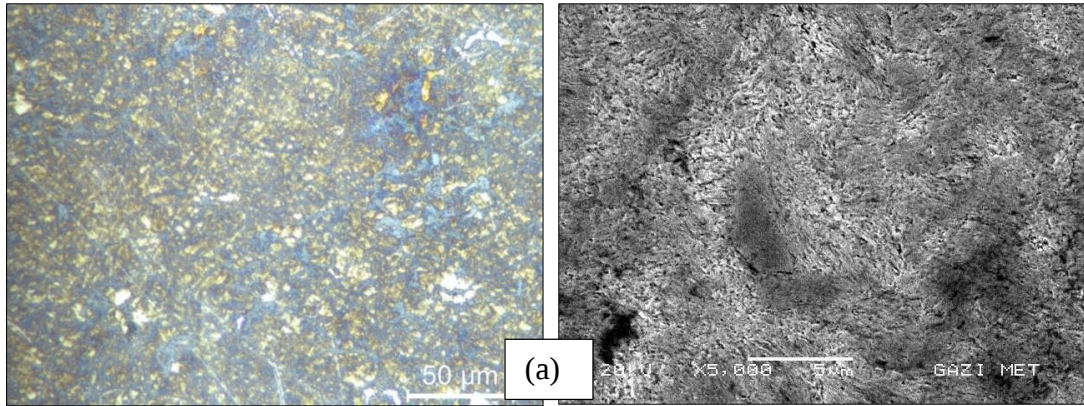
Resim 7.5. c) M400-90 numune mikroyapı görüntüsü

Resim 7.6 (a – c)’ de M210-180, M350-180, M400-180 numunelerinin mikroyapısı görülmektedir. Tuz banyosunda 180 saniye bekletilen numunelerde gözenekli yapılar görülmektedir.

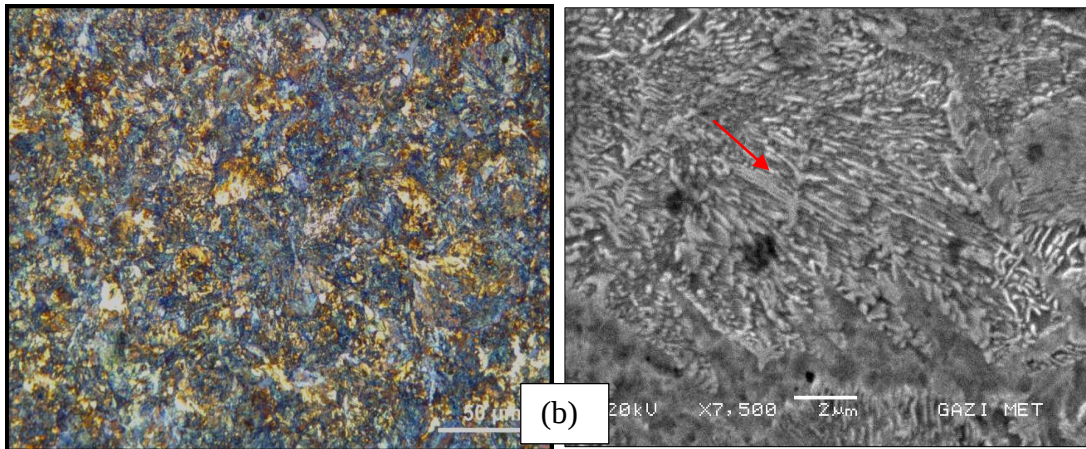
Resim 7.6 (a)’da M210-180 numunede östemperleme ısısal işlemine bağlı olarak beynitik yapılar görülmeye başlanmıştır. Dolayısıyla numunenin tokluğu artmıştır.

Resim 7.6 (b)’de M350-180’de kırmızı ok ile gösterilen sementit lamellerinin çökeldikten sonra kalınlaştığı görülmektedir. Üst beynit ve perlit yapısı bir arada bulunmaktadır.

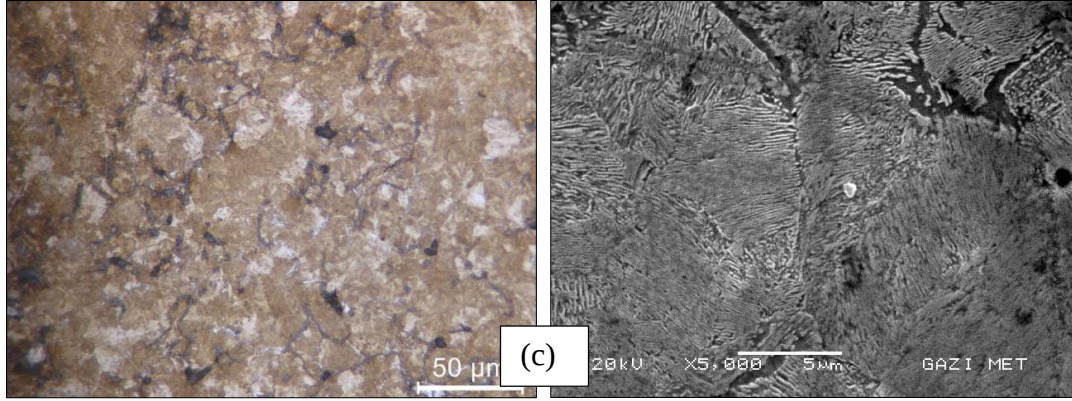
Resim 7.6 (c)’de M400-180 numunede, üst beynit yapıları görülmüştür. Ferrit fazı içinde lamelli olmayan sementit iğnemi yapılar şeklinde oluşmuştur. Ayrıca kalıntı östenitlerin bulunduğu ve yapıda martenzit ve beynitik yapının bir arada bulunduğu gözlemlenmektedir.



Resim 7.6. a) M210-180 numune mikroyapı görüntüsü



Resim 7.6. b) M350-180 numune mikroyapı görüntüsü



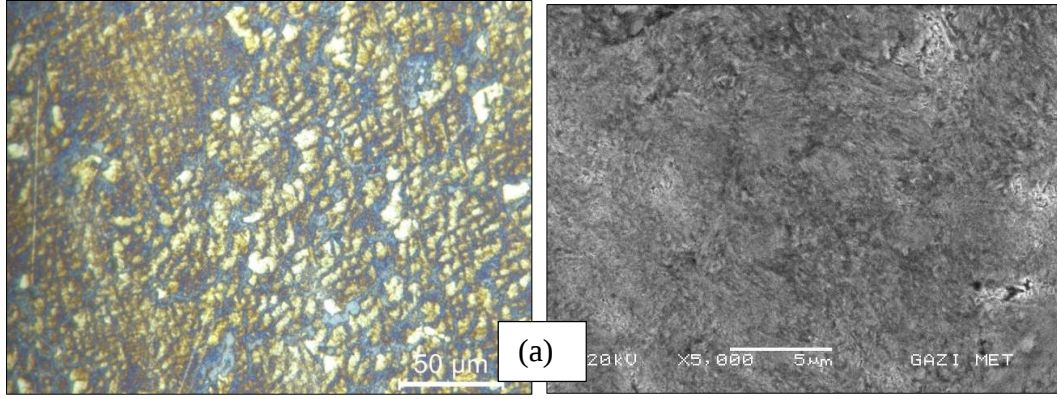
Resim 7.6. c) M400-180 numune mikroyapı görüntüsü

Resim 7.7 (a – c)’ de M210-360, M350-360, M400-360 numunelerinin mikroyapısı görülmektedir. Şekil 7.1’deki Zaman – Sıcaklık – Dönüşüm (ZSD; TTT) diyagramına göre 400 °C sıcaklığa sahip tuz banyosunda bekletilen numunenin, beynit bölgesine geçme süresi 210 °C ve 350 °C sıcaklığa sahip tuz banyosundan daha kısadır. Başka bir deyişle, diyagrama göre yorum yapıldığında M400-360 numunede oluşan beynitik yapının M350-360 numuneye göre daha fazla olduğu sonucuna varılabilir. Ayrıca sertlik değerleri göz önüne alınırsa, beynit fazının martenzit fazından daha yumuşak olduğu bilinmekte olup M400-360 numunesinin büyük çoğunluğunun beynitik yapıya dönüştüğü düşünülebilir.

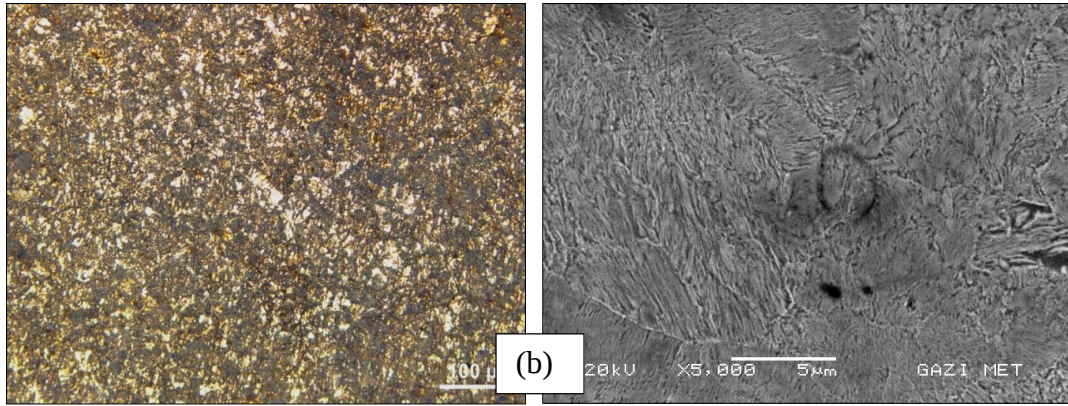
Resim 7.7 (a)’da M210-360 numunede bekletilme süresi arttıkça az miktarda beynitik yapılar görülmektedir.

Resim 7.7 (b)’de M350-360 numunede, numunelerin tuz banyosunda bekletilme süresi arttıkça sementit lamellerinin kalınlaştığı görülmektedir.

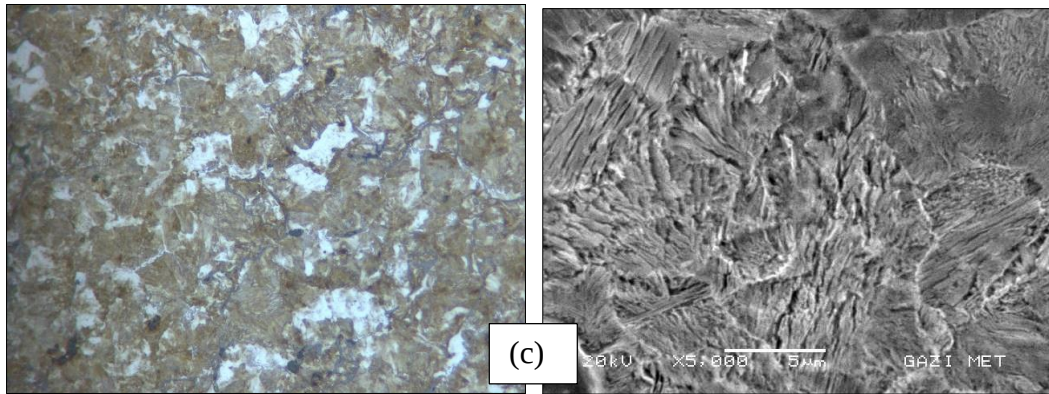
Resim 7.7 (c)’de M400-360 numunede, M350-360 numunesine göre daha çok miktarda üst beynit yapılarının oluştuğu görülmektedir. Tipik karakteristik üst beynit yapılarının oluştuğu görülmektedir.



Resim 7.7. a) M210-360 numune mikroyapı görüntüsü



Resim 7.7. b) M350-360 numune mikroyapı görüntüsü



Resim 7.7. c) M400-360 numune mikroyapı görüntüsü

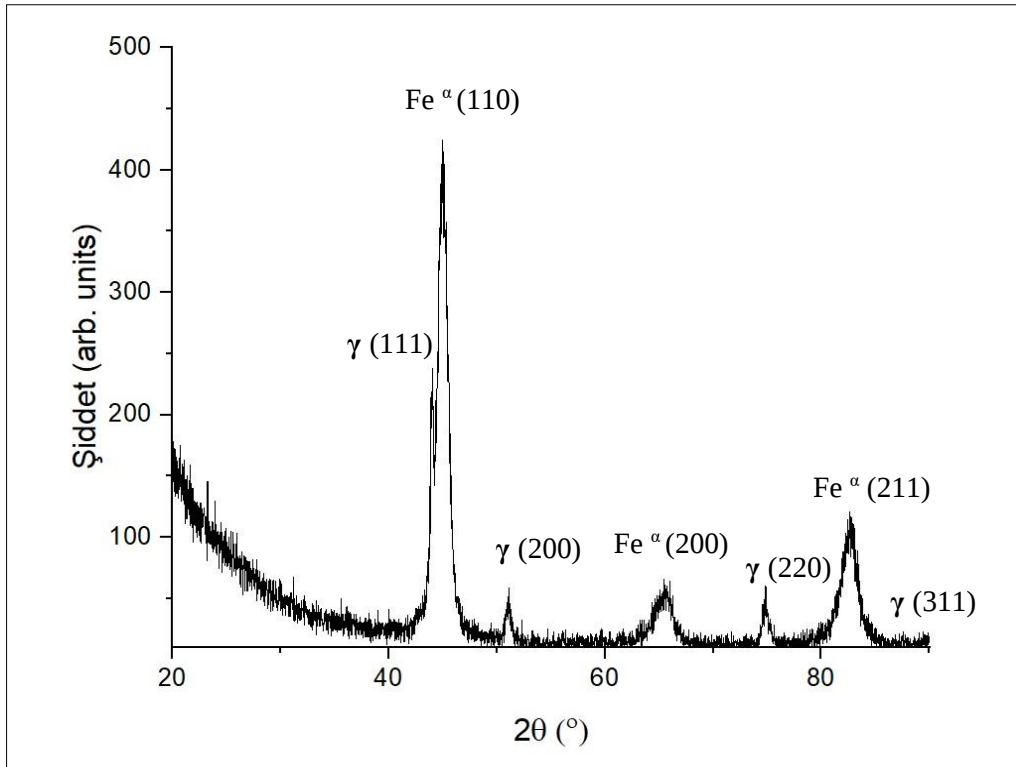
7.3. XRD Sonuçları

Isıl işlem sonrası hazırlanan numuneler, metalografik olarak belirli işlemlerden geçirildikten sonra numunelere X-ışınları kırınım analiz metodu uygulanmıştır. XRD analizleri ile numunelerdeki fazların dağılımı ve uygulanan ısıtıl işlem sonrasında numune yapısında

oluşan değişimler incelenmiştir. Yapılan bu çalışmada, farklı parametreler uygulanarak martemperleme ısı işlemi uygulanan on adet numune değerlendirilmiştir.

XRD incelemelerinde numunelere uygulanan ısı işlemler sonrasında yapılarındaki değişimi, kalıntı östenit fazını tespit etmek, Fe_3C (sementit) oluşumu ve olası geçiş karbürleri analiz etmek amaçlanmıştır.

Şekil 7.2’de sinterlendikten sonra $950\text{ }^\circ\text{C}$ sıcaklığa sahip olan fırında 4 dk östenitleme işlemi gerçekleştirilen ve sonrasında doğrudan su verilen numunenin XRD analizi görülmektedir. Östenitleme sıcaklığından sonra oda sıcaklığına su verilip, ani olarak soğutularak elde edilen martenzit pikleri görülmektedir. Yapıda martenzite dönüşemeyen kalıntı östenit yapısına ait piklerde görülmektedir.

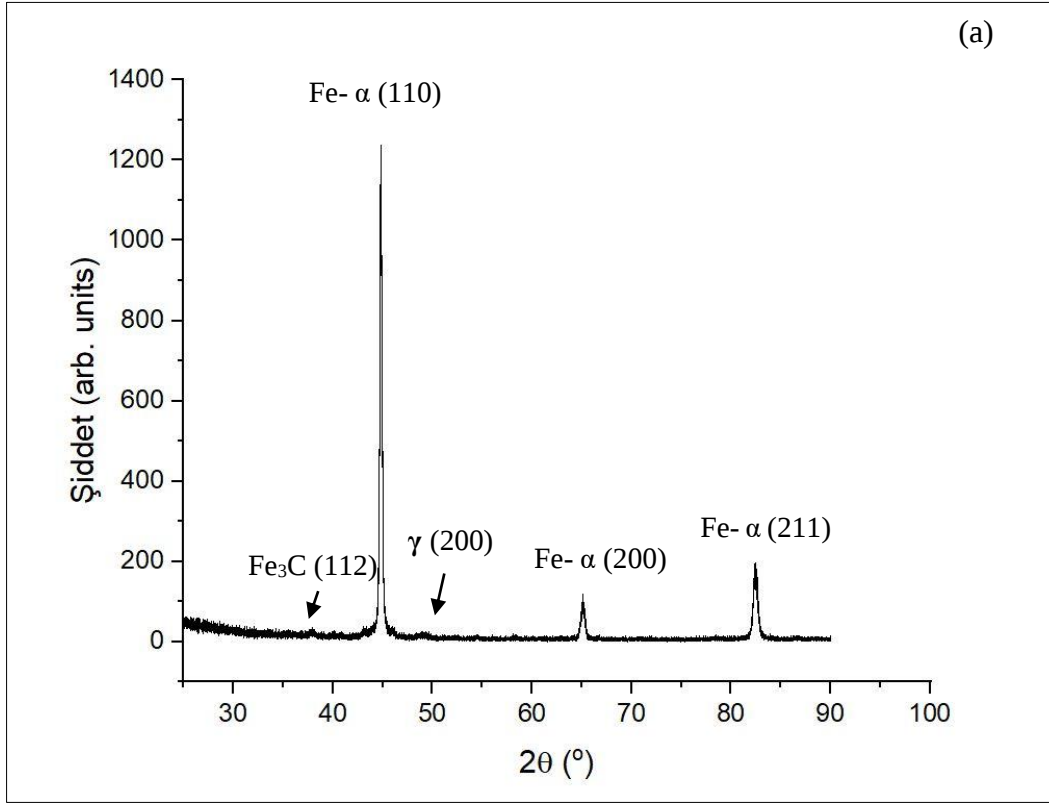


Şekil 7.2. $950\text{ }^\circ\text{C}$ fırında 4 dk östenitlendikten sonra doğrudan su verilen numunenin X-Rd grafiği

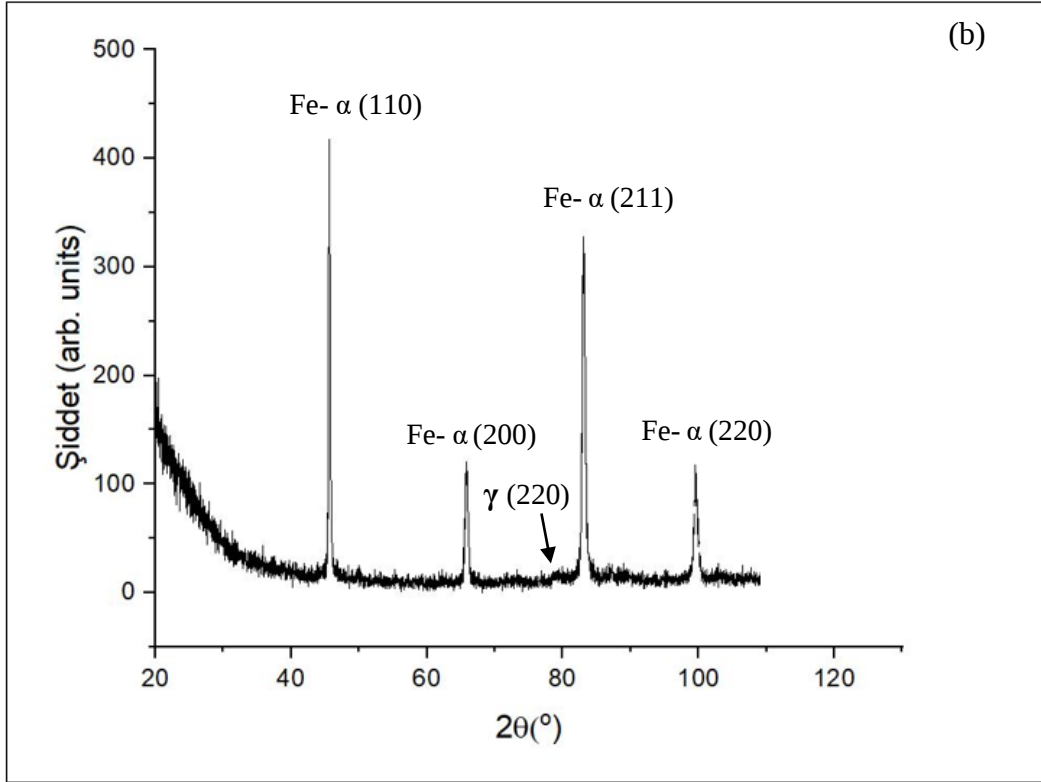
Şekil 7.3 (a – b)’de M350-30 ve M400-30 numunelerin kristalografik yapılarının analizi için XRD pikleri verilmiştir.

Şekil 7.3 (a)'da M350-30 numunesinde yapıda belirgin üst beyrit oluşumundan dolayı ferrit ve lamelli olmayan sementit pikleri bulunmaktadır.

Şekil 7.3 (b)'de M400-30 numunesinde yapıda martenzit pikleri görülmektedir. Düşük şiddette kalıntı östenit piki bulunmaktadır.



Şekil 7.3. a) M350-30 numunenin X-Rd grafiği



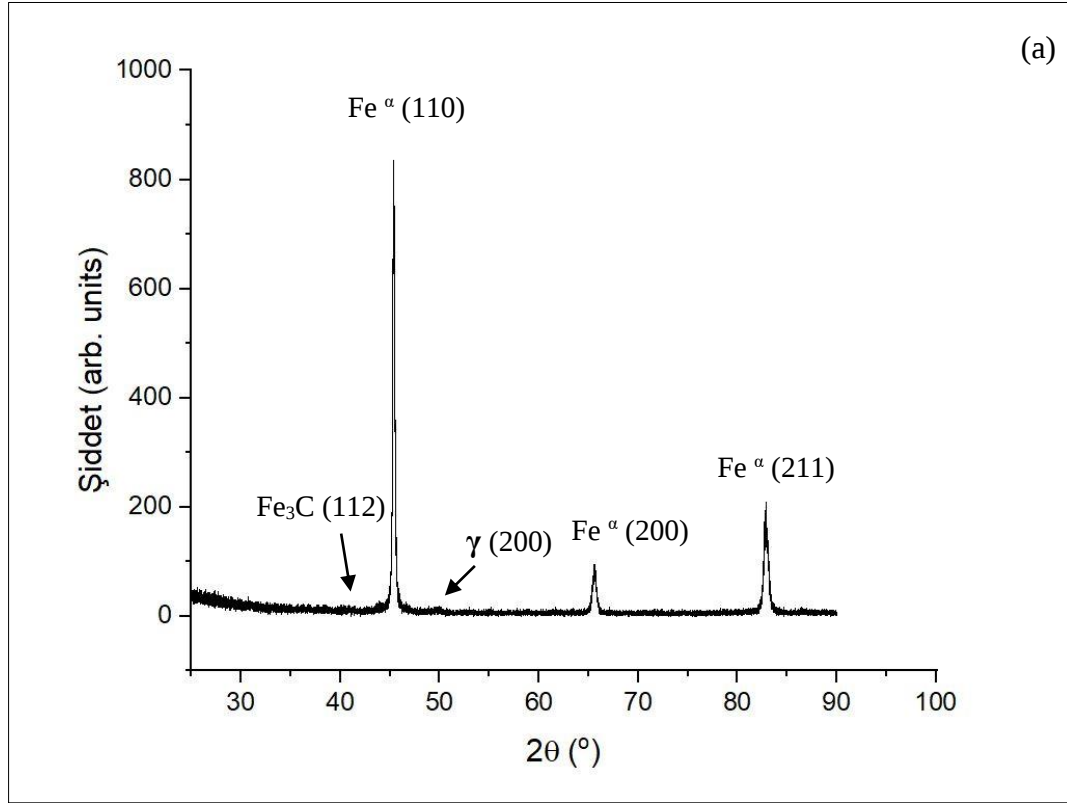
Şekil 7.3. b) M400-30 numunenin X-Rd grafiği

Şekil 7.4 (a – c)’de M210-60, M350-60 ve M400-60 numunelerin kristalografik yapılarının analizi için XRD pikleri verilmiştir.

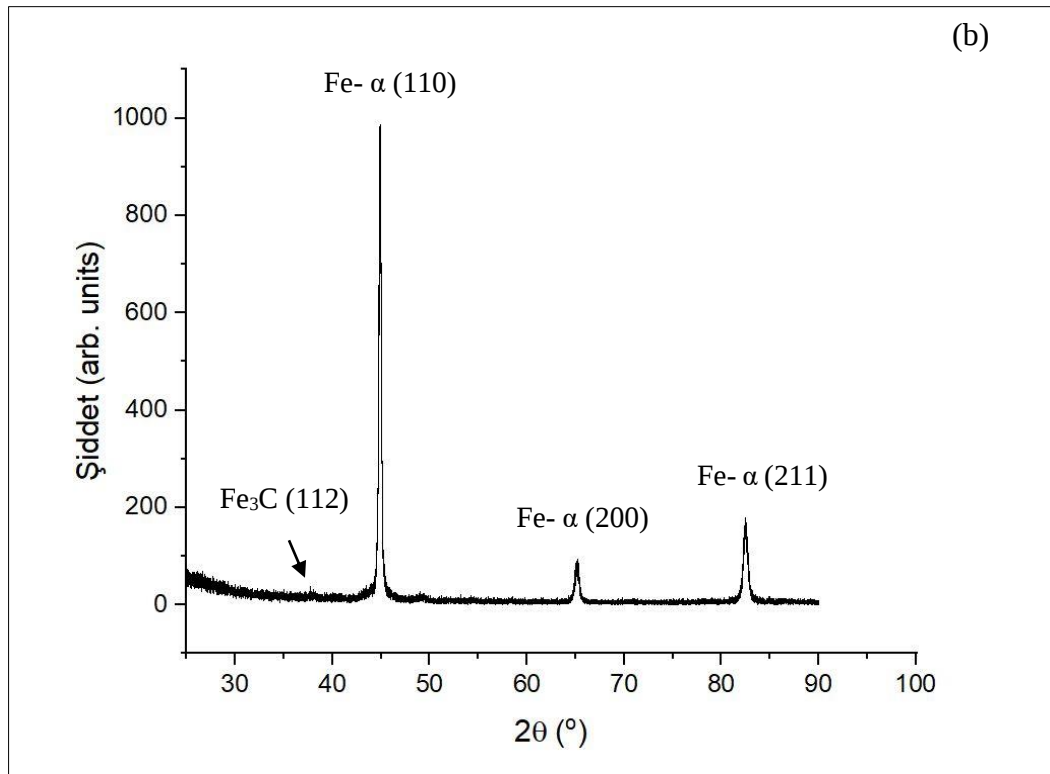
Şekil 7.4 (a)’da M210-60 numune yapısında martenzit pikleri bulunmaktadır ayrıca az miktarda da olsa kalıntı östenit varlığından söz edilebilir. Düşük şiddetli gürültü şeklinde karbür pikleri (Fe_3C) görülmektedir.

Şekil 7.4 (b)’de M350-60 numune yapısında belirgin beynit dönüşümü fazla, perlit dönüşümü daha az miktardadır. Karbür çökeltisi pikleri görülmektedir.

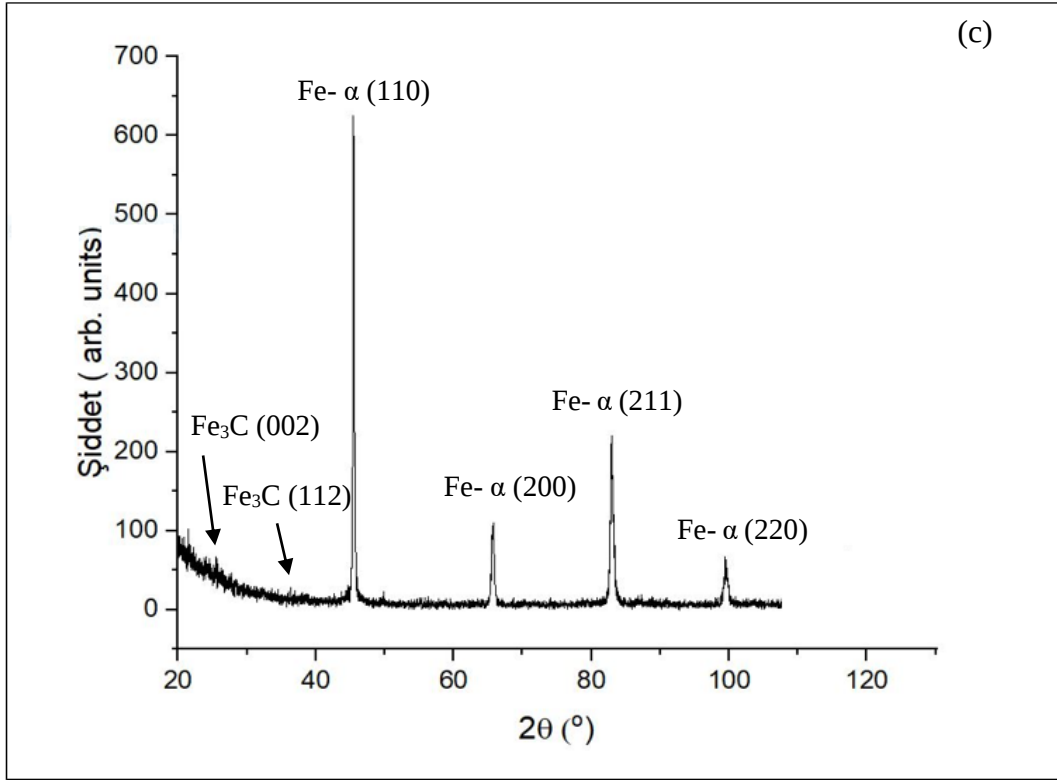
Şekil 7.4 (c)’de M400-60 numune yapısında martenzit pikleri ve sementit pikleri görülmektedir.



Şekil 7.4. a) M210-60 numunenin X-Rd grafiği



Şekil 7.4. b) M350-60 numunenin X-Rd grafiği

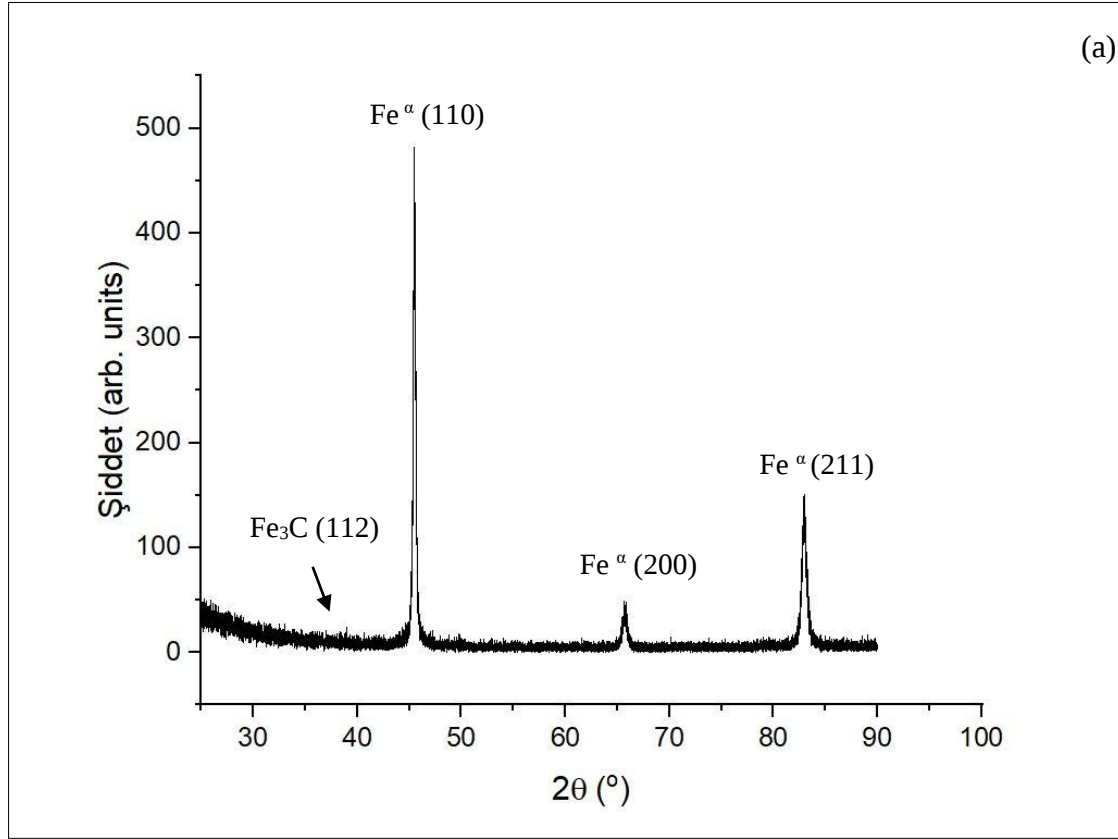


Şekil 7.4. c) M400-60 numunenin X-Rd grafiği

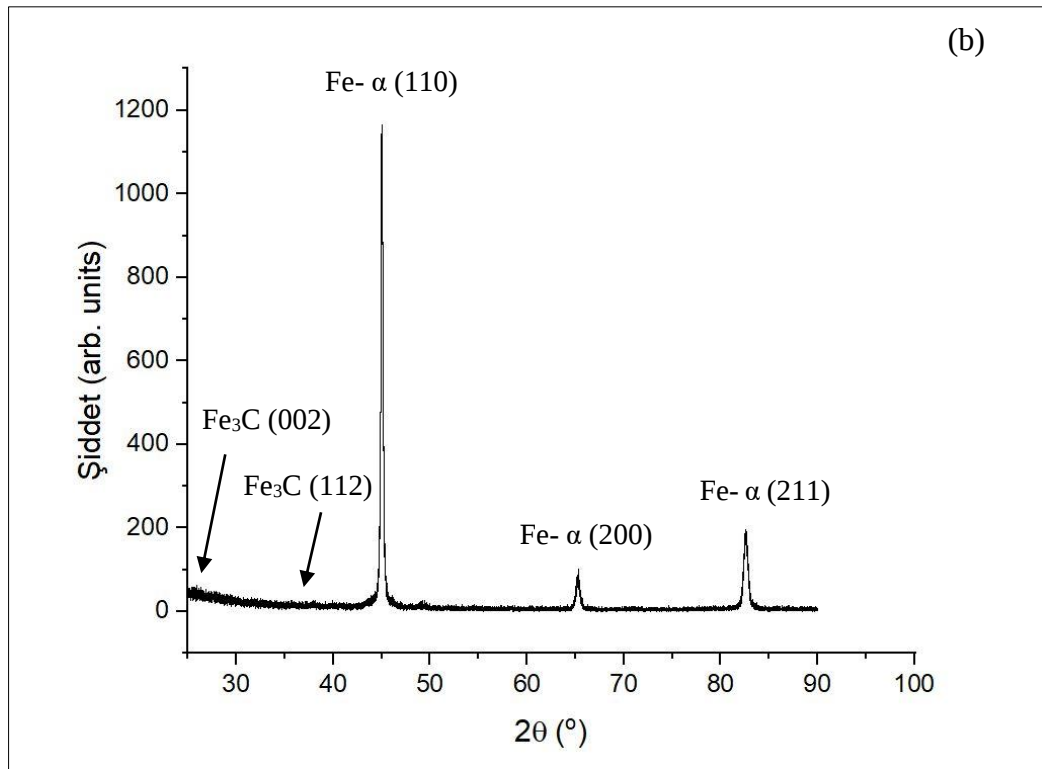
Şekil 7.5 (a – c)’de M210-90, M350-90 numunelerin kristalografik yapılarının analizi için XRD pikleri verilmiştir.

Şekil 7.5 (a)’da M210-90 numune yapısında martenzit pikleri bulunmaktadır ayrıca azda olsa düşük şiddetli karbür pikleri (Fe_3C) görülmektedir.

Şekil 7.5 (b)’de M350-90 numune yapısında sementit karbür piklerinin fazla sayıda olduğu görülmektedir.

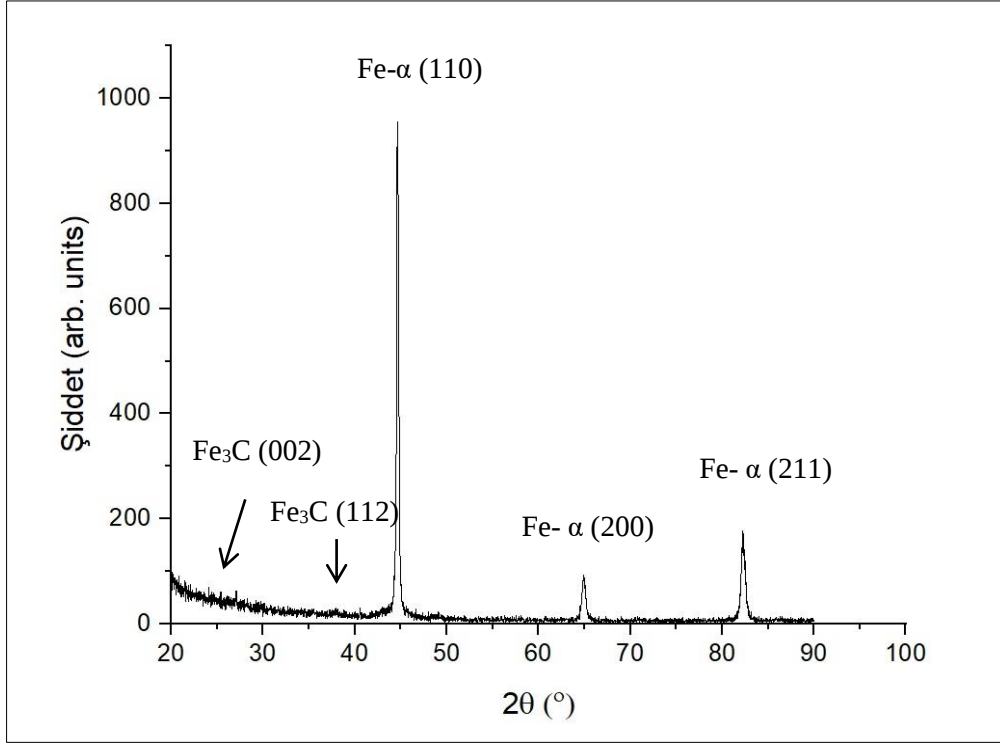


Şekil 7.5. a) M210-90 numunenin X-Rd grafiği



Şekil 7.5. b) M350-90 numunenin X-Rd grafiği

Şekil 7.6’da M400-180 numune yapısında ferrit pikleri ve beyniti oluşturan lamelli olmayan sementit pikleri görülmektedir.

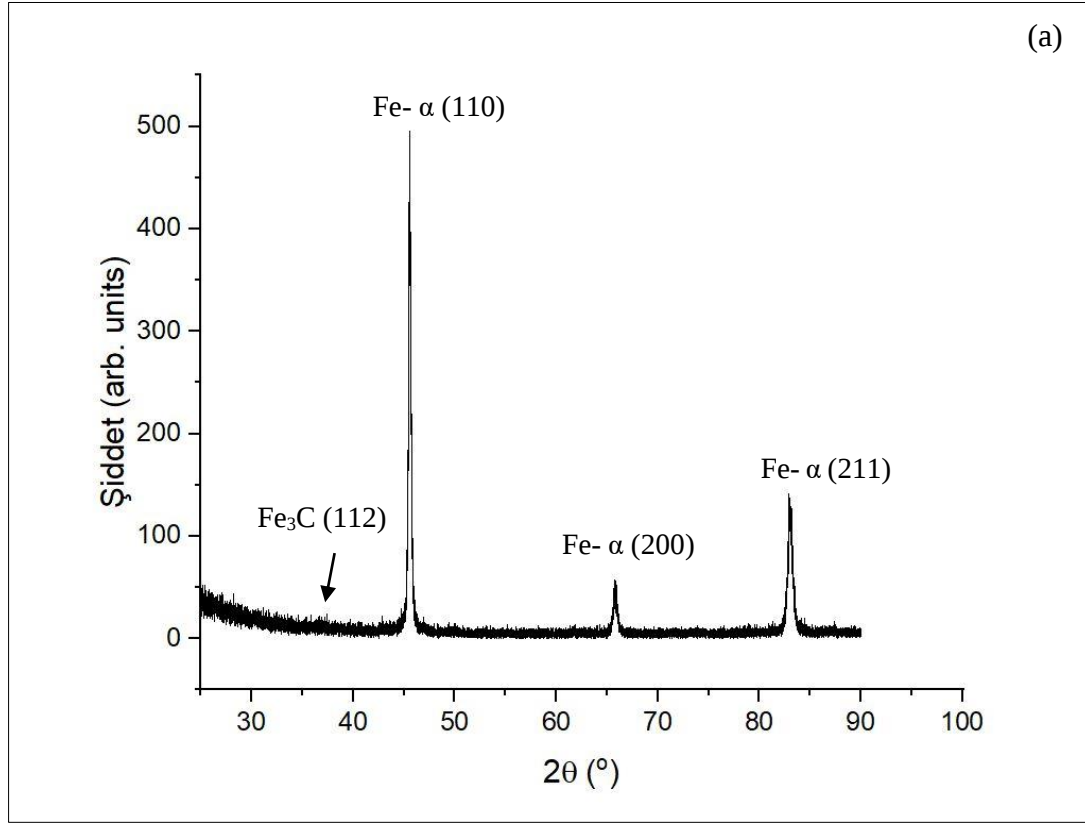


Şekil 7.6. M400-180 numunenin X-Rd grafiği

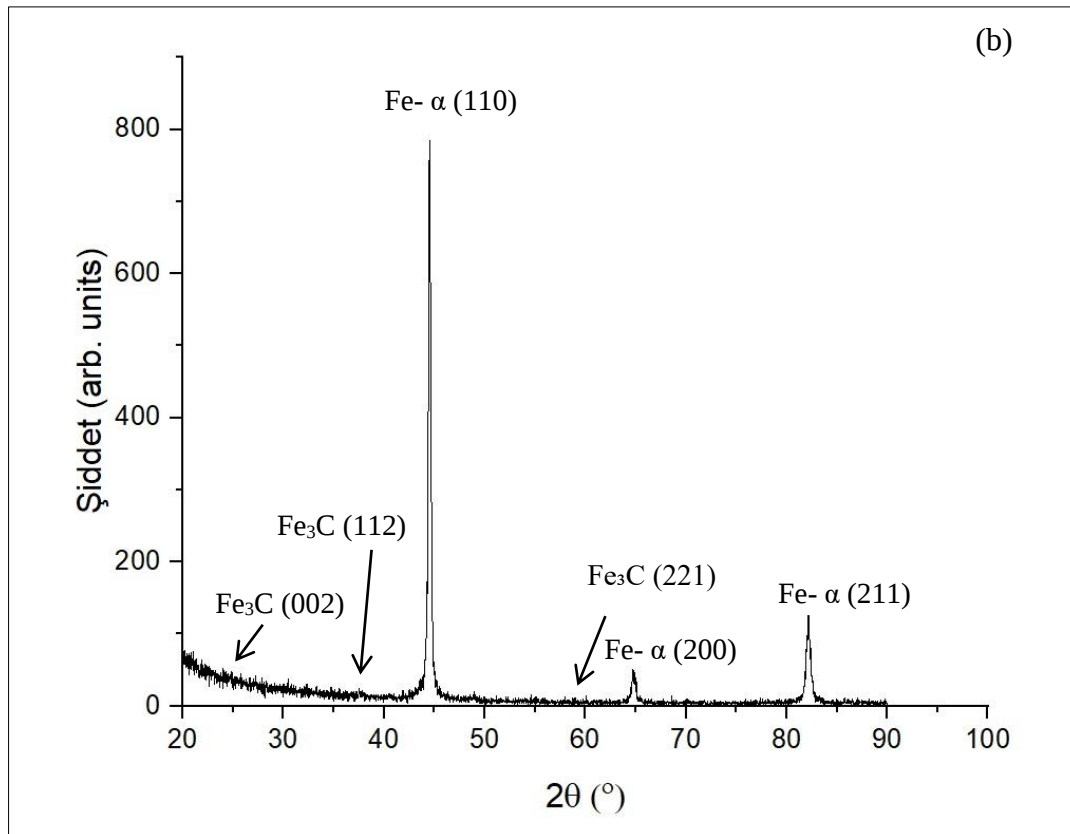
Şekil 7.7 (a – b)’de M210-360, M350-360 numunelerin kristalografik yapılarının analizi için XRD pikleri verilmiştir.

Şekil 7.7 (a)’da M210-360 numune yapısında belirgin martensitik numunenin pikleri bulunmaktadır. Ayrıca az da olsa düşük şiddetli karbür pikleri (Fe_3C) görülmektedir.

Şekil 7.7 (b)’de M350-360 numune yapısında tuz banyosunda bekletilme süresi arttıkça karbür piklerinin arttığı görülmektedir.



Şekil 7.7. a) M210-360 numunenin X-Rd grafiği

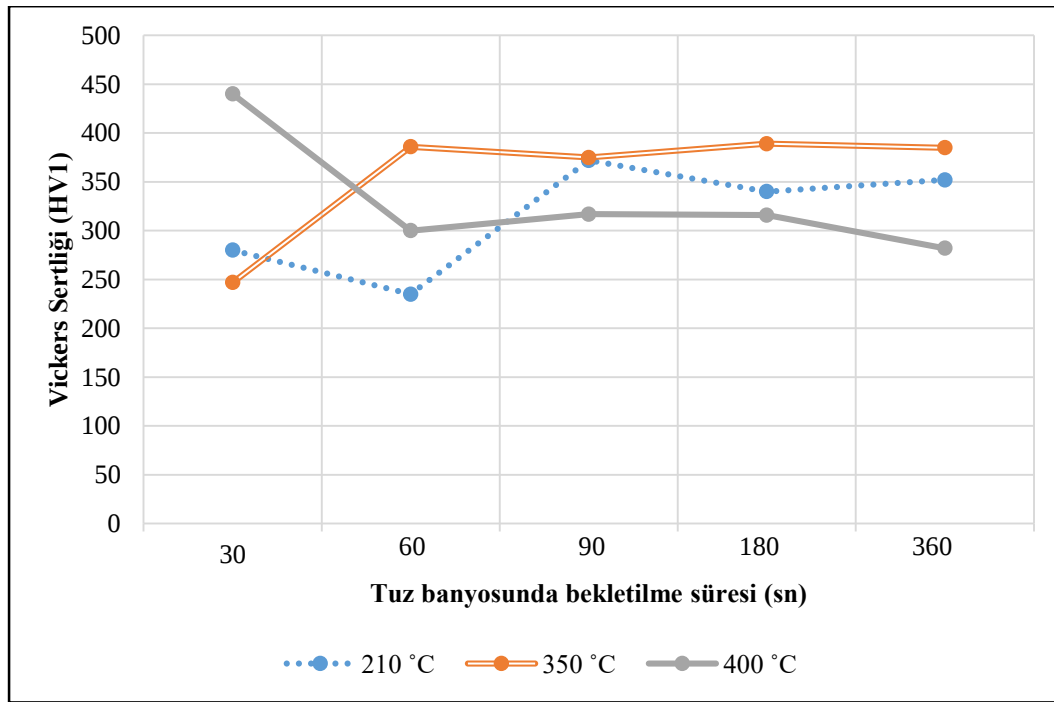


Şekil 7.7. b) M350-360 numunenin X-Rd grafiği

7.4. Sertlik Sonuçları

Numunelerin martemperleme ısı işlemleri sonrasında makro sertlik değerleri ölçülmüştür. Vickers sertlik yöntemi kullanılarak tespit edilen sertlik değerleri değerlendirilmiştir. Numunelerin beş farklı sertlik değeri alınarak aritmetik ortalama bir değer elde edilmeye çalışılmıştır.

Şekil 7.8’de makro sertlik değerlerinin değişimi verilmiştir. Sinterlenen numunelerin ortalama sertlik değerleri 193 HV1 olarak bulunmuştur.



Şekil 7.8. Sinterleme ve martemperleme süresine bağlı olarak makro sertlik değişimi grafiği

Martemperleme ısı işlemi uygulanan numunelerin sertlik değerlerinde farklı yöntemler kullanıldığı için değişimler gözlemlenmiştir. Östenit sıcaklığından su verilerek martenzit fazı oluşturmak amaçlanmıştır. Martenzit fazı, numune içerisindeki dislokasyon nedeni ile en sert fazdır. Bu yüzden sinterlenen numunenin sertlik değerleri ısı işlem uygulanan numunelerin sertlik değerinden düşüktür. Çizelge 7.1’de sinterlenmiş ve doğrudan su verilmiş numunelerin sertlik değerleri verilmiştir.

Çizelge 7.1. Sinterlenmiş ve doğrudan su verilen numunelerin sertlik değerleri (HV1)

Sinterlenmiş Numunenin Sertliği	Su Verilmiş Numunenin Sertliği
193	410

Martemperleme ısıtılmasında numuneler öncelikle fırında 950 °C’de 4 dk östenitlenmiştir. Çalışmada tuz banyosunun sıcaklığı 210 °C, 350 °C, 400 °C olarak üç farklı değer kullanılmıştır. Sıcaklığı 210 °C, 350 °C, 400 °C olan tuz banyosunun içine östenitlenen numuneler daldırılmıştır. Tuz banyosunda 30, 60, 90, 180 ve 360 sn olmak üzere farklı sürelerde bekletildikten sonra su verme işlemi uygulanmıştır.

Çizelge 7.2’de numunelerin makro sertlik değerleri verilmiştir. Tuz banyosunun sıcaklığı 350 °C olan numunelerin sertlik değeri, 400 °C olan numunelere göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm grafiğine bakıldığı zaman 400 °C tuz banyosunda bekletilen numunenin beynite ulaşma süresinin daha kısa olduğu görülmektedir. Bu durumun, sertliğin düşmesine yol açtığı düşünülmektedir.

Çizelge 7.2. Numunelerin makro sertlik değerleri tablosu (HV1)

Numune	Sertlik (HV1)
M210-30	280
M210-60	235
M210-90	372
M210-180	340
M210-360	352
M350-30	247
M350-60	386
M350-90	375
M350-180	389
M350-360	385
M400-30	440
M400-60	300
M400-90	317
M400-180	316
M400-360	282
Doğrudan su verme	410

Östenitleme işleminden hemen sonra su verilen numunenin sertliği ise 410 HV1 olup en yüksek sertliğe sahip olan numunedir. Bunun nedeni olarak martenzit oluşumu gösterilebilir.

Tuz banyosunun sıcaklığı 350 °C olan M350-30 numunesinin sertlik değerinin düşük olduğu görülmüştür. Kalıntı östenit ve gözenekli yapının, numune sertliğini olması gereken değerden daha düşük değerde gösterdiği düşünülmektedir.

Sertlik değerlerine genel olarak bakıldığında fırında bekletilme süresi arttıkça numunelerin sertlik değerlerinde bir azalmanın olduğu görülmüştür. Numuneler hızlı soğutulduğu zaman yapının daha sert olduğu bilinmektedir. Bunun nedeni olarak yapıda bulunan ferrit ve sementit fazının martenzit fazından beynit fazına dönüştüğü düşünülmektedir. Beynit fazının martenzite göre daha yumuşak bir faz olduğu bilinmektedir. Bununla birlikte tuz banyosunda bekletilme süresi arttıkça kalıntı östenit oluşma miktarı azalmıştır.

7.5. Aşınma Test Sonuçları

Üretilen toz metal çelik numunelerin kuru sürtünme aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testi sonucunda numunelerin öncelikle Çizelge 7.3’de verildiği gibi ortalama ağırlık kayıpları hesaplanmış, ayrıca numunelerin farklı mesafelerdeki aşınma testleri sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları ile başlangıçtaki yoğunlukları kullanılarak Archard prensibine [89] göre hesaplandığı aşınma katsayıları verilmiştir. Çizelge 7.3’de numunelerin 500 m ve 1000 m mesafedeki 10^{-4} g hassasiyetli dijital terazide tartılan numune ağırlık kayıpları gösterilmektedir.

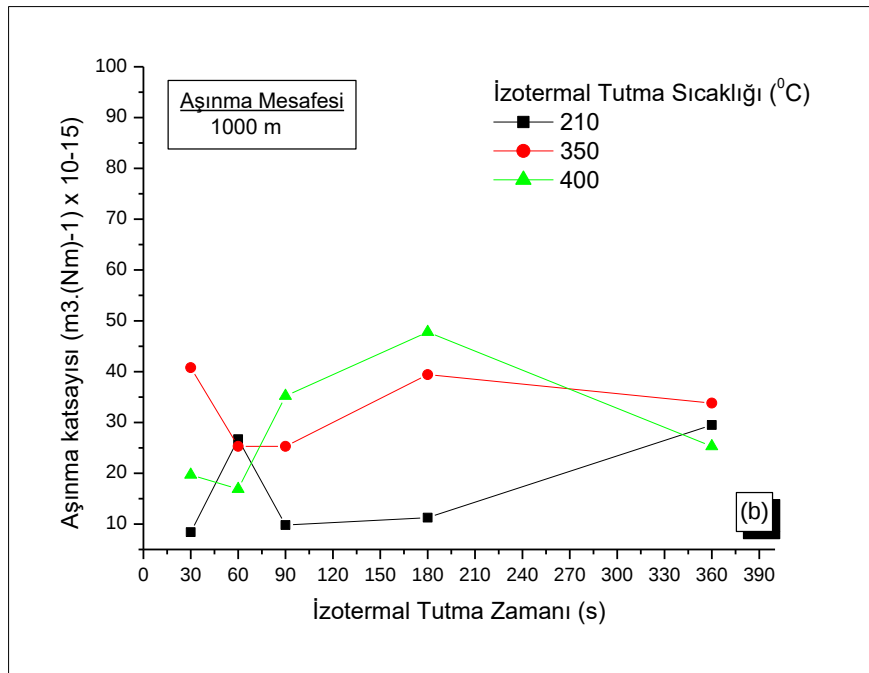
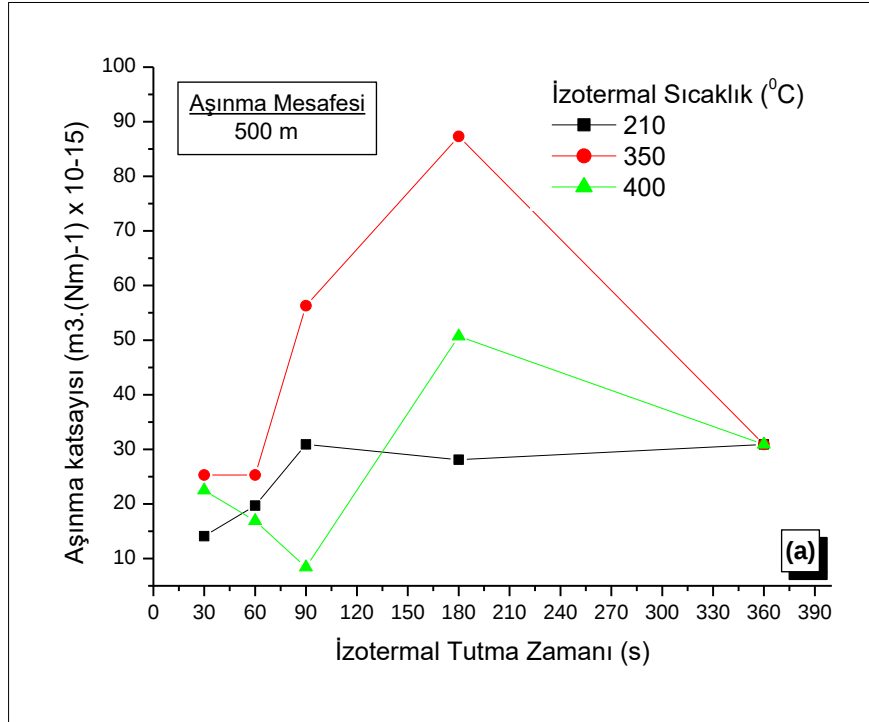
Çizelge 7.3. Numunelerin ortalama ağırlık kaybı ve aşınma katsayısı değerleri tablosu

Numune	Sertlik (HV1)	Kütle Kaybı (g)		Aşınma Katsayısı ($\text{m}^3 \cdot (\text{Nm})^{-1} \times 10^{-15}$)	
		500 m	1000 m	500 m	1000 m
M210-30	280	0,0005	0,0006	14,08	8,4
M210-60	235	0,0007	0,0019	19,7	26,7
M210-90	372	0,0011	0,0007	30,9	9,8
M210-180	340	0,001	0,0008	28,1	11,26
M210-360	352	0,0011	0,0021	30,9	29,5
M350-30	247	0,0009	0,0029	25,3	40,8
M350-60	386	0,0009	0,0018	25,3	25,3

Çizelge 7.3 (devam). Numunelerin ortalama ağırlık kaybı ve aşınma katsayısı değerleri tablosu

Numune	Sertlik (HV1)	Kütle Kaybı (g)		Aşınma Katsayısı ($\text{m}^3 \cdot (\text{Nm})^{-1} \times 10^{-15}$)	
		500 m	1000 m	500 m	1000 m
M350-90	375	0,002	0,0018	56,3	25,3
M350-180	389	0,0031	0,0028	87,3	39,4
M350-360	385	0,0011	0,0024	30,9	33,8
M400-30	440	0,0008	0,0014	22,5	19,7
M400-60	300	0,0006	0,0012	16,9	16,9
M400-90	317	0,0003	0,0025	8,4	35,2
M400-180	316	0,0018	0,0034	50,7	47,8
M400-360	282	0,0011	0,0018	30,9	25,3
Doğrudan su verme	410	0,0002	0,0001	5,6	1,4

Numunelerin ağırlık kaybı uygulanan yük ve kayma mesafesine göre elde edilen aşınma katsayıları Çizelge 7.3 ve Şekil 7.9’da verilmiştir. Tüm numunelerde aşınma kayıpları ve aşınma katsayıları 500 m ara ile değerlendirilmiştir. İlk bakışta; 500 m aşınma mesafesindeki değerlerin 1000 m aşınma mesafesine göre çok daha fazla ve daha kararsız bir seyir gösterdiği söylenebilir. Bu durumun sürtünen numunenin aşınma diski üzerine temas yüzeyine alışma sürecinden kaynaklandığı düşünülebilir. Genel aşınma davranışları izotermal tutma zamanına bağlı olarak değerlendirildiğinde, kısa tutma zamanında daha fazla kararsızlıklar söz konusu iken 180 s’e kadar artan izotermal tutma zamanı ile aşınma oranı ve katsayısının arttığı görülmektedir. Şekil 7.1’de gösterilen ZSD diyagramında kırmızı kesikli çizgilerle işaret edilmiş izotermal sıcaklıklarının B_s (Beynit dönüşüm sıcaklığı) zamanına kadar (Martempeleme işlemi olarak tanımlanan zaman) geçen süre aşıldığında kısmen de olsa beynit dönüşümü başlamış olursa sert martensit faz miktarı azalır ve aşınma katsayısının artışına neden olabilir.



Şekil 7.9. İzotermal tavlama zamanına göre aşınma katsayısı değişim grafiği a) 500 m, b) 1000 m sürtünme mesafesi

Ancak çok uzun süre izotermal bekletme zamanında (360 s) ise hem aşınma katsayısı azalmış hem de farklı izotermal sıcaklıklarda ısıl işlem uygulanan aşınma değerleri birbirlerine yakın elde edilmiştir. Benzer durum hem 500 m (Şekil 7.9. a)) hem de 1000 m (Şekil 7.9. b)) içinde geçerlidir. Bu durumun tam olarak nedeni literatürde benzer çalışmalar kısıtlı olduğundan net olarak tartışılamamıştır. Ancak; yüksek bir ihtimal Bs ve Bf zamanının

çok geçilmesi durumunda beynit yapısında daha kararlı/dengeli karbürlerin çökelmiş olmasından kaynaklandığı düşünülebilir. Bu karbürlerin martensit fazından daha az olmasına rağmen martensit fazından daha sert ve yumuşak matriste yüzeysel çıkıntılara sahip morfolojiden dolayı hem sürtünme (Şekil 7.10) hem de aşınma katsayısının azalmasına neden olabileceği düşünülebilir.

Ayrıca izotermal sıcaklığa göre aşınma katsayısı değerlendirildiğinde özellikle 210 °C’de gerçekleştirilen izotermal işlemlere göre sıcaklığın artırılması ile aşınma katsayıları genel olarak daha yüksek oranda seyretmiştir. Bu durum izotermal sıcaklığın artmasıyla Bs dönüşüm zamanının kısalması ile açıklanabilir. Bununla birlikte genel aşınma eğilimlerinin çok istikrarlı olmadığı söylenebilir. Bunun yukarıda açıklanan nedenlerin dışında pek çok nedeni olabilir. Örneğin her ne kadar aşınma direnci için martensit gibi sert fazlar istense bile bazen bu durum, fazların sürtünme sırasında yarı statik titreşimlerden ve büyük kütsel kırılmalardan dolayı aşınma kaybının artmasına neden olabilir. Ayrıca aşınma mekanizmaları da farklı etkilere yol açabilir. Şöyle ki muhtemel kırılarak kopan martensit parçacıkları disk/numune ara yüzeyinde kalırsa aşındırıcı (abraziv) etkiyle aşınma oranını daha da artırabilir. Ya da sürtünme sırasında muhtemel gerçekleşen sıcaklık artışı çeşitli faz dönüşümlerine neden olabileceğinden aşınma davranışları da anlık değişim gösterebilir. Bu durumda daha yumuşak faz ya da yapılara dönüşme durumunda yapışmalı (adhesiv) aşınma mekanizmasına yol açabilir. Bazen titreşimden kaynaklanan yorulmalı aşınma mekanizması veya sıcaklığa bağlı oksidasyonlu aşınma mekanizması devreye girebilir. Örnekleri verilen tüm bu ihtimaller, aşınma testleri sırasında gerçekleşebileceğinden grafiklerdeki aşınma özelliklerinin istikrarsızlaşmasının çeşitli nedenleri olarak gösterilebilir. Aşağıda bu çalışmada gerçekleşen yüksek ve düşük aşınma özelliklerine sahip numunelerin ayrıntılı bilgileri sunulmuş ve en ideal aşınma şartları tespit edilmeye çalışılmıştır.

Tüm numunelerin aşınma testi sonrası ağırlık kayıpları sürtünme mesafesine göre incelendiğinde, 400 °C tuz banyosunda bekletilen M400 serisi numunelerin beynitik mikroyapının getirdiği düşük sertlikten dolayı 500 metre aşınma mesafesinden 1000 metreye ilerleyen aşınma mesafelerinde numunedeki ağırlık kaybının ciddi artış göstererek ortalama 21×10^{-4} g olduğu belirlenmiştir. 210 °C’de tuz banyosunda bekletilen M210 serisi numunelerin martensit mikroyapıları bulunduğu için daha sert bir numune olduğundan dolayı 500 m’den 1000 m’ye ilerleyen aşınma mesafelerinde numunedeki ağırlık kaybının diğer numunelere göre daha az miktarda ve ortalama $12,04 \times 10^{-4}$ g olarak belirlenmiştir. Tuz

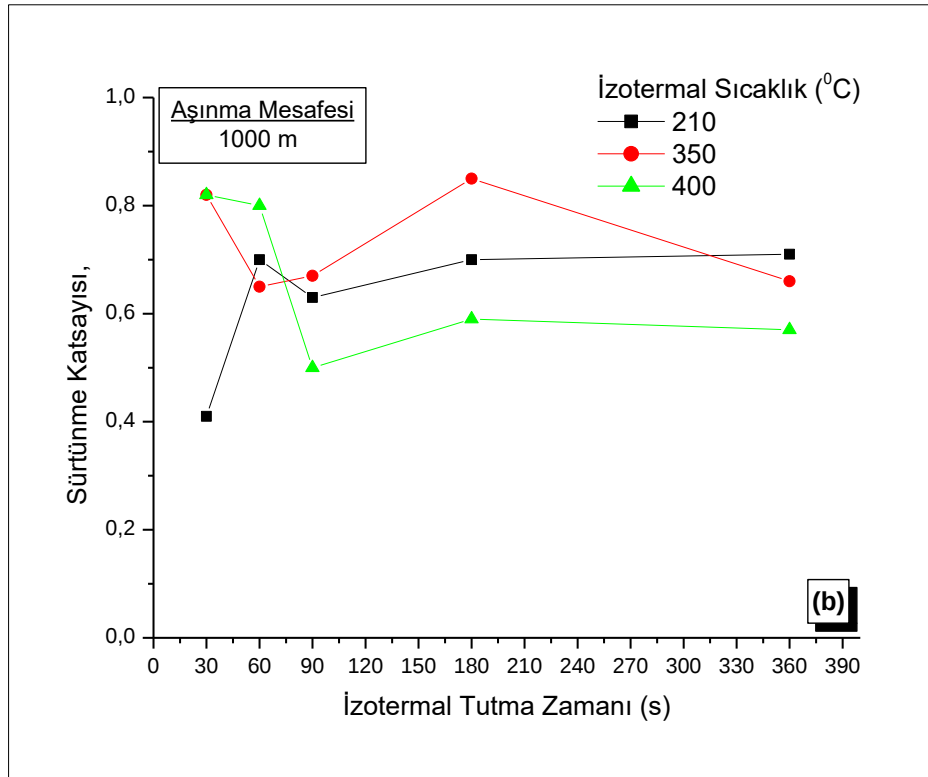
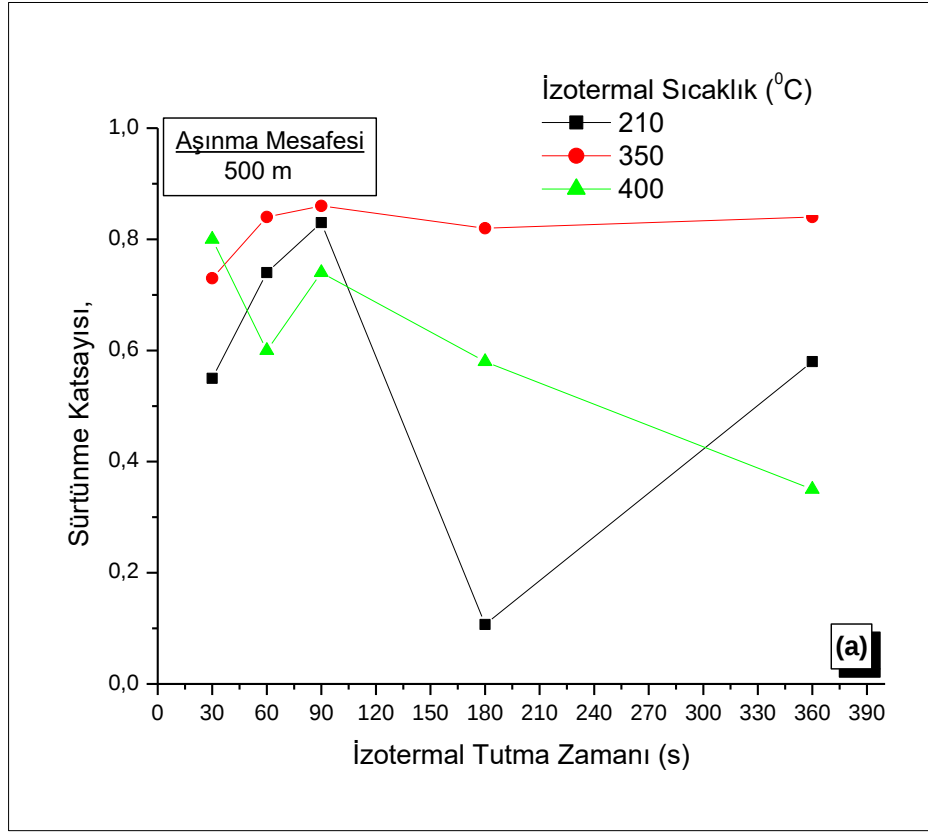
banyosunda bekletilme süreleri arttıkça, sementit gibi daha kararlı/dengeli fazların yumuşak ferrit matriste daha da kabalaşması ile üst beyrit ve perlit yapıları görülen 350 °C tuz banyosunda bekletilen numunelerde ağırlık kayıpları 500 m aşınma mesafesinde ortalama 16×10^{-4} g iken, 1000 m aşınma testi sonucunda 23×10^{-4} g olarak belirlenmiştir. 210 °C tuz banyosunda 180 sn bekletilen M210-180 numunesi ile benzer sertliğe sahip 350 °C tuz banyosunda 180 sn bekletilen M350-180 numunesi aşınma testleri sonucu daha az ağırlık kaybına uğramışlardır. En az ağırlık kaybına martenzit oluşumundan dolayı doğrudan su verilen numune sahiptir. 1000 m kayma mesafesinde en az ağırlık kaybı martenzit yapısından dolayı M210 serisi numunelerde gerçekleşmiştir.

Çizelge 7.3’de numunelerin farklı mesafelerdeki aşınma testleri sonrası meydana gelen ağırlık kayıpları ile başlangıçtaki yoğunluklarının kullanılarak Archard prensibine [89] göre hesaplandığı aşınma katsayıları verilmiştir. 500 m kuru ortam aşınma mesafesinde sabit 10N yük uygulanarak gerçekleştirilen test sonucunda yapılan hesaplamalara göre en az ağırlık kaybına uğrayan M400-90 numune, en az aşınma katsayısına sahiptir. Ayrıca 1000 m aşınma mesafesinde en az ağırlık kaybına uğrayan M210-30 numune $8,4 \text{ (m}^3 \cdot \text{(Nm)}^{-1}) \times 10^{-15}$ değeri ile en düşük aşınma katsayısı değerine sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca en az ağırlık kaybına uğrayan M210-180, en düşük aşınma katsayısına sahiptir.

Çizelge 7.4’de verilen ortalama sürtünme katsayısı değerleri, aşınma test cihazında yer alan yazılım ile otomatik kaydedilmiş ve aynı çizelgede sunulmuştur.

Çizelge 7.4. Numunelerin 500 m ve 1000 m kayma mesafesi sonrası ortalama sürtünme katsayısı değerleri tablosu (μ)

No.	Numune	500m	1000m
1	M210-30	0,55	0,41
2	M210-60	0,74	0,70
3	M210-90	0,83	0,63
4	M210-180	0,107	0,70
5	M210-360	0,58	0,71
6	M350-30	0,73	0,82
7	M350-60	0,84	0,65
8	M350-90	0,86	0,67
9	M350-180	0,82	0,85
10	M350-360	0,84	0,66
11	M400-30	0,80	0,82
12	M400-60	0,60	0,80
13	M400-90	0,74	0,50
14	M400-180	0,58	0,59
15	M400-360	0,35	0,57
16	Doğrudan su verme	0,30	0,27

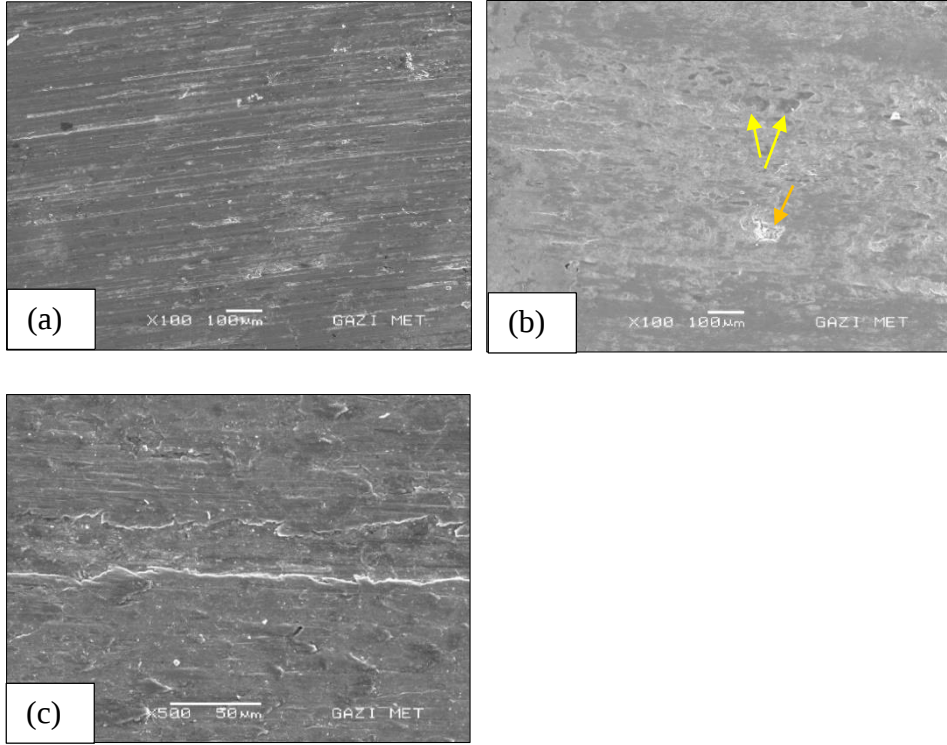


Şekil 7.10. İzotermal tavlama zamanına göre sürtünme katsayısı değişim grafiği (Sürtünme mesafesi; a) 500 m, b) 1000 m)

7.5.1. Aşınmış yüzeylerin SEM analizleri

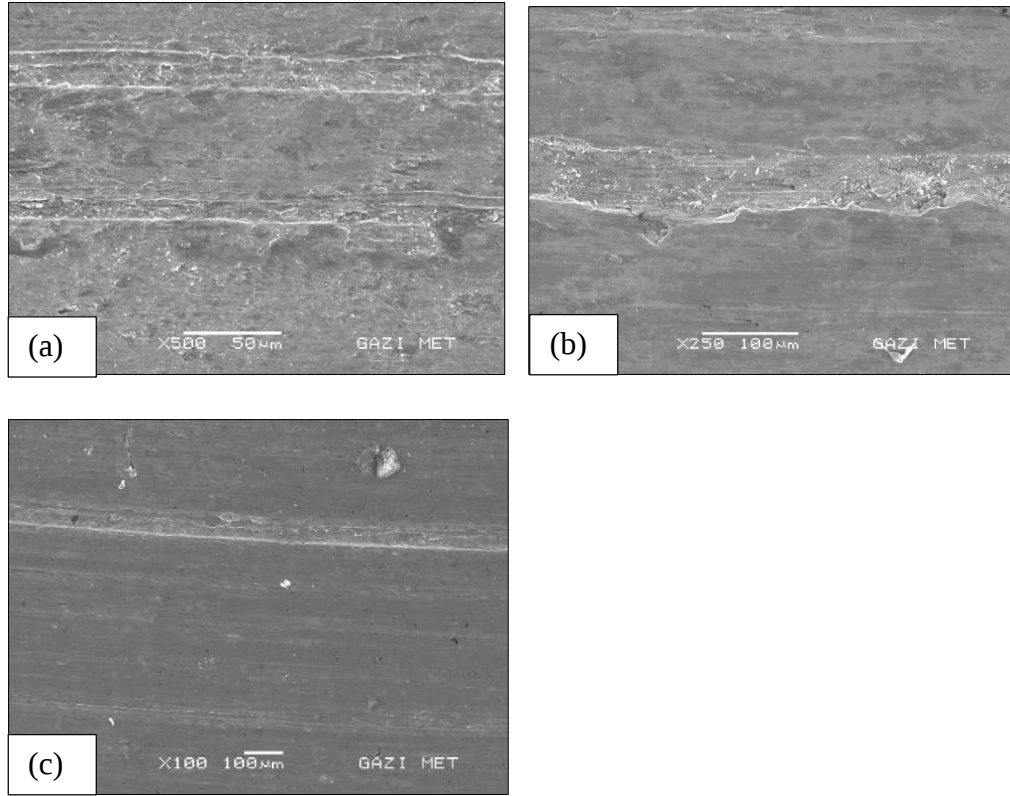
Aşınma testi yapılan numunelerin 1000 m sürtünme mesafesi sonunda aşınma testi sonrası aşınmış yüzeylerinin detaylı olarak incelenmesi ve aşınma mekanizmalarının anlaşılabilmesi için taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelenmiştir.

M210-30 numunede aşınma ağırlık kaybının diğer numunelere göre daha az olduğu görülmektedir. Vickers sertlik değeri 280 olmasına rağmen aşınma ağırlık kaybının az olması, toz metalurjik yapılarda bulunan gözeneklerin boyutları aşınma esnasında kopan parçacıkların boyutları için uygun olduğunda, aşınma talaşlarının gözeneklere girmesi ve böylece aşınma kayıplarının daha az gerçekleşmesi ile açıklanabilir. Resim 7.8 (a - c)'de M210-30, M350-30, M400-30 kuru ortamda aşınma testi sonrası numune yüzeylerinin SEM mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Resim 7.8 (a)'da derin olmayan yüzeysel aşınma izlerinin oluştuğu görülmektedir. Resim 7.8 (b)'de M350-30 numunede kararsız temas yüzeyine bağlı olarak belirgin olmayan düz hat üzerinde aşınma yüzeyi görülmektedir. Bu durum, yüzeysel kabuklanmış küçük talaşların adhesiv etkiyle yapışmış (Resim 7.8 (b)'de sarı ok ile gösterilmiş) ancak henüz kopmamış olduğu şeklinde düşünülebilir. SEM görüntüsü üzerinde kısmen bahsedilen adhesiv parçacıkların koptuğu bölgeler de görülebilir (Resim 7.8 (b)'de turuncu ok ile gösterilmiştir.). Resim 7.8 (c)'de M400-30 numunesinin aşınma izleri belirgin bir şekilde ama düzgün olmayan morfolojide görülmektedir. Bu tipik aşınma izleri genellikle sertliği düşük malzemelerde derin olmayan geniş ve kabuklanmış şekilde kendini göstermektedir. Bu durumda nispeten aşınma kaybı daha fazla olabilmektedir.



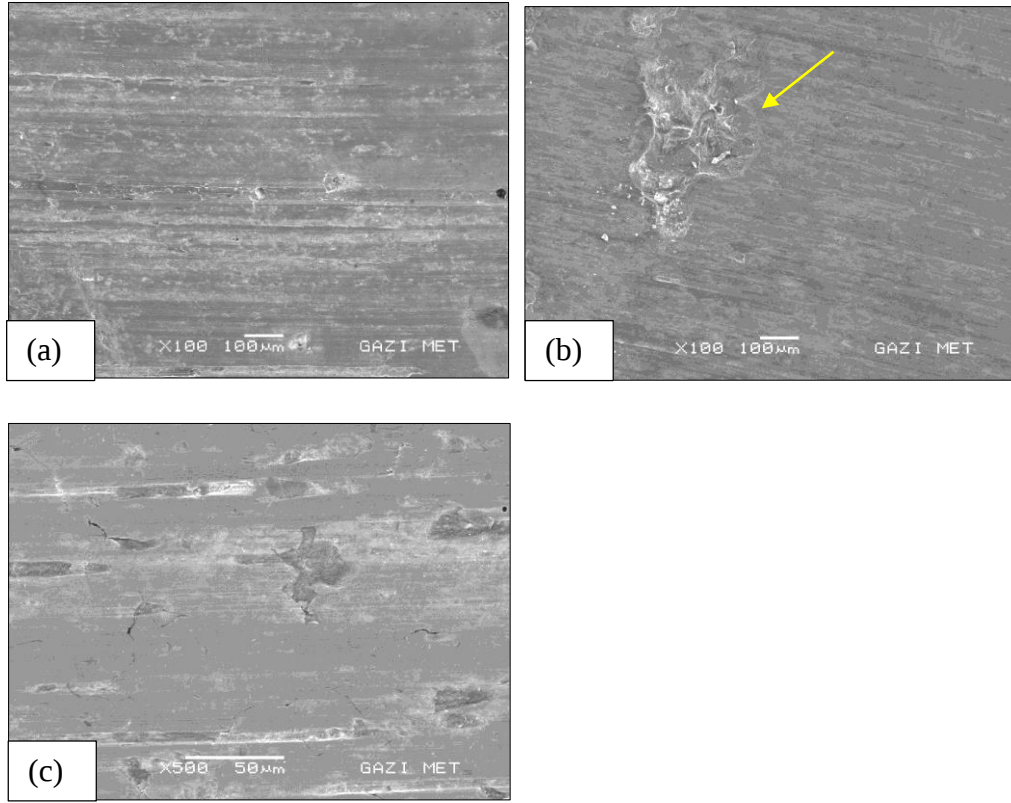
Resim 7.8. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-30, b) M350-30, c) M400-30

Resim 7.9 (a - c)'de M210-60, M350-60, M400-60 kuru ortamda aşınma testi sonrası numune yüzeylerinin SEM mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Resim 7.9 (a)'da M210-60 numunede martenzit yapısı sert malzeme olduğundan dolayı aşınma uygulandığında daha büyük kütleli parçacıkların kopması sonucunda daha çok abrasiv aşınma izlerine neden olduğu düşünülmektedir. Resim 7.9 (b)'de M350-60 numunede belirgin ve derin aşınma izleri görülmektedir. Resim 7.9 (c)'de M400-60 numunede aşınma izleri belirgin bir şekilde görülmektedir.



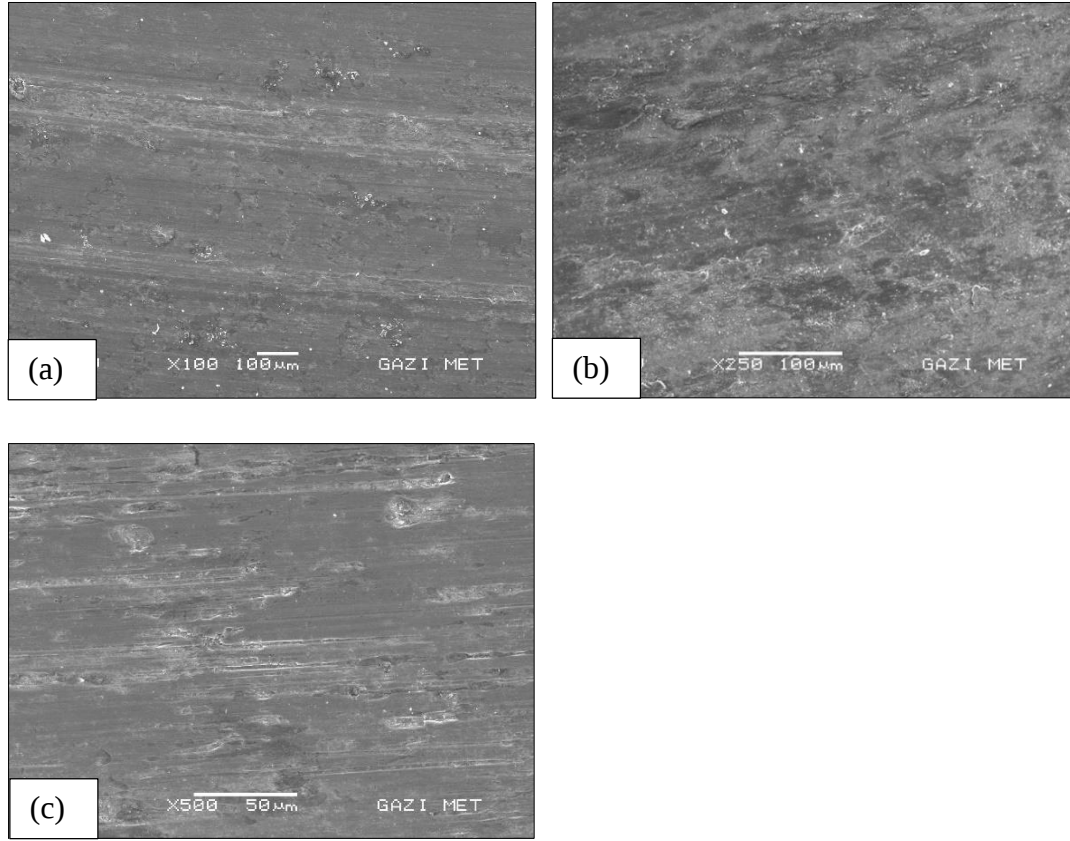
Resim 7.9. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-60, b) M350-60, c) M400-60

Resim 7.10 (a - c)'de M210-90, M350-90, M400-90 kuru ortamda aşınma testi sonrası numune yüzeylerinin SEM mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Resim 7.10 (a)'da M210-90 numunede yüzeysel izler görülmektedir. Resim 7.10 (b)'de M350-90 numunede belirgin yırtılmalar ve parça kayıpları görülmektedir. SEM aşınma görüntüsünde görülen sarı ok ile gösterilen bölgede muhtemelen daha büyük martenzit adacığının koptuğu düşünülmektedir. Resim 7.10 (c)'de M400-90 numunede sertliğin düşmesine bağlı olarak parça kopmaları ve yırtılmalar daha belirgin görülmektedir.



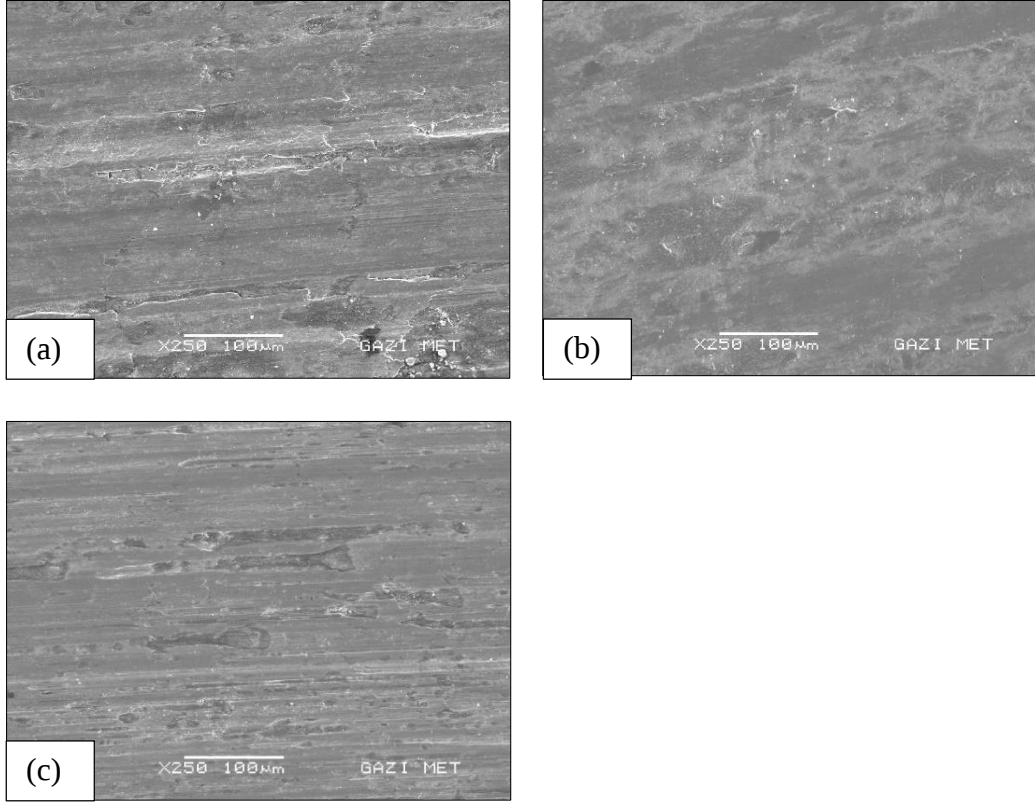
Resim 7.10. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-90, b) M350-90, c) M400-90

Resim 7.11 (a - c)'de M210-180, M350-180, M400-180 kuru ortamda aşınma testi sonrası numune yüzeylerinin SEM mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Resim 7.11 (a)'da M210-180 numunede diğer numunelere göre daha yüzeysel izler görülmektedir. Resim 7.11 (b)'de M350-180 numunede beynit ve perlit yapılarına bağlı olarak aşınma kayıpları meydana gelmiştir. Resim 7.11 (c)'de M400-180 numunede beynit yapısından dolayı daha çok malzeme kaybı meydana gelmiştir.



Resim 7.11. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-180, b) M350-180, c) M400-180

Resim 7.12 (a - c)'de M210-360, M350-360, M400-360 kuru ortamda aşınma testi sonrası numune yüzeylerinin SEM mikroyapı görüntüleri gösterilmektedir. Resim 7.12 (a)'da M210-360 numune aşınma yüzeyinde kabuklaşmalar görülmektedir. Resim 7.12 (b)'de M350-360 numunede aşınma izleri belirgin olarak görülememektedir. Resim 7.12 (c)'de M400-360 numunede aşınma izlerinin daha derin olduğu görülmektedir.



Resim 7.12. Aşınma sonrası SEM görüntüsü a) M210-360, b) M350-360, c) M400-360

8. SONUÇ VE ÖNERİLER

8.1. Sonuçlar

Bu araştırmada, üç farklı sıcaklık değerine sahip olan tuz banyosu kullanılmıştır. Toz metalurjisi yöntemi kullanılarak sabit kimyasal bileşime sahip numuneler üretilmiştir. Su verme çatlaklarının sıklıkla görüldüğü yüksek karbonlu çeliklerde, bu problemin önlenmesi için önerilen marsuverme işleminin bu çalışmada yüksek karbonlu toz metal çeliklere de uygulanabilirliğini göstermek amacıyla ağırlıkça %1,5 karbon oranına sahip yüksek karbonlu toz metal çelik numuneler imal edilmiştir. Toz karışım, önce preslenmiş sonra sinterleme işlemi uygulanmıştır. Sinterlenen numunelere, östenitleme işleminin ardından martemperleme ısısal işlemi uygulanmıştır. Numuneler ilk olarak 950°C sıcaklıkta 4 dk östenitlenmiştir. Martemperleme ısısal işleminde numuneler tuz banyosunda 30, 60, 90, 180 ve 360 sn olan farklı sürelerde bekletilmiş ve ardından oda sıcaklığında su verilmiştir. Su verme sonucunda martenzit yapılar üretilmiştir. Bu çalışma sonucunda elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. ASTM G99 standardına göre hazırlanan numuneler, 700 MPa'da tek etkili presleme cihazında oda sıcaklığında şekillendirilmiştir. Numunelerin ham yoğunluk değeri 6,9 g/cm³, sinterleme sonrası yoğunluk değeri 7,1 g/cm³ olarak tespit edilmiştir.
2. Sinterleme işleminin ardından numunede bulunan boşlukların azalmasına bağlı olarak, sinterleme sonrası yoğunluk değerinin arttığı görülmüştür. Parçanın hacminin azalması ile yoğunluğu artmıştır.
3. Farklı parametreler kullanılarak uygulanan ısısal işlemlere göre mikroyapıda değişimler gözlemlenmiştir. Tuz banyosunda bekletme süresinin artması ile mikroyapıdaki beynitik alanların arttığı görülmüştür.
4. Farklı tuz banyosu sıcaklık değerleri numunelerin mikroyapılarını etkilemiştir. Tuz banyosu sıcaklığı 210 ve 350°C olan numunelerde martenzit oranının daha fazla olduğu görülmüştür. Beyniti yapıda oluşma süresinin M210 ve M350 serisi numunelerde, M400 serisi numunelere göre daha geç olduğu düşünülmektedir. Bu değerlendirme, Zaman-Sıcaklık-Dönüşüm diyagramı ile desteklenmektedir.

5. Numunelerin tuz banyosunda bekletilme süreleri arttıkça genel olarak sertliklerinde azalma meydana gelmiştir. Bunun nedeni, mikroyapıda oluşan faz değişimleridir. Martenzit fazının, beynit fazından daha sert bir faz olduğu bilinmektedir.
6. Tuz banyosunun sıcaklığının değiştirilmesi sertlikleri etkilemiştir. Tuz banyosunun sıcaklığı 400°C olan numunelerin sertlikleri, tuz banyosu sıcaklığı 350°C olan numunelere göre daha düşüktür.
7. Sinterleme sonrası numunenin sertlik değeri 193 HV olarak ölçülmüştür. Isıl işlem uygulanan bütün numunelerin sertlik değeri, sinterlenen numunenin sertlik değerinden yüksektir. Isıl işlem ile numunelerin sertlikleri arttırılmıştır.
8. Numunelere uygulanan kuru ortam aşınma testi sonuçlarında genel olarak artan ısıl işlem sürecine bağlı olarak ağırlık kayıplarında azalma meydana geldiği görülmüştür. Buna bağlı olarak M210 serisi numunelerde daha az aşınma ağırlık kaybı olduğu tespit edilmiştir. En düşük ağırlık kaybına uğrayan M210-180 numune, en düşük aşınma katsayısına da sahiptir.

8.2. Öneriler

1. Bu çalışmada mikroyapı, XRD, SEM, sertlik değerleri, aşınma testi sonuçları değerlendirilmiştir. Darbe, çekme, yorulma gibi diğer mekanik özellikler de incelenebilir.
2. Bu çalışmada, %1,5 karbon oranına sahip yüksek karbonlu toz metal çelik numuneler üretilmiştir. Karbon ve alaşım oranları değiştirilerek ısıl işlemler yapılabilir.
3. Tuz banyosunun sıcaklığı 210, 350 ve 400 °C olarak çalışma yapılmıştır. Tuz banyosunun sıcaklık değerleri ve bekletilme süreleri değiştirilebilir.
4. Eklemeli imalat yöntemi ile farklı faz dönüşümlerine sahip yüksek karbonlu toz metalurjisi malzemeler üretilir.
5. TEM incelemesi ile SAD (Seçilen alan kırınımı) paternleri analizleri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Karagöz, Ş., Yamanoglu, R., ve Atapek, Ş. H. (2009). Metalik toz işleme teknolojisi ve prosesleme kademeleri açısından parametrik ilişkiler. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 22(3), 77-87.
2. Samal, P., and Newkirk, J. (2015). Powder metallurgy methods and applications. *ASM handbook of powder metallurgy*, 7.
3. Al-Mangour, B. (2015). Powder metallurgy of stainless steel: state-of-the art, challenges, and development. *Stainless Steel: Microstructure, Mechanical Properties and Methods of Application: Nova Science Publishers*, 37-80.
4. Tecer, M. M. Effects of various heat treatment procedures on the toughness of AISI 4140 low alloy steel. *The International Journal of Materials and Engineering Technology*, 3(2), 131-149.
5. Başaran, A. (2007). Toz metal parçalara ısı ve mekanik yüzey işlemlerin birlikte uygulanabilirliğinin araştırılması (Doktora Tezi, SDÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
6. Çetin, T., Akkaş, M., ve Boz, M. (2020). Gaz atomizasyonu yöntemi ile üretilen AM60 magnezyum alaşım tozunun toz karakterizasyonu üzerine gaz basıncının etkisinin araştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(2), 967-978.
7. Kunt, A. I. (2006). Volfram filamanlarının elektrolitik temizlenmesi ve çap redüksiyonu için sürekli elektroliz sisteminin geliştirilmesi (Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
8. Coolidge, W. D. (1913). U.S. Patent No. 1,082,933. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
9. Duran, F. (2004). Kendinden yağlamalı yatakların yorulma ve tribolojik özelliklerinin deneysel incelenmesi (Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
10. Hiçyılmaz, N. (1999). Toz metalurjisi yöntemleri ile elde edilen seramik tanecik destekli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin aşınma özellikleri (Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
11. Çakır, F. M. (2012). Nano boyutlu manyetik kompozit toz malzemelerin üretimi için model geliştirilmesi (Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
12. Ramakrishnan, P. (2013). Automotive applications of powder metallurgy. *Advances in Powder Metallurgy*, 493-519.
13. İnternet: URL: <https://fractory.com/types-of-gears>, Son Erişim Tarihi: 14.09.2020.
14. İnternet: URL: <https://fractory.com/types-of-bearings>, Son Erişim Tarihi: 14.09.2020.
15. İnternet: URL: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=1538>, Son Erişim Tarihi: 25.09.2020.

16. İnternet: URL: <http://www.iabrasive.com/articles/nano-crystalline-cemented-carbide-technology-in-china>, Son Erişim Tarihi: 21.01.2020.
17. Goetzel, C. G., and Rittenhouse, J. B. (1966). Powder Metallurgy Applications in Space Vehicle Systems. *Modern Developments in Powder Metallurgy*, 190-201.
18. İnternet: URL: <https://www.wikiwand.com/en/Explorer>, Son Erişim Tarihi: 15.10.2020.
19. İnternet: URL: https://thelibraryofmanufacturing.com/powder_processes.html, Son Erişim Tarihi: 10.10.2020.
20. Güner, R. (2002). Demir esaslı toz metal parçaların elektrik direnç kaynağında optimum kaynak şartlarının belirlenmesi.
21. German, R. (1994). *Powder Metallurgy Science, second edition*, Metal powder industries federation.
22. Sarıtaş, S. (1994). *Toz Metalurjisi Makine Mühendisliği El Kitabı*, Cilt 1, Ankara.
23. İnternet: URL: <https://metalurji.mu.edu.tr/Icerik/metalurji.mu.edu.tr/Sayfa/MME%203518-Powder%20Metallurgy-1-2.pdf>, Son Erişim Tarihi: 22.02.2020.
24. İnternet: URL: <https://www.slideshare.net/rejeeshcrajendran/module-iii-32259859>, Son Erişim Tarihi: 13.03.2020.
25. İnternet: URL: <https://www.horizontechnology.biz/blog/how-are-metal-powders-made-powder-metallurgy-process>, Son Erişim Tarihi: 27.04.2020.
26. Baksan, B., ve Gürler, R. (2003). Toz metalurjisinin savunma sanayiinde uygulanması (Osmangazi Üniversitesi Metalurji Enstitüsü, Eskişehir).
27. Gürbüz, M. (2020). Mekanik alaşımlama ve toz üretim yöntemleri ders notları (Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Samsun).
28. Hatman, A., ve Karagöz, Ş. (1993). Su atomize CuZn42 alaşımı tozu üretimi ve su basıncının toz özelliklerine etkileri, 7. *Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi*, 553-565, Ankara.
29. Boz, M. (1999). Toz metalurjisi yöntemiyle üretilmiş bronz esaslı fren balata malzemelerinin sürtünme-aşınma davranışlarının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
30. Kurt, A. (1992). Toz metal bronz yatak malzemelerinin özellikleri, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-57.
31. Akpınar, İ. Ş. (2011). Atomizasyon yöntemiyle toz metal üretimi ve tozların karakterizasyonu, (Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
32. Roll K.H. (1984). *History of Powder Metallurgy Metals Handbook 9th Edition (Vol.7)*. ASM Metals Park, Ohio.

33. Küçükarslan, S. (2006). Gaz atomize kalay tozu üretim parametrelerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
34. İnternet: URL: www.metal-powder.net, Son Erişim Tarihi: 12.01.2020.
35. Zheng, B., Lin, Y., Zhou, Y., and Lavernia, E. J. (2009). Gas atomization of amorphous aluminum powder: Part II. Experimental investigation. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 40(6), 995.
36. Çiçek, B. (2009). Gaz atomizasyonu ünitesinin tasarımı, yapımı ve gaz atomizasyonu yöntemiyle metal tozu üretimi (Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
37. Klar, E., and Fesko, J. W. (1984). Production of metal powders. *Metals Handbook*, 7, 25-51.
38. İnternet: URL: <http://www.metalparts.cn/powder-metallurgy>, Son Erişim Tarihi: 04.05.2020.
39. Aydın, Ş. (1997). Toz metalurjisi yöntemleri ile elde edilen seramik tanecik destekli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin mekanik özellikleri (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
40. İnternet: URL: <https://bachiller.com/en/double-cone-mixer>, Son Erişim Tarihi: 07.12.2020.
41. Kayış, V. (2005). Kısmi ve ön alaşımlı demir tozları içerisine katılan B ve FeB ilavelerin sinterleme davranışları ve mekanik özelliklere etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
42. Hacıoğlu, T. (2010). AlB4Cp kompozitlerinin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
43. Turan, P. (2002). W-Ni-B ve W-Ni ağır alaşımlarının karşılaştırmalı sinterleme davranışları, (Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
44. Onur, A. (1996) Yağ atomizasyonu yöntemiyle metal tozu üretiminin incelenmesi, (Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
45. İnternet: URL: https://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=die_pressing_of_metallic_powders 2019, Son Erişim Tarihi: 09.07.2020.
46. Ulutaş, A. (2014). Bor takviyeli bakır kompozitinin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi ve mekanik-elektriksel özelliklerinin incelenmesi (Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
47. Aydın, R. (1997). T/M çelik parçalarda ısıl işlemlerin mekanik özelliklere etkisi (Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
48. Toplan, N. (2015). Pekiştirme ve presleme teknikleri ders notları, Sakarya Üniversitesi.

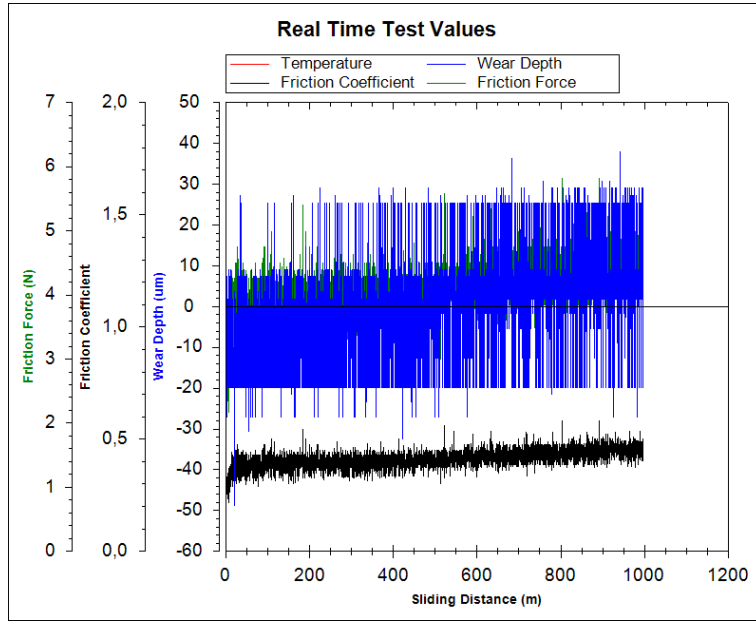
49. İnternet: URL: https://thelibraryofmanufacturing.com/pressing_sintering.html, Son Erişim Tarihi: 05.08.2020.
50. Jenkins, I., and Wood, J.V. (1991). Powder metallurgy: an overview, *The Institute of Metals*, ABD.
51. Upadhyaya, G. S. (1996). *Powder Metallurgy Technology*, Cambridge International Science Publishing, Cambridge.
52. German, R. M. (2007). *Toz metalurjisi ve parçacıklı malzeme işlemleri*. (Çev. Sarıtaş S., Türker M. ve Durlu N.). Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları, Ankara.
53. Bakkaloğlu, A. (2004). Toz metalurjisi ders notları, Yıldız Teknik Üniversitesi.
54. İnternet: URL: www.mpif.org, Son Erişim Tarihi: 05.09.2020.
55. Froyen, L., and Verlinden, B. (1994). *Aluminium matrix composites materials*. University of Leuven, 5.
56. İnternet: URL: <https://rahmiunal.net/toz/sinterleme/sintering.html>, Son Erişim Tarihi: 05.12.2020.
57. İnternet: URL: <https://sites.google.com/site/heattransfersteadyvstransient>, Son Erişim Tarihi: 11.06.2020.
58. Gülsoy, H. Ö. (1996). Toz metalurjisi süreçleriyle üretilen demir esaslı yapısal parçaların mekanik özelliklerinin incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
59. Bakan, H. İ. (1999). Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Cu-% 25 Cr elektrik kontak malzemesinin sinterleme davranışlarının incelenmesi (Doktora tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
60. Waters, T. F. (2017). *Fundamentals of manufacturing for engineers*. CRC Press.
61. Altuntaş, O. (2013). Yüksek karbonlu toz metal çeliklerin mikroyapı ve darbe tokluğu özelliklerine küreselleştirme ısı işlemleri etkilerinin araştırılması (Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
62. Bargel, H. J., Schulze, G., Güleç, Ş. ve Aran, A. (1995). *Malzeme bilgisi*. İTÜ.
63. İnternet: URL: <https://malzemebilimi.net/celiklere-uygulanan-ısı-islemler-nelerdir.html>, Son Erişim Tarihi: 05.09.2019.
64. İnternet: URL: <https://docplayer.biz.tr/16048662-Celiklere-uygulanan-ısı-islemler.html>, Son Erişim Tarihi: 05.12.2019.
65. Savaşkan, T. (2009). *Malzeme bilgisi ve muayenesi*, Celepler Yayıncılık, Trabzon, 193-199.
66. Weissbach, W., Anık, S., Anık, E. S. ve Vural, M. (1998). *Malzeme bilgisi ve muayenesi*, Birsan Yayınevi.

67. Soy, U. (2014). *1000 Soruda Malzeme Bilimi*. Malzeme Bilimine Giriş, 517-518.
68. Soy, U. (2014). *1000 Soruda Malzeme Bilimi*. Malzeme Bilimine Giriş, 526-527.
69. Soy, U. (2014). *1000 Soruda Malzeme Bilimi*. Malzeme Bilimine Giriş, 524-525.
70. Güler, H. ve Özcan, R. (2014). Yüksek karbonlu çeliklere su verme işleminin mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 19(2), 77-83.
71. İnternet: URL: <http://www.nsccelik.com/celiklereuygulanaisilislemler.html> Son Erişim Tarihi: 06.12.2020.
72. Soy, U. (2014). *1000 Soruda Malzeme Bilimi*. Malzeme Bilimine Giriş, 540-541.
73. Topbaş, M. A. (1993). *Isıl işlemler*, Prestij Basın Yayın ve Hizmetleri.
74. Topbaş, M. A. (1998). *Çelik ve ısıtıl işlem el kitabı*, Prestij Yayıncılık.
75. Shaeri, M. H., Saghafian, H., and Shabestari, S. G. (2010). Effects of austempering and martempering processes on amount of retained austenite in Cr-Mo steels (FMU-226) used in mill liner. *Journal of iron and steel research, international*, 17(2), 53-58.
76. Varshney, A., Sangal, S., Kundu, S., and Mondal, K. (2016). Super strong and highly ductile low alloy multiphase steels consisting of bainite, ferrite and retained austenite. *Materials & Design*, 95, 75-88.
77. Malheiros, L. C., Rodriguez, E. P., and Arlazarov, A. (2017). Mechanical behavior of tempered martensite: *Characterization and modeling*. *Materials Science and Engineering*: A, 706, 38-47.
78. Tavares, S. S. M., da Cunha, R. P. C., Barbosa, C., and Andia, J. L. M. (2019). Temper embrittlement of 9% Ni low carbon steel. *Engineering Failure Analysis*, 96, 538-542.
79. Krishna, P. V., Srikant, R. R., Iqbal, M., and Sriram, N. (2013). Effect of austempering and martempering on the properties of AISI 52100 steel. *International Scholarly Research Notices*.
80. Popov, V. L. (2010). *Contact mechanics and friction*, Springer Berlin Heidelberg, 231-253.
81. Güler, K. (2011). Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alaşımının mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkisi (Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
82. Gürleyik, M. Y. (1986). Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları. *Mühendis ve Makine*, 27, 3-14.
83. Czichos, H., and Woydt, M. (2017). Introduction to tribology and tribological parameters. *ASM handbook. Vol. 18, Friction, lubrication, and wear technology*, 3-15.

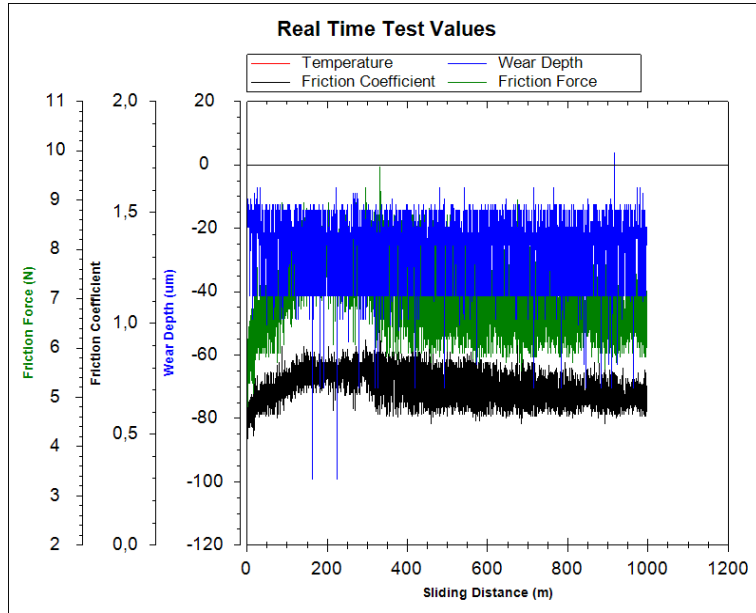
84. Tabor, D. (2006). Friction, lubrication, and wear. *Mechanical Design Handbook, Second Edition: Measurement, Analysis and Control of Dynamic Systems*, 7-1.
85. Fındık, F. (2016). *Malzeme Seçimi ve Uygulamaları*, Seçkin Yayınevi, Ankara, 167-190.
86. Türküz, M. C. (2006). Fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile yapılan zirkonyum nitrür ince film kaplamanın kaplama parametrelerinin incelenmesi ve optimizasyonu (Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
87. İnternet: URL: <https://weldwolf.com/asinma-nedir-asinma-tipleri-nelerdir>, Son Erişim Tarihi: 04.12.2020.
88. Terkeşli, M. H. (2017). Aps yöntemi ile üretilen wc ve mo kaplamaların aşınma davranışlarının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi, Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
89. Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology*.
90. Ezirmik, K. V. (2008). Mo-N-Ag nanokompozit kaplamaların üretimi ve tribolojisi (Doktora Tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü).
91. Karaoğlu, Y. (2006). Bir aşınma test cihazının tasarımı ve imalatı (Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi).
92. Stachowiak, G., and Batchelor, A. W. (2013). *Engineering tribology*. Butterworth-Heinemann.
93. Yıldız, T., ve Gür, A. K. (2006). Aşınma sistemleri. *Doğu Anadolu Bölgesi Araştırmaları*, 4(2), 86-91.
94. Soydan, Y., ve Ulukan, L. (2013). Temel Triboloji, Sürtünme, Aşınma, Yağlama Bilimi ve Teknolojisi. *Tagem Kopisan*, Sakarya.
95. Song, Y. N., Wang, H. D., Xu, B. S., and Xing, Z. G. (2016). Effect of fretting wear on very high cycle bending fatigue behaviors of FV520B steel. *Tribology International*, 103, 132-138.
96. Ashby, M. F., and Jones, D. R. H. (1998). *Engineering Materials 2-Forming of the structure and properties, materials selection*. WNT, Warsaw.
97. Archard, J. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of applied physics*, 24(8), 981-988.
98. Öztürk, S. (2019). Metalurji ve malzeme mühendisliği ders notları, (Karadeniz Teknik Üniversitesi).
99. American Society for Metals. (1977). *Atlas of isothermal transformation and cooling transformation diagrams*. American Society for Metals.

EKLER

EK-1. Numunelerin 1000 m mesafede aşınma testinde elde edilen sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği grafikleri

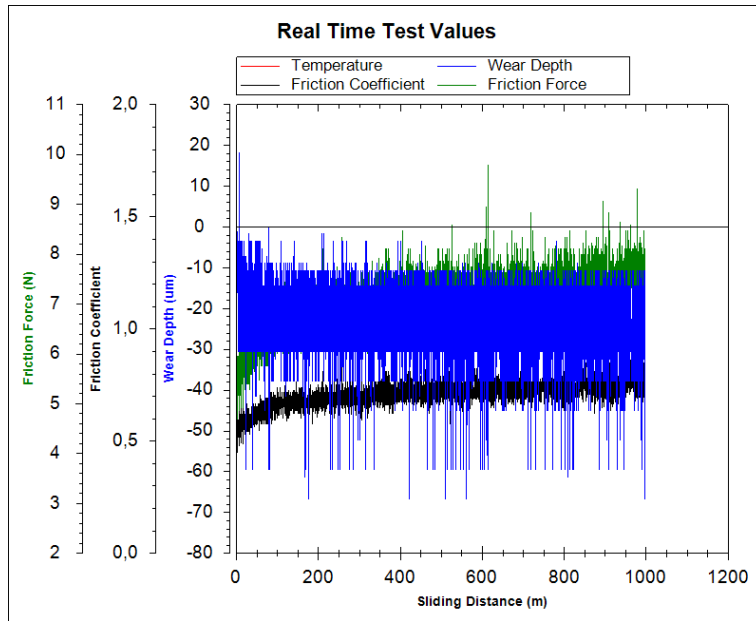


Şekil EK-1.1. M210-30

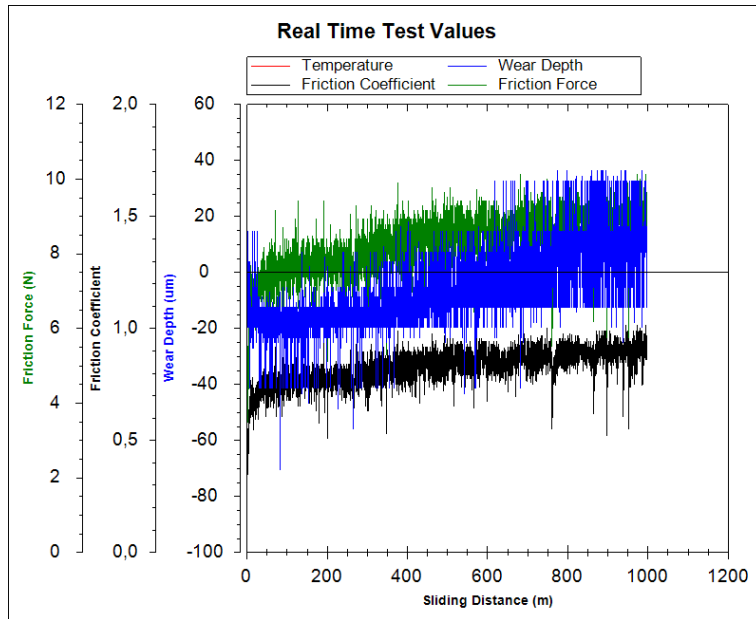


Şekil EK-1.2. M210-60

EK-1. (devam) Numunelerin 1000 m mesafede aşınma testinde elde edilen sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği grafikleri

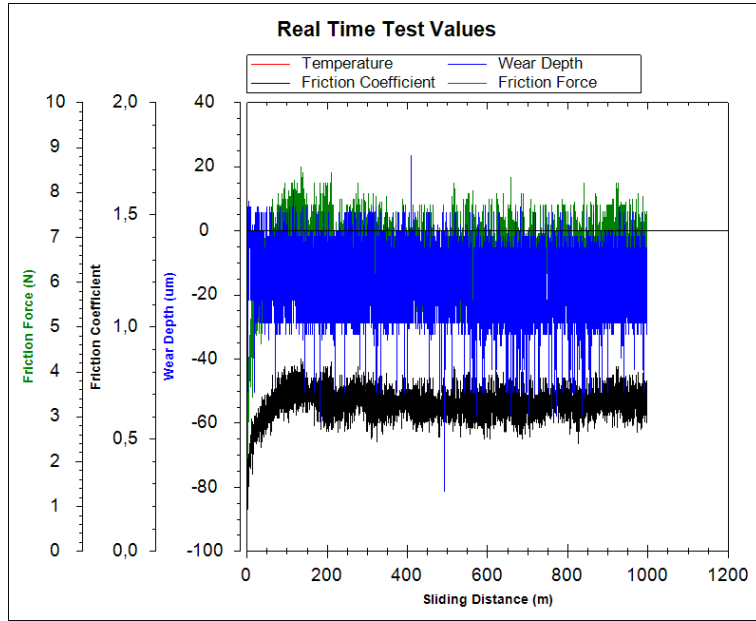


Şekil EK-1.3. M210-180

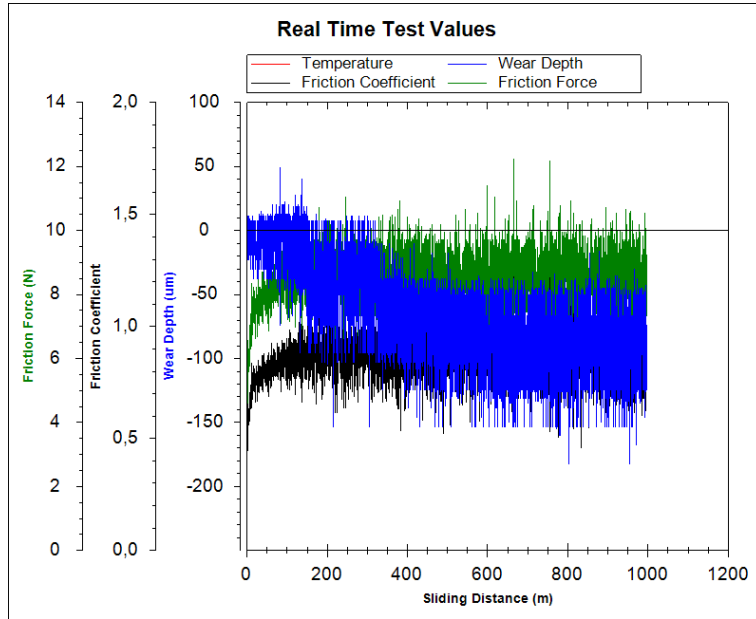


Şekil EK-1.4. M350-30

EK-1. (devam) Numunelerin 1000 m mesafede aşınma testinde elde edilen sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği grafikleri

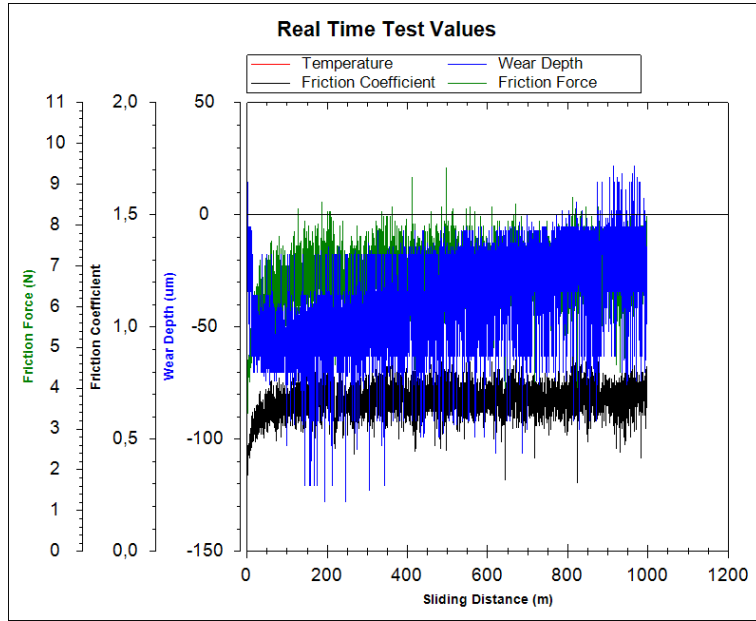


Şekil EK-1.5. M350-60

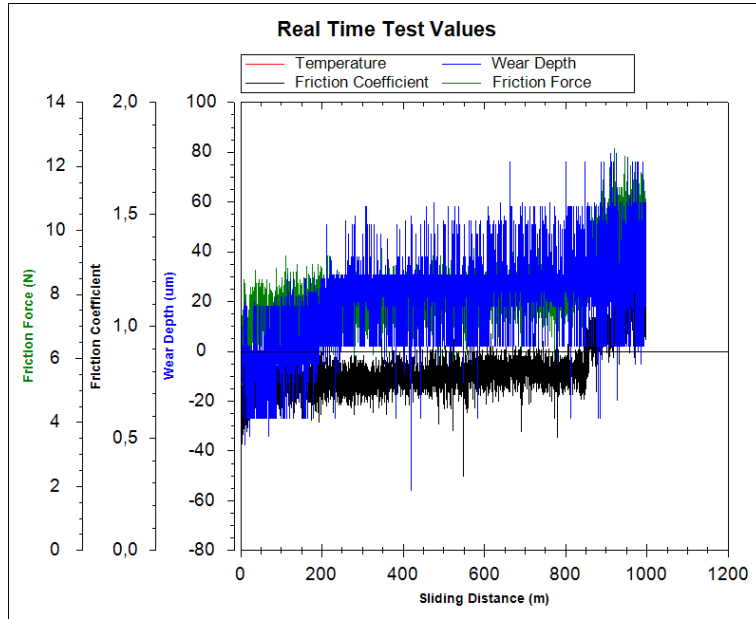


Şekil EK-1.6. M350-180

EK-1. (devam) Numunelerin 1000 m mesafede aşınma testinde elde edilen sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği grafikleri

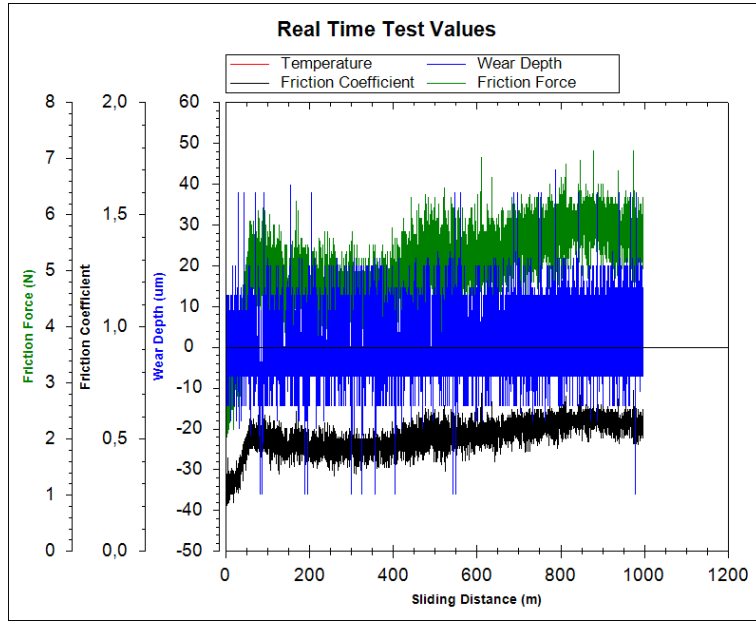


Şekil EK-1.7. M350-360

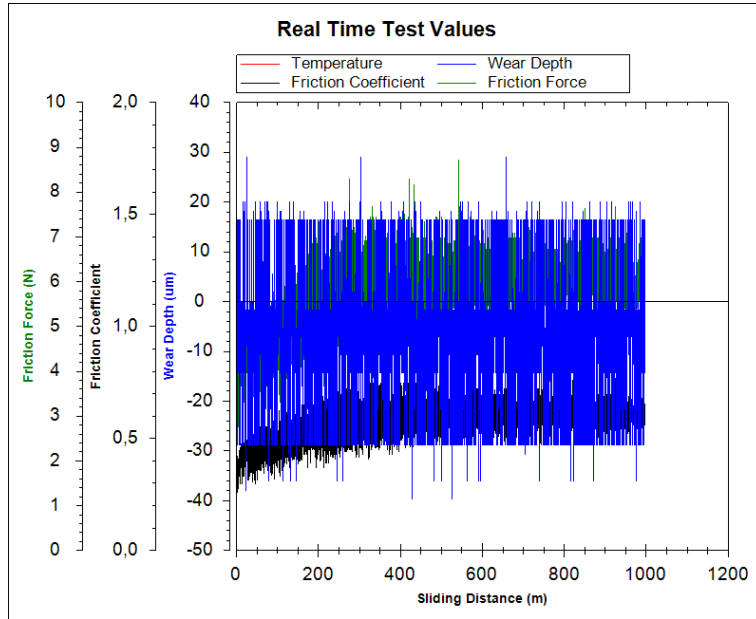


Şekil EK-1.8. M400-60

EK-1. (devam) Numunelerin 1000 m mesafede aşınma testinde elde edilen sürtünme kuvveti, sürtünme katsayısı ve aşınma derinliği grafikleri



Şekil EK-1.9. M400-90



Şekil EK-1.10. M400-360



GAZİ GELECEKTİR...