



**TOZ METALURJİSİ ÇELİKLERİNDE BAKIR
İLAVESİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN
ARAŞTIRILMASI**

Kerem Alper ACAR

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN
Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL**

**TOZ METALURJİSİ ÇELİKLERİNDE BAKIR İLAVESİNİN AŞINMA
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

Kerem Alper ACAR

**Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN
Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL**

**KARABÜK
Ocak 2021**

Kerem Alper ACAR tarafından hazırlanan “TOZ METALURJİSİ ÇELİKLERİNDE BAKIR İLAVESİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN
Tez Danışmanı, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL
Tez İkinci Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 29/01/2021

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu) İmzası

Başkan : Dr. Öğr. Üyesi Harun ÇUĞ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN (KBÜ)

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Mehmet AKKAŞ (KÜ)

KBÜ Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

“Bu tezdeki tüm bilgilerin akademik kurallara ve etik ilkelere uygun olarak elde edildiğini ve sunulduğunu; ayrıca bu kuralların ve ilkelerin gerektirdiği şekilde, bu çalışmadan kaynaklanmayan bütün atıfları yaptığımı beyan ederim.”

Kerem Alper ACAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALURJİSİ ÇELİKLERİNDE BAKIR İLAVESİNİN AŞINMA ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

Kerem Alper ACAR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL

Ocak 2021, 58 sayfa

Toz metalürjisi (TM) yöntemiyle döküm gibi geleneksel çelik üretim yöntemlerine kıyasla, karmaşık geometriye sahip parçalar daha düşük maliyet ile üretilebilmektedirler. Ayrıca, TM yöntemi, farklı alaşım kompozisyonlarının hassas olarak hazırlanmasına imkân vermektedir.

Çeliklerin mekanik özelliklerini etkileyen önemli faktörlerden biri, içerdikleri alaşım elementlerinin türü ve miktarıdır. Dolayısıyla, dayanım/ağırlık oranı daha yüksek olan çeliklerin geliştirilmesi için alaşımlama üzerine çalışmalar yapılmaktadır. Bakır, çeliğin sinterleme sıcaklığının altında, 1083 °C’de ergimektedir. Böylelikle, sinterleme sırasında ergiyik duruma geçmekte ve daha yüksek yoğunluğa sahip numunelerin üretimine olanak sağlamaktadır. Ayrıca, çeliğin korozyon direncini ve mekanik dayanımı arttırmaktadır.

Bu tez çalışmasında, TM yöntemiyle farklı oranlarda (% 4, % 8, % 16) bakır içeren düşük karbonlu çelikler üretilmiştir. Üretim aşamasında, belirlenen kompozisyonlarda, üç eksenli karıştırıcı ile karıştırılan tozlar, 750 MPa presleme basıncında sıkıştırılmış ve ardından 1350°de argon atmosferinde sinterleme gerçekleştirilmiştir. Üretilen numunelerin mikroyapıları elektron mikroskobu kullanılarak incelenmiştir. Yoğunluk ölçümü gerçekleştirilmiş ve porozite miktarları hesaplanmıştır. Mekanik özellikleri çekme testi ile belirlenmiştir. Aşınma testleri, kuru ve korozif olmak üzere iki farklı ortamda ve farklı yükler altında gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, aşınma özellikleri ile ilişki kurmak adına numunelerin sertlik değerleri belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Toz metalürjisi, çelik, bakır, aşınma özellikleri, mikroyapı.

Bilim Kodu : 91528

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF COPPER ADDITION ON TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF NON-ALLOYED STEEL PRODUCED BY POWDER METALLURGY

Kerem Alper ACAR

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Mechanical Engineering**

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Mehmet Akif ERDEN

Res. Assist. Dr. Yasin AKGÜL

January 2021, 58 pages

Compared to traditional steel production methods such as casting by powder metallurgy (P/M) method, parts with complex geometry can be produced at a lower cost. In addition, the TM method allows precise preparation of different alloy compositions.

One of the important factors affecting the mechanical properties of steels is the type and quantity of alloying elements they contain. Therefore, alloying studies have carried out to develop steels with a higher strength-to-weight ratio. Copper melts below the sintering temperature of steel, at 1083°C. In this way, it switches to a melting state during sintering and allows the production of samples with a higher

density. It also increases the corrosion resistance and mechanical strength of the steel.

In this thesis, in different proportions (% 4, % 8, % 12) low carbon steels containing copper are manufactured via P/M method. During the first step of production, powders that have specified compositions were mixed with a three-axis mixer. Then mixed powders were compressed at a pressing pressure of 750 MPa, followed by sintering in an argon atmosphere at 1350°. The microstructures of the samples were studied using electron microscopy. Density measurement was performed and porosity amounts were calculated. Mechanical properties were determined by the tensile test. Wear tests were carried out in two different environments (dry and corrosive), and under different loads. In addition, hardness values of the samples were determined in order to establish a relationship with wear properties.

Key Word : Powder metallurgy, steel, copper, wear properties, microstructure.

Science Code : 91528

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren sayın hocalarım Doç. Dr. Mehmet Akif Erden ve Arş. Gör. Dr. Yasin AKGÜL'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Karakterizasyon çalışmalarımı yürüttüğüm Demir Çelik Enstitüsünün değerli ekibine şükranlarımı sunarım. Çalışma imkânlarından faydalandığım Mühendislik Fakültesi Dekanlığı, Makine Mühendisliği Bölüm Başkanlığı'na teşekkürlerimi sunarım.

Sevgili aileme maddi ve manevi hiçbir yardımı esirgmeden yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
1.1. TARİHSEL ARKA PLAN.....	2
1.2. EKONOMİK YÖNLER.....	3
BÖLÜM 2	6
TOZ ÜRETİMİ VE TOZ KARAKTERİZASYONU	6
2.1. MEKANİK YÖNTEMLER	6
2.1.1. Faz Değişimi Olmadan Toz Üretimi.....	6
2.1.2. Atomizasyon Yöntemiyle Toz Üretimi	7
2.2. KİMYASAL YÖNTEMLER	11
2.2.1. Katılarla İndirgeme.....	11
2.2.2. Gazlarla İndirgeme	11
2.2.3. Elektrokimyasal İndirgeme.....	12
2.2.4. Karbonil Yöntemi	12
2.2.5. Katılarla (Karbürler) Reaksiyon	13
2.3. TOZ KARAKTERİZASYONU	13
2.3.1. Fiziksel özellikler.....	13
2.3.2. Kimyasal özellikler.....	15

2.3.3. Teknolojik Özellikler.....	15
BÖLÜM 3	17
TOZ METAL PARÇA ÜRETİMİ	17
3.1. KALIP SIKIŞTIRMA	18
3.1.1. İzostatik Presleme.....	20
3.1.2. Enjeksiyon Kalıplama.....	20
3.1.3. Katmanlı Üretim	21
3.2. SİNTERLEME	23
3.2.1. Katı Hal Sinterleme	24
3.2.2. Sıvı Faz Sinterleme.....	26
3.3. İKİNCİL İŞLEMLER.....	27
BÖLÜM 4	28
DEMİR BAZLI SİNTERLENMİŞ MALZEMELER.....	28
4.1. ALAŞIM SİSTEMLERİ, MİKROYAPILAR VE ÖZELLİKLER	30
4.1.1. Saf Demir.....	30
4.1.2. Demir – Karbon	31
4.1.3. Demir – Bakır ve Demir - Bakır – Karbon.....	31
BÖLÜM 5	34
DENEYSEL METOD	34
5.1. DENEY İŞLEM BASAMAKLARI	34
5.2. PARÇA ÜRETİMİ	35
5.3. SERTLİK VE ÇEKME TESTİ	35
5.4. AŞINMA TESTİ	36
5.5. SEM İNCELEMELERİ.....	36
5.6. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ	36
BÖLÜM 6	38
BULGULAR VE TARTIŞMA	38

	<u>Sayfa</u>
6.1. NUMUNELERİN MİKROYAPI ANALİZİ.....	38
6.2. NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ	42
6.3. NUMUNELERİN AŞINMA DAVRANIŞLARI.....	44
BÖLÜM 7	51
SONUÇLAR	51
KAYNAKLAR	53
ÖZGEÇMİŞ	58

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. 2016 yılında tonaj bazında Avrupa TM üretimi (ETMA) (toplam: 248×10^3 ton).....	4
Şekil 1.2. 2016 yılında ciroya göre Avrupa TM üretimi (ETMA).....	5
Şekil 1.3. Avrupa'da MIM pazarının (ETMA) büyümesi	5
Şekil 2.1. Bir su atomizörünün temel düzenlemesi a) Eriyik, b) Jet, c) Su spreyi, d) Toz, e) Basınç kaynağı, f) Oda.....	8
Şekil 2.2. Tipik su atomize toz (ASC 100.29, Höganäs AB).....	8
Şekil 2.3. Tipik gaz atomize toz (Böhler S390).....	9
Şekil 2.4. Plazma atomizasyon prensibi; a) Plazma torçları, b) Vakum pompası, c) titanyum makara, d) Toz toplama.....	10
Şekil 2.5. Tipik sünger demir tozu (NC 100.24, Höganäs AB)	11
Şekil 2.6. Tipik elektrolitik bakır tozu	12
Şekil 2.7. Tipik karbonil-metal tozu a) Nikel, b) Demir	13
Şekil 2.8. Ölçülen varlıkların tanımı a) Partikül, b) Tane, c) Aglomera.....	14
Şekil 3.1. Farklı TM şekillendirme teknolojilerinin konumlandırılması	17
Şekil 3.2. Katmanlı üretim teknolojileri.....	21
Şekil 3.3. Demirli hassas parçaların sinterlenmesi için kullanılan örgü bantlı fırının şeması a) Sinterleme tepsi, b) Konveyör bandı, c) Fırın muflü	23
Şekil 3.5. MIM (Fraunhofer IFAM) tarafından üretilen Ti numunelerinde sinterleme aşamaları a) inert gazla atomize edilmiş MIM tozu, b) kahverengi kompakt, c) 1180 °C'de 5 dakika sinterlenmiş, d) 1340°C'de 5 dakika sinterlenmiş, e) 1300 °C'de 60 dakika sinterlenmiş, f) 1350°C'de 60 dakika sinterlenmiş kompaktlar	25
Şekil 4.1. 1120 ° C'de 30 dakika sinterlenmiş NC100.24'ün mikroyapısı	31
Şekil 4.2. a) ASC100.29 +% 2 Cu ve b) ASC100.29 +% 4 Cu mikro yapıları, her iki malzeme de 1120 ° C'de 30 dakika sinterlendi. Sinterlenmiş yoğunluk: Her ikisi için 7.10 g / cm ³	32
Şekil 4.3. a) ASC100.29 +% 2 Cu ve b) ASC100.29 +% 4 Cu mikro yapıları	33
Şekil 5.1. Deneysel çalışmada proses adımları.	34
Şekil 5.2. Sinterlemede kullanılan atmosfer kontrollü fırın görüntüsü.....	35
Şekil 6.1. Sırasıyla, a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.	39

Şekil 6.2. Sırasıyla, a) %4, b) %8, c) %16 bakır içeren numunelerin SEM-Mapping analizleri.....	40
Şekil 6.3. %4 Bakır içeren numune için SEM-EDX analiz sonucu.	41
Şekil 6.4. a) %8, b) %16 bakır içeren numune için SEM-line EDX analiz sonucu.	42
Şekil 6.5. Numunelerin çekme dayanımı ve % uzama değerleri.....	44
Şekil 6.6. Kuru ortamda numunelerin farklı yükler altındaki aşınma hızları.....	45
Şekil 6.7. Kuru ortamda 40N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM aşınma yüzeyi görüntüleri.	46
Şekil 6.8. Kuru ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası %8 bakır içeren numunenin SEM aşınma yüzeyi görüntüsü ve SEM-EDX sonucu.....	46
Şekil 6.9. Kuru ortam aşınma testleri sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numuneler için bilye görüntüleri.	47
Şekil 6.10. Korozif ortamda numunelerin farklı yükler altındaki aşınma hızları.	48
Şekil 6.11. Korozif ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM aşınma yüzeyi görüntüleri.	48
Şekil 6.12. Korozif ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM aşınma yüzey görüntüleri ve SEM-EDX sonuçları.	49
Şekil 6.13. Korozif ortam aşınma testleri sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numuneler için bilye görüntüleri.	50

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 4.1. Deney için hazırlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.....	35
Çizelge 6.1. Numunelerin teorik, gerçek yoğunlukları ve gözeneklilik değerleri verilmiştir.....	42
Çizelge 6.2. Numunelerin sertlik değerleri	43

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

dak	: Dakika
mm	: Milimetre
μm	: Mikrometre
MPa	: Megapaskal
s	: Saniye
T	: Sıcaklık

KISALTMALAR

SEM	: Scanning Electron Microscope (Tarama Elektron Mikroskobu)
Ni	: Nikel
W	: Tungsten
Mo	: Molibden
V	: Vanadyum
Nb	: Niobyum
C	: Grafit
Fe	: Demir
Co	: Kobalt

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Toz metalurjisi (TM) genel olarak, tozlardan katı metal esaslı ürünler üretmek için tüm teknikleri içerir. TM, toz üretimini, istenilen kompozisyonlarda tozların karıştırılmasını, bir veya daha fazla basınç ve sıcaklığın (birlikte veya sonraki aşamalarda) uygulanmasını içeren ilave adımları ve toz metalürjisine özgü işlemleri içeren çok sayıda ikincil işlemleri kapsar [1,2]. Tozlardan metalik parçalar elde etmek için çok sayıda seçenek mevcuttur ve günümüzde çok çeşitli malzemelerden TM aracılığıyla çok çeşitli ürünler üretilmektedir. Başlıca üretim hatları, tek eksenli kalıp sıkıştırma ve sinterlemenin yanı sıra metal enjeksiyon kalıplama (MIM) olmakla birlikte, en yüksek büyüme oranları özellikle katmanlı imalatta gözlenmektedir [3].

Döküm metalürjisine kıyasla, TM ürünlerinin toplam tonajı düşüktür; ancak TM'deki katma değer önemli ölçüde daha yüksektir. TM üretimi iki ürün grubu için seçilir, TM malzemeler ve şekillendirilmiş TM bileşenleri. TM malzemeleri için, TM yolu, belirli özelliklere sahip ürünleri elde etmenin en iyi yoludur. Tipik örnekler, WC-Co sert metallerdir. Klasik döküm metalürjisiyle erişilemeyen gözenekli kendinden yağlamalı yataklar TM malzemelere örnek verilebilir. İkincisi için yani şekillendirilmiş TM bileşenleri için, malzeme ve özellikleri, TM'yi seçmenin ana nedenidir ve ürünün şekli ikincil öneme sahiptir. TM malzemeleri genellikle tabakalar veya çubuklar gibi basit şekillere sahiptir. Şekilli TM bileşenleri için, karmaşık geometrik şekil ve kesinlik birincil gereksinimlerdir [4], oysa bazı özellikler, özellikle mekanik özellikler, işlenmiş parçalara göre daha düşük olabilir. TM'nin temel faydası ekonomiktir: büyük üretim hassasiyeti için TM, klasik metal işleme tekniklerinden genellikle daha ucuzdur. Daha düşük malzeme ve enerji kullanımı TM'yi "çevreye dostu" bir teknoloji yapar. TM ile üretilen parçaların tipik örnekleri, özellikle pres ve sinter yolu ile üretilen motor ve şanzımanlardan gelen otomotiv bileşenleridir. Ayrıca, MIM veya eklemeli üretim tarafından üretilen

şekillendirilmiş numuneler için, TM, diğer metal işleme yolları için geçerli olan şekil sınırlamalarının üstesinden gelme şansı sunar [3].

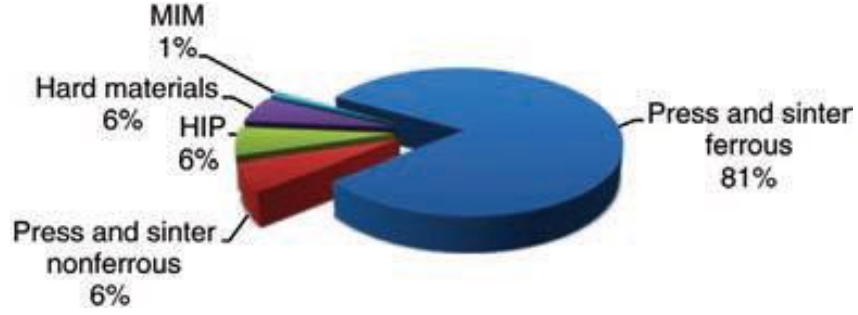
1.1. TARİHSEL ARKA PLAN

Toz metalurjisi genellikle modern bir metal işleme tekniği olarak kabul edilir ve asıl gelişimi 20. yüzyılın başlarında başlamıştır [4,5]. Ancak yüzyıllar boyunca, en azından orta çağın sonlarına kadar demir eritememiştir ve bu nedenle tüm demir esaslı ürünler modern toz dövme benzer bir şekilde katı hal metalurjisi [6,7] ile elde edilmiştir. Müzelerde sergilenen silahlar ve zırhlar bir tür “toz dövme” tekniği ile üretilmiştir. Bu erken dönem toz metalurjisi teknolojisinin etkileyici diğer bir örneği, yaklaşık yedi metre uzunluğunda ve altı ton ağırlığındaki MS 5. yüzyılda üretilmiş olan ünlü Delhi sütunudur [8]. 18. yüzyılda kok yakıtlı fırının ortaya çıkmasıyla, çok daha yüksek sıcaklıklara çıkılabilmştir. Bu olay ile döküm metalurjisi üretime hâkim olmuştur ve 19. yüzyılın başlarında Rusya'da üretilen platin ruble gibi bazı istisnalar dışında toz teknikleri geri planda kalmıştır. Modern toz metalurjisi, elektrik lambasında kullanılan tungsten (W) filament tellerin üretilmesi ile C. Auer Von Welsbach tarafından [9] denenmiştir. O zamanlar, W'ın eritilmesi neredeyse imkânsızdı ve toz metalurjisi, dövülebilen ve daha sonra filamentlere çekilebilen W çubuklarını elde etmenin tek yolu oldu [10]. W filament tasarımı, TM ile oldukça ilgili başka bir buluşla sonuçlanmıştır. Çekme kalıplarına duyulan ihtiyaç, karbürler gibi sert, aşınmaya dayanıklı malzemelerle ilgili çalışmaları başlatmıştır. Bununla birlikte, elde edilen ürünler, 1923'te Schröter ve Skaupy'nin, Berlin'de tungsten karbürü demir grubu metalleriyle, özellikle kobaltla birleştirene ve metalik bağlayıcının eridiği bir sıcaklıkta sinterleyerek ilk sert metali üretene kadar çok gevrekli [11]. İkinci yenilik, katı hal kimyası yoluyla tungsten karbürün senteziydi. Devrim yaratan başka bir atılım ise, F. Krupp, Essen tarafından Widia markası altında piyasaya sürülen sert metal kesme takımlarıydı. Hem klasik sert metal hem de kübik karbürler üzerine araştırmalar ve sert metal sektöründeki diğer yenilikler; sermet olarak bilinen TiCN bazlı ürünler ve özellikle metal kesmede gelişmiş performans sunan ultra ince ürünlerdir. Aynı zamanda <100 µm [12] çapında elektronikler için mikro matkapların üretimini mümkün kılınmıştır.

TM pres ve sinter işleminin şekillendirme yetenekleri, özellikle hassas parçaların büyük ölçekli üretimi için, 1930'larda Amerika Birleşik Devletleri'nde TM tarafından arabalar için yağ pompası dişlileri yapıldığında tanınmıştır. Ateşli silahlar için çok düzeyli TM parçalarının üretimi, seramik bileşenler için bilinen sıkıştırma tekniklerini metalik tozlara uyarlayarak II. Dünya Savaşı sırasında Almanya'da başlamıştır [3]. Savaşın sona, otomotiv uygulamalarına olan talep ve üretilen parçaların karmaşıklığı artmıştır. Mekanik performansa yönelik daha yüksek gereksinimler, örneğin Ni – Cu – Mo difüzyonla bağlanmış tozlardan [13] veya daha sonra Cr ve Cr-Mo alaşımli türlerle hazırlanan çelikler gibi özel alaşımli kalitelerin birleştirilmesiyle karşılanmıştır. "Sinter-sertleştirme" işleminde sinterleme ve ısı işlemin, gözenekli mikroyapıyı yoğunlaştırarak özellikle dişliler için oldukça başarılı olduğu kanıtlanmıştır [14]. Dinamik ve/veya döngüsel olarak yüklenmiş bileşenler için örneğin otomotiv biyeller için, darbeli sıcak toz dövme [15] işleminin uygun olduğu kanıtlanmıştır [3]. Tek eksenli kalıp sıkıştırma sınırlamaları, 1980'lerde metal enjeksiyon kalıplama (MIM) teknolojisinin getirilmesiyle aşılmıştır. Bu işlem, polimer enjeksiyon kalıplamanın şekil esnekliği ile TM'nin [16,17] malzeme esnekliğiyle birleştirmiştir. MIM teknolojisi, aynı zamanda bir üretim hattı kurmak için gereken düşük yatırım nedeniyle 1990'lardan beri önemli büyüme oranlarını görmüştür. En yeni TM üretim rotası, 1990'lardan beri bilinen eklemeli imalattır [18]. Günümüzde toz metalürjisi, bir partikül teknolojisi olarak, özellikle piller, kondansatörler gibi elektrik ve elektronik uygulamalar için fonksiyonel malzemelerin üretiminde de kullanılmaktadır.

1.2. EKONOMİK YÖNLER

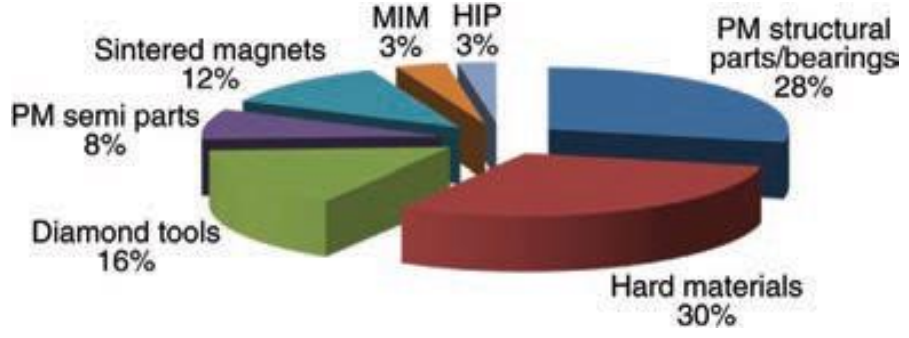
Toz metalürjisinde ana tonaj, tek eksenli kalıp sıkıştırma ve sinterleme (Şekil 1.1) ile üretilen ve yaklaşık $1,6 \times 10^9$ ton sıvı-metal yoluyla üretilen çeliğe kıyasla dünya çapında yılda 1×10^6 tondan biraz daha az demir ve çelik tozu tüketen demirli parçalardan oluşur [3].



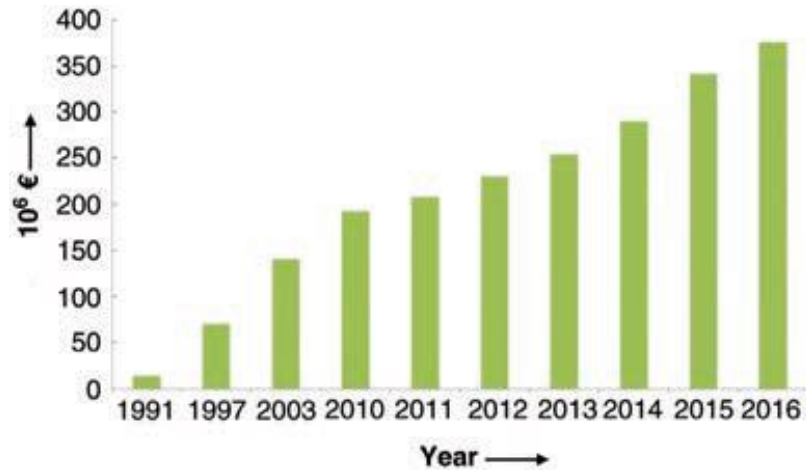
Şekil 1.1. 2016 yılında tonaj bazında Avrupa TM üretimi (ETMA) (toplam: 248×10^3 ton) [3].

TM demirli parçalar, dünya çapında tahmini 15×10^9 \$ tutarında bir yıllık ciro üretir. Otomotiv endüstrisine güçlü bir bağımlılık vardır çünkü yanmalı motorlar ve şanzımanlar gibi otomobillerde üretilen parçaların yaklaşık %75'i, özellikle iç kısımdaki bileşenlerdir [19]. Araba sürüş sistemlerinde hibrit ve elektrikli yönlerde doğru beklenen değişikliklerle ilgili olarak otomobillerde, TM parça üreticileri, TM ürünleri için uygulamalar bulma konusunda büyük baskı altındadır. Ciro ile ilgili olarak, baskın TM ürünleri sert metaldir (Şekil 3) ve yıllık 75000 ton ve tonajında yaklaşık 18×10^9 \$ ciro katkısı vardır. Sert metaller olarak metal ve ahşap kesme, kaya delme ve inşaat ana uygulama alanlarıdır [3].

W ve Co gibi unsurlar zaman zaman aşırı madencilığe yönelik çevresel endişeleri artırmaktadır; bu nedenle, kullanılmış aletlerin sistematik geri dönüşümü önerilmektedir. Kısmen, otomotivden medikal ürünlere kadar, MIM parçalarını ekonomik döngülere preslenmiş ve sinterlenmiş parçalara göre daha az hassas kılın geniş uygulama yelpazesi sayesinde 1990'lardan beri MIM istikrarlı büyüme oranlarıyla karşılaşmıştır [20]. Pazarın yaklaşık $1,15-1,4 \times 10^9$ \$ / yıl olduğu tahmin edilmektedir [21]. Katmanlı imalat, daha düşük bir seviyede olmasına rağmen, daha yüksek büyüme oranlarıyla karşılaşmıştır. Katmanlı imalat, esas olarak katmanlı imalatın benzersiz şekillendirme yeteneklerinin kullanılmasıyla mümkün olan ağırlık azaltmanın bir sonucu olarak tıbbi uygulamalarda ve havacılık endüstrisinde yüksek miktarda parçaların üretimini arttırmıştır (Şekil 1.2 ve Şekil 1.3) [3].



Şekil 1.2. 2016 yılında ciroya göre Avrupa TM üretimi (ETMA) [3].



Şekil 1.3. Avrupa'da MIM pazarının (ETMA) büyümesi [3].

BÖLÜM 2

TOZ ÜRETİMİ VE TOZ KARAKTERİZASYONU

2.1. MEKANİK YÖNTEMLER

TM ürünleri için toz üretimi, mekanik ve kimyasal yöntemlere ayrılabilir. Nihai özellikler ve fiyat; hammadde maliyetine, üretim yöntemine, parçacık şekline, boyutuna ve dağılımına, safsızlıklara ve oksijen duyarlılığına büyük ölçüde bağlıdır [22,23]. Metal tozu üretmek için katıların (faz değişimi olmadan) ve sıvıların (faz değişimli) parçalanması uygulanabilir [3].

2.1.1. Faz Değişimi Olmadan Toz Üretimi

Frezeleme veya tornalama gibi işleme teknikleriyle ince tozların üretilmesi, toz üretiminin en kolay yollarından biridir, ancak aynı zamanda en pahalı olanlarından biridir çünkü bu işlemlerin üretkenliği nispeten düşüktür ve kirlenme tehlikesi yüksektir. Bu nedenle, sadece aşırı pahalı malzemeler üretmek için ve özel amaçlar için uygulanır [3].

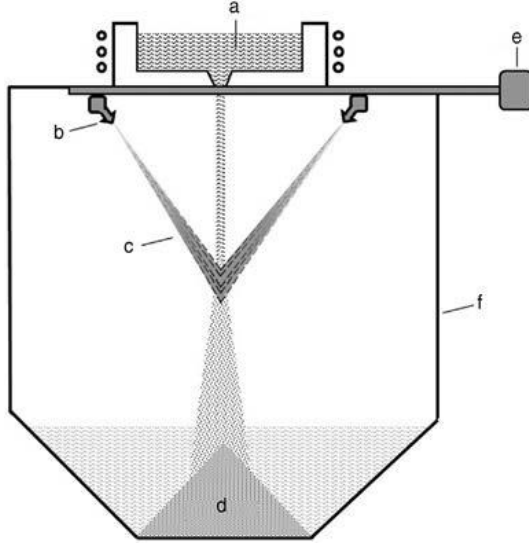
Kırılgan malzemeler için bilyalı değirmenlerde öğütme işlemi gerçekleşir. Malzeme, sert bilyelerin çarpması, sıkıştırılması ve kesilmesi ile gerilir ve son olarak daha küçük parçacıklara parçalanır. Kırılgan malzemeler parçalanmaya daha duyarlıdır. Öğütme ile üretilen çoğu metal için ortalama parçacık boyutu $> 100 \mu\text{m}$ 'dir ve ortalama parçacık boyutu, tozun sünekliliğine ve işleme koşullarına (özellikle sıcaklık) bağlı olarak sabit bir değere yaklaşır. Kırılgan seramikler veya metaller $< 1 \mu\text{m}$ partikül boyutlarına indirilebilir. Tipik değirmenler; tamburlu bilyalı değirmenler, titreşimli değirmenler ve aşındırıcılardır. Jet değirmenler, partikül yüklü bir gaz akışının yüksek hızda dönme hareketine dayanmaktadır. En büyük avantajı,

yüksek enerjili öğütme işlemleri gibi öğütme yardımcılarının (bilyeler vb.) olmaması nedeniyle kirliliklerin sınırlı olmasıdır.

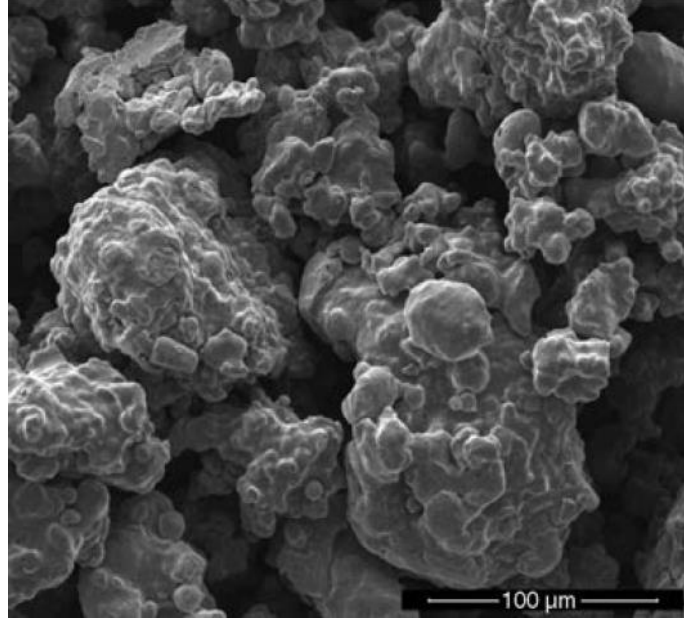
Frezeleme genellikle sıcaklık yönetiminin iyileştirilmesi gerektiğinden sıvılarda (örneğin 2-propanol) işlemeyi gerektirir. Öğütme, tozların sık sık kırılması ve yeniden kaynaklanmasıyla mikroyapının incelmesini sağlar ve son olarak, farklı element tozlarının karışımlarının öğütülmesi veya ince sert parçacıkların (Y_2O_3 , ZrO_2 , Al_2O_3) homojen dağılımlarının elde edilmesi için mekanik alaşımlama kullanılabilir. Öğütme, enerji yoğun bir süreç olduğundan, maliyetler yüksektir ve kirlilik riski vardır. Değirmen ve bilyelerin aşınmasıyla kirlenme oluşur. Bu nedenle, süreç yalnızca başka bir büyük ölçekli üretim tekniği yoksa kullanılır. Öğütme işlemi sonunda dislokasyon yoğunluğunda $10^{15} m^{-2}$ 'ye kadar bir artışa yol açar ve bu nedenle sıkıştırılabilirliği azaltır. Çoğu durumda, kullanımdan önce tozlara gerilim giderme ısıl işlemi uygulanması gerekebilir [3].

2.1.2. Atomizasyon Yöntemiyle Toz Üretimi

Gazlar, su, yağ veya mekanik dispersiyon kullanılarak parçalanabilir. Atomizasyon, TM parça üretimi için metal tozları elde etmenin en modern ve üretken yoludur (parti başına 50 tona kadar). Dünya çapındaki demir ve çelik tozlarının çoğu, su atomizasyon tekniği ile üretilmektedir. Su atomizasyonunun prensibi, bir tandiştteki bir nozülden sağlanan serbest düşen eriyik akışını su jetleri ile parçalamaktır (Şekil 2.1). Parçalanmış eriyik hemen katılaşır ve yüzey oksitlenir. Toz-su bulamacı toplanır, kurutulur ve ardından hidrojen ile indirgenir. Yöntem, demir ve çelik tozları (Mo, Ni veya Cr ile alaşımlı), paslanmaz çelik tozları, bakır ve bakır alaşımları üretmek için kullanılabilir [3].



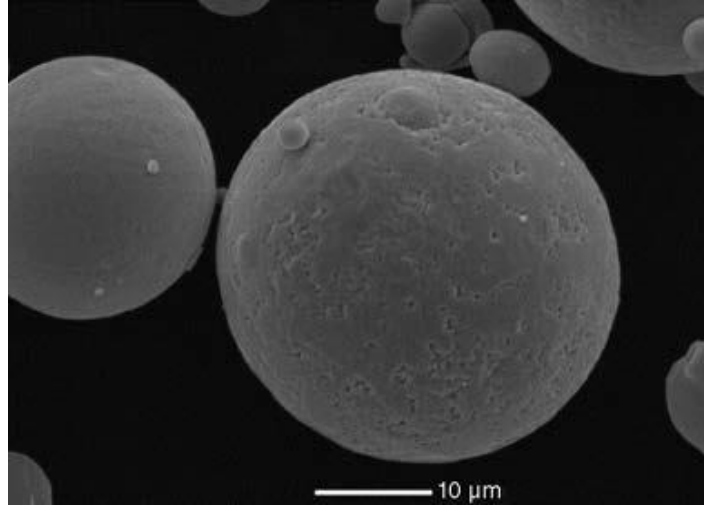
Şekil 2.1. Bir su atomizörünün temel düzenlemesi a) Eriyik, b) Jet, c) Su spreyi, d) Toz, e) Basınç kaynağı, f) Oda [3].



Şekil 2.2. Tipik su atomize toz (ASC 100.29, Höganäs AB) [3].

Nihai tozlar, parçacıkların birbirine kenetlenmesiyle iyi ham mukavemet sağlayan düzensiz bir şekle sahiptir (Şekil 2.2). Süreç birçok değişkeni içerir: erimiş malzemenin sıcaklığı ve kızgınlık miktarı (bileşimle ilgili), metale su püskürtme miktarı (1 kg üretilen toz başına 10-15 L), erimiş metal akışının çapı, nozülün geometrisi (su jeti miktarı ve su jeti ile erimiş metal akışı arasındaki geliş açısı) ve su basıncı. Su jetlerinin olağan basıncı (<15 MPa) 30–100 µm parçacık boyutlarına

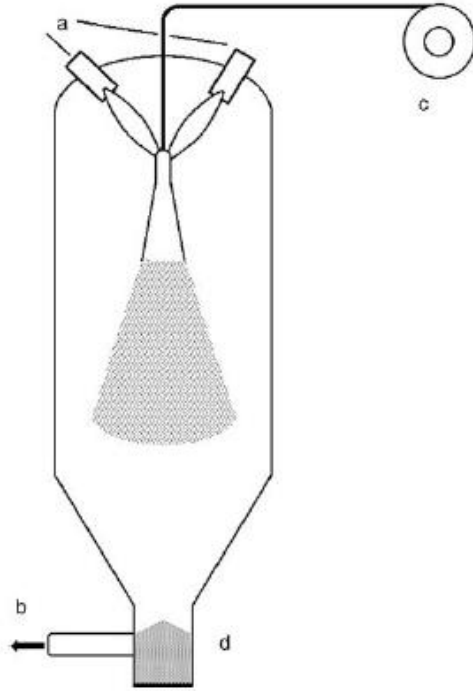
neden olur. 3 ile 30 μm arasında partikül boyutları üretmek için yüksek basınç (60 MPa'ya kadar) veya özel yöntemler kullanılır. Bu yöntemlerin önemi, büyüyen MIM ve katkı tekniklerinin kabul edilebilir maliyette ince tozlar gerektirmesi nedeniyle artmıştır. İnert gazlarla atomizasyon, oksijene duyarlı elementlerden toz üretmek için kullanılır, çünkü su atomizasyonu uygulanamaz [24–26].



Şekil 2.3. Tipik gaz atomize toz (Böhler S390) [3].

Gaz atomize tozların tipik şekli küreseldir (Şekil 2.3), bu da yüksek yoğunlukların ve akış hızlarının gerekli olduğu uygulamalar için (sıcak izostatik sıkıştırma, MIM, katkı maddesi imalatı) gereklidir. Gazın enerji girişi suya kıyasla çok daha düşük olduğundan, ince partiküllerin üretimi örneğin aşırı yüksek gaz hızlarına izin veren özel nozullar kullanımı gibi özel teknikler gerektirir [27]. Günümüzde atomizasyon için en sık kullanılan gaz nitrojendir, ancak bu gaz argonun aksine tamamen inert değildir. Bununla birlikte, argonun metallerde çözünmezliği, bir dezavantaj olan gözenekli veya içi boş kürelere yol açabilir, çünkü Ar ile doldurulmuş gözenekler daha sonraki bir aşamada kapatılamaz. Bazı durumlarda, örneğin alüminyum ve alaşımları için (1980'lere kadar demir ve çelik için) bir atomize edici ajan olarak hava da kullanılabilir. Yağ atomizasyonu özel güvenlik önlemleri gerektirir. Su atomizasyonunun doğasında olan toz yüzeylerinin oksidasyonunun, bir miktar karbon toplanmasının meydana gelebilmesine rağmen önlenmesi avantajına sahiptir [3].

Özel atomizasyon teknikleri, titanyum ve Ti alaşımları gibi bazı malzemeler için, potlarla erimiş metalin etkileşmemesi gereken teknikler gerektirir. Dönen bir elektrottan santrifüj kuvvetleriyle parçalanma, malzemeyi bir elektrotla temas etmeden parçalamak için kullanılır. Malzemenin eritilmesi, dönen elektrotun ön yüzündeki bir elektrik arkı veya plazma torçuyla gerçekleştirilir. Merkezkaç kuvvetleri ve yavaş eriyik beslemesi, proses argonda gerçekleştirildiğinden en yüksek saflıkta ince tozlara yol açar. Dezavantajı, bu yöntemlerin düşük üretkenliğidir. En yüksek kalitede titanyum ve Ti alaşımlarına olan artan talep, atomizasyon odasına bir metal tel veya külçe sokulduğu ve ön yüzünde bir plazma tarafından eritildiği plazma atomizasyonuna yol açmıştır (Şekil 2.4). Endüktif olarak birleştirilmiş plazma yöntemleri ayrıca ezilmiş, atomize edilmiş ve süngerli tozları gözeneksiz küresel tozlara dönüştürmek için kullanılır [3].

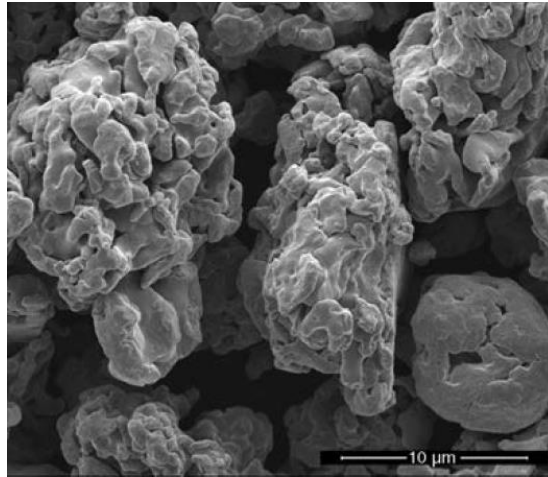


Şekil 2.4. Plazma atomizasyon prensibi; a) Plazma torçları, b) Vakum pompası, c) titanyum makara, d) Toz toplama [3].

2.2. KİMYASAL YÖNTEMLER

2.2.1. Katılarla İndirgeme

Metal tozu üretiminin klasik yöntemi cevherin indirgenmesidir. Başlangıç ürünü saflaştırılmış demir cevheridir (manyetit, Fe_3O_4). Bu malzemenin ince tozlara öğütülmesi, kırılgenliği sayesinde kolaydır [3]. Cevher, SiC tüplerinde kok ve kireçtaşı karışımıyla (koktan sülfürü bağlamak için) ve uzun (yaklaşık 260 m) bir fırında $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'ye ısıtıldı. Son indirgeme ajanı, cevheri demir bir süngere indirgeyen karbon monoksittir. Sünger daha sonra ezilir ve elenir. Kalan oksijeni gidermek için hidrojenle son bir ısıl işlem, istenen $40\text{-}150\text{ }\mu\text{m}$ partikül boyutuna sahip sünger demir tozuna yol açar. Bu tozun en belirgin özelliği ise parçacıkların iç gözenekliliğidir, bu nedenle "sünger demir tozu" olarak adlandırılır (Şekil 2.5) [3].



Şekil 2.5. Tipik sünger demir tozu (NC 100.24, Höganäs AB) [3].

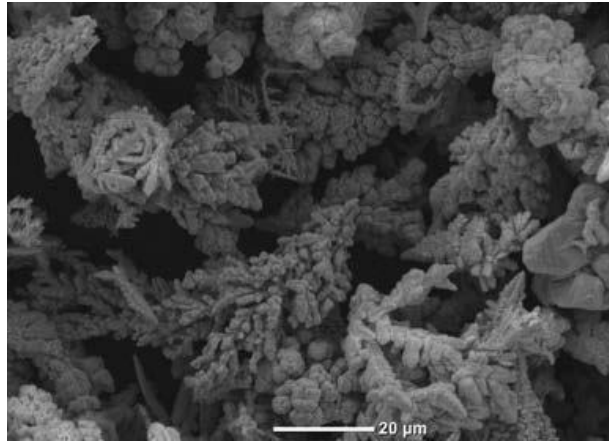
2.2.2. Gazlarla İndirgeme

Nihai karbon içeriğinin son derece düşük olması gerektiği için karbonun kullanılmadığı cevherlerin indirgenmesi için, genellikle hidrojen indirgeyici ajan olarak kullanılır. Demir için, bu işlem genellikle ekonomik olarak rekabetçi değildir; ancak, laboratuvar kullanımı için kolay bir yoldur. Hidrojen indirgeme ile WO_3 ve MoO_3 'ten (tungsten, tungsten alaşımları) tungsten ve molibden üretimi için standart süreçtir. Özellikle W tozları için, toz boyutu teknedeki WO_3 yatağının yüksekliği ile

tanımlanabilir. Düşük doldurma yüksekliği, son derece ince toza yol açar. MoO₃ genellikle iki aşamada azaltılır. Ni ve Co tozları, basınçlı H₂ ile sulu çözeltilerden indirgenebilir [3,27].

2.2.3. Elektrokimyasal İndirgeme

Sulu çözeltilerden elektroliz yoluyla üretim; bakır, demir, nikel ve kobalt, krom ve mangan için de geçerlidir. İşlem, anottan çözünmeyi ve katotta çökelmeyi içerir. Parçacık boyutu, boyut dağılımı ve şekli; elektrik akımı yoğunluğu, sıcaklık, konsantrasyon, asitlik ve banyo hareketiyle belirlenir. Genellikle dendritik tozlar elde edilir (Şekil 2.6). İşlem aynı zamanda saflaştırıcı bir elektroliz olarak da kabul edilebildiğinden, elde edilen tozlar çok temizdir. Son adım, gerinim sertleşmesini yeterince gidermek için tozun hafif öğütülmesi ve tavlama işlemidir [3].

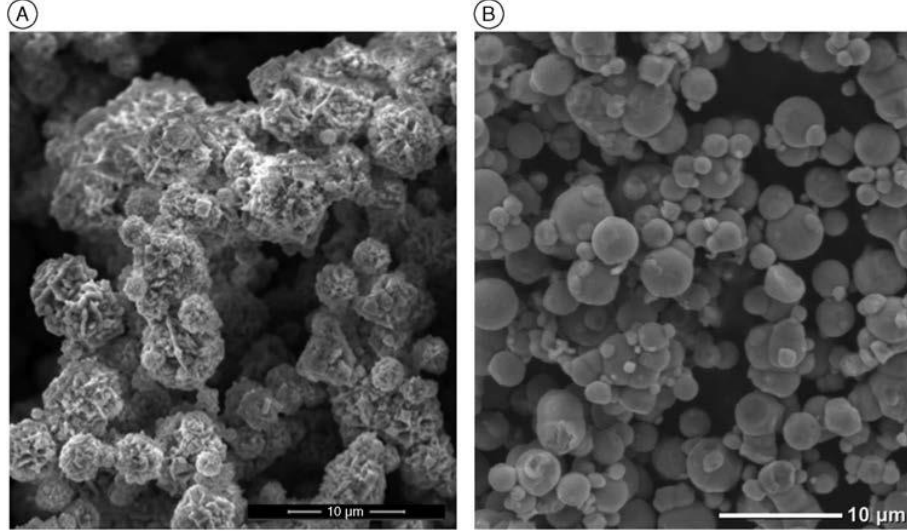


Şekil 2.6. Tipik elektrolitik bakır tozu [3].

2.2.4. Karbonil Yöntemi

Esas olarak ince demir ve nikel tozları üretmek için kullanılır. Karboniller, hürdanın (örneğin Ni içeren Fe alaşımı) CO ile reaksiyona sokulmasıyla üretilir. Yüksek basınçta (30 MPa) ve sıcaklıkta (200–250 °C), sıvı karboniller damıtılır ve çoğunlukla ince küresel toz oluşturmak için aynı basınç aralığında ayrıştırılır. Ni tozları, Fe tozlarına kıyasla genellikle düzensiz yüzeye sahiptir (Şekil 2.7). Demir tozları bir miktar karbon içerir; C içermeyen kaliteler elde etmek için

dekarbürizasyon tavlama gereklidir. Üretilen tozlar genellikle çok düşük metalik safsızlık içeriklerine sahiptir. Süreç enerji tüketmesine ve tehlikeli kimyasallar içermesine rağmen, ince tozlar (MIM) için yüksek fiyatları tolere ederse Ni tozu ve demir için ana üretim yoludur [3].



Şekil 2.7. Tipik karbonil-metal tozu a) Nikel, b) Demir [3].

2.2.5. Katılarla (Karbürler) Reaksiyon

Karbürler, çimentolu karbürler için ana hammadde olarak, genellikle karbonla reaksiyonla üretilir. WC, tungsten tozunun istenen partikül boyutu (0.5–5 µm) ve karbonun yoğun şekilde karıştırılması ve ardından 1400–2000 ° C'de grafit tüplü fırınlarda hidrojenle reaktif tavlama ile üretilir [34]. TiC, NbC ve TaC, 1700–2300 ° C'de vakumda oksitlerinden (TiO₂, Ta₂O₅, Nb₂O₃) doğrudan indirgeme ve karbonlama yoluyla üretilir. Reaksiyon ürünleri bilyalı değirmenlerde toz haline getirilir [3].

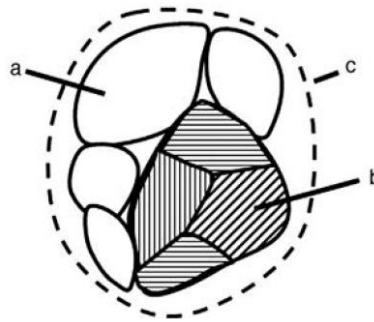
2.3. TOZ KARAKTERİZASYONU

2.3.1. Fiziksel özellikler

Partikül boyutunun belirlenmesi, büyük ölçüde ölçüm tekniğine, ölçülen spesifik parametreye ve partikül şekline bağlıdır. Farklı tanımlar kullanılmaktadır. En

önemlileri; parçacığın elek analizinde, geçeceği minimum kare açıklığın genişliği olan elek çapı, öngörülen alan çapı ve rastgele yöndeki parçacık gibi parametrelerdir [3].

Boyut belirleme için en yaygın teknik ise yansıtılan alan çapını sağlayan lazer kırınımıdır. Kesin boyut yalnızca ışık ve taramalı elektron mikroskobu ile belirlenebilir. Veriler logaritmik normal olasılık koordinatlarına yerleştirilmişse, parçacık boyutu ile kümülatif kütle kesri arasında doğrusal bir ilişki olan Gauss dağılımlarını sağlar [24]. Boyut dağılımını belirlemenin en basit yolu, yukarıdan aşağıya doğru azalan bir ağa sahip bir elek kolonunda elemektir. Yöntem, $> 30 \mu\text{m}$ tozlarla sınırlıdır. Standart bir yöntem, lazer kırınımı ile ışık saçılımı kullanmaktır; burada, öngörülen alan çapı ölçülecektir. Ayrıca, Fisher alt boyut siever (FSSS) hala yaygın bir tekniktir, ancak yöntem herhangi bir boyutu değil bir yüzey alanını ölçmektedir [3]. Yöntem, hafif sıkıştırılmış bir toz yatağından geçen bir gazın basınç düşüşüne dayanmaktadır. Genel olarak, elde edilen sonuçlar yöntemden yönteme farklılık gösterir. Çoğu teknikte, küresel veya en azından eş eksenli bir parçacık şekli varsayılır. Şekil, tozun davranışı üzerinde büyük etkiye sahiptir. EN ISO 3252 [28] dokuz farklı şekli (sivri, köşeli, dendritik, lifli, pul pul, taneli, düzensiz, yumrulu, sferoid) tanımlar. Ayrıca, “partikül”, “tane” ve “aglomera” olarak ayırt edilir (Şekil 2.8).



Şekil 2.8. Ölçülen varlıkların tanımı a) Partikül, b) TANE, c) AGLomera [3].

2.3.2. Kimyasal özellikler

Kimyasal bileşim açısından iki grup toz ele alınmaktadır. Genellikle nispeten yüksek saflıkta malzemeler olan temel tozlar için kimyasal analiz, safsızlık içeriğine odaklanır. Önceden alaşımlı kombinasyon için, alaşım bileşimine daha fazla dikkat edilir [3]. Her iki tür toz için analiz üç kategoriye ayrılabilir.

Toplu analiz, tozun genel kimyasal bileşimini verir. Ana bileşenleri ve safsızlıklar ve faz dağılımı hakkında bilgi gerekiyorsa, X-ışını toz kırınımı (XRD) kullanılır; yapısal analiz mikro ölçekte yapılırsa, elektron geri saçılmış kırınım (EBSD) gerçekleştirilir. Karbon, hidrojen, nitrojen ve oksijen gibi ara elemanlar için, özel inert gaz füzyonu ve yakma teknikleri mevcuttur.

Tozun davranışını önemli ölçüde etkileyen yüzey bileşimini belirlemek için özel teknikler gerektirir. X-ışını fotoelektron spektroskopisi (XPS) yüzey bileşimi hakkında bilgi verir. Auger elektron spektroskopisi (AES), ilk birkaç katmandaki elemental dağılım hakkında bilgi sağlar.

Yüzeylerin ve toz bölümlerinin mikro analizi için, enerji dağıtıcı X-ışını spektrometresi (SEM-EDX) ile birlikte taramalı elektron mikroskobu (SEM) genellikle kullanılır.

2.3.3. Teknolojik Özellikler

Tozların en önemli teknolojik özellikleri; akış davranışı, görünür (yığın) yoğunluk, ve sıkıştırılabilirliktir. Bu özellikler genellikle ISO veya ASTM standartları tarafından tanımlanan yöntemler kullanılarak test edilir.

Akıcılık

Yöntem, ISO 4490'de açıklanmıştır. Yöntem, Hall akış ölçeri (2,5 mm delikli ve 60 ° açılma açılı bir huni olan) kullanır ve 50 g tozun delikten akması için gereken süreyi ölçer. Görünür yoğunluk: Yöntem, ISO 3923'de açıklanmıştır. Fazla tozu çıkardıktan

sonra bir kabın hacmine (25 cm³) bölünmüş bir kaba Hall hunisinden serbestçe akan toz kütleini ölçer. Hem görünen yoğunluk hem de akış hızı yağlayıcılardan etkilenir ve doldurma hızı ve dolayısıyla üretkenlik için doldurma işleminin bir gösterge olarak kullanılabilir [3].

Sıkıştırılabilirlik

Yöntem ISO 3927'de açıklanmıştır. Tozun bir çelik veya sert metal kalıpta (silindirik veya dikdörtgen) farklı basınçlarda (200–800 MPa) tek eksenli sıkıştırılmasıyla karakterize edilir. Sonuçta elde edilen kompaktın yoğunluğunun müteakip ölçümü yapılır. Bu yöntem, sert metallerin tozlarına uygulanmaz. Sıkıştırılabilirliği etkileyen ana faktörler şunlardır; sıkıştırma basıncı, parçacık şekli/boyutu, parçacık gözenekliliği, yağlayıcılar/organik içerik, tip ve toz bileşimi şeklinde sıralanabilir [3].

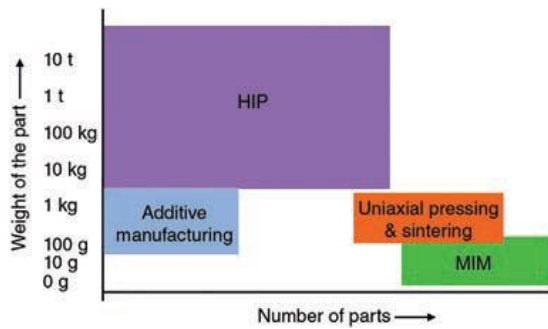
Tutarlılık

Büyük partilerin seri üretimi için, teslim edilen tozların tüm özelliklere göre "tutarlılığı" son derece önemlidir. Bu, yalnızca tüm üretim süresi boyunca (bazen yıllar) yukarıda belirtilen tüm özellikler açısından aynı kaliteyi sağlayan tozun uygulanabilir olduğu takımların ve tüm ardışık süreçlerin büyük ölçüde uyarlanması anlamına gelir. Sonuç, büyük toz üreticilerinin proseslerini yalnızca "sentetik" toz satılacak şekilde uyarlamış olmalarıdır. Bu, üretilen toz partilerinin boyut, kimyasal bileşim vb. açılardan ayrılması ve daha sonra fraksiyonlardan yıllar boyunca aynı kalitede teslim edilmesini sağlayan bir toz karışımı üretilmesi anlamına gelir. Genel olarak tutarlılık, endüstriyel olarak kullanılan tüm tozların en önemli tek özelliğidir [3].

BÖLÜM 3

TOZ METAL PARÇA ÜRETİMİ

Toz metalurjisi, tozları belirli bir yoğunluk seviyesi ile istenen şekle getirmek için pek çok işlemi içerir. TM parçalarını şekillendirmenin en yaygın yöntemi tek eksenli sert kalıplarda sıkıştırma (kalıp sıkıştırma), büyük serilerin üretimi için çok uygun, uygun maliyetli bir tekniktir. Sıkıştırma işlemlerinde, yoğunlaştırma ve şekillendirme aynı anda gerçekleşir ve genellikle yerel olarak değişen yoğunlukta ham kompaktlar sağlar. Yoğunlaştırma gradyanları, ortam sıcaklığı ile bir dereceye kadar aşılabilir. Metalik tozları bir polimer ile karıştırarak ve bu tür karışım adı verilen besleme stoğunu bir kalıba (MIM) enjekte ederek tozları düşük basınçlarda şekillendirme imkanı da vardır. Daha spesifik işlemler, toz dövme, ekstrüzyon ve haddelemedir. Hızla ortaya çıkan bir alan, katman katman malzeme ekleyerek 3B bileşenleri oluşturmak için metalik tozlar kullanan katmanlı üretimdir. Genel olarak, tek eksenli kalıp sıkıştırma ve MIM teknolojileri, büyük serilerdeki küçük parçalar için kullanılır ve HIP ve eklemeli üretim, küçük veya orta seriler için daha uygundur (Şekil 3.1). Katmanlı üretim, büyük tasarım özgürlüğü sağlar ve birkaç gramdan birkaç kilogram kadar parçaları üretmek için çok uygundur. HIP, ağ şekline yakın devasa parçaların üretimine izin verir. Ayrıca, belirli bir performans düzeyine ulaşmak için farklı teknikler birleştirilebilir. Örneğin, HIP, yoğunluk seviyelerini artırmak için genellikle basınçsız sinterleme gibi diğer tekniklerin tamamlayıcısı olarak kullanılır [3].



Şekil 3.1. Farklı TM şekillendirme teknolojilerinin konumlandırılması [29].

3.1. KALIP SIKIŞTIRMA

Yılda üretilen parça sayısı açısından, tek eksenli kalıp sıkıştırma, metalik tozları şekillendirmek için baskın teknolojidir. Toz partikülleri, üst ve alt zımbalar yoluyla basınç uygulanarak sert bir kalıpta sıkıştırılır. Toz, sert bir kalıp boşluğuna dökülür ve sıkıştırma dikey bir hareketle sağlanır. Sıkıştırma basınçları normalde yaklaşık 150-900 MPa'dır (demir içeren parçalar için genellikle 400-600 MPa) [30,31]. Bazı durumlarda, daha yüksek yoğunluklara ve daha yüksek performans seviyelerine ulaşmak için 1000 MPa civarındaki basınçlar kullanılabilir. Bununla birlikte, soğuk presleme tam yoğunluğa sağlamaz ve her zaman bir miktar gözeneklilik kalır [32]. Tek eksenli kalıp sıkıştırmada, zımbalar sadece dikey yönde hareket ettirilir. Toz ve kalıp duvarları arasındaki sürtünmenin bir sonucu olarak, eksenel gerilim (sıkıştırma yönündeki gerilim), temas alanlarında daha büyüktür. Bu nedenle, kompaktta kaçınılmaz olarak bir yoğunluk gradyanı meydana gelir. En yüksek yoğunluk hareketli zımba yüzünün yanında ve en düşük ise sabit zımba yakınında meydana gelir. Çift etkili presleme veya yüzen bir kalıbın kullanılması, sürtünme etkisini telafi etmek için kalıbı hareket ettirerek yoğunluk gradyanını azaltır [33]. Bu durumlarda, kompaktın orta kısmında bir nötr bölge (daha düşük yoğunluklu bölge) oluşturulur.

Kalıbın sıkıştırılması sırasındaki sürtünme etkileri, yağlayıcıların toz halinde (metal tozu ile karıştırılmış) kullanılması veya kalıp duvarlarına ince bir kaplama olarak uygulanması ("kalıp duvar yağlaması") şeklindedir. Yağlanmış toz karışımlarında kullanılan yağlayıcı miktarı genellikle kütle olarak % 1'in altında olmasına rağmen, bu hacimce yaklaşık % 5'tir, yani maksimum sıkıştırmadan sonra elde edilebilen yoğunluk % 95'ten yüksek olmayacaktır çünkü yağlayıcılar neredeyse sıkıştırılamaz. Kalıp duvarı yağlaması, karıştırılmış yağlayıcı miktarını azaltmanın bir yolu olarak kullanılabilir. Bununla birlikte, yağlayıcıyı her bir kalıp dolusunda yeniden uygulamanın pratik zorlukları, büyük ölçekli üretimler için bir sınırlamadır [3].

Tek eksenli presleme için tatmin edici yoğunluklar ve ekonomik süreçler elde etmek için kritik bir faktör, presleme aletlerinin tasarımıdır. Kalıp preslemenin ana avantajları, iyi belirlenmiş sert kalıp boşluklarına ve kalıpta preslenerek elde edilen hassas boyutsal kontroldür [3].

Kalıp sıkıştırma işleminin bir çeşidi de sıcak sıkıştırmadır. İzotermal çeşidinde, metalin akma dayanımını düşürmek için hem toz hem de presleme aletleri önceden ısıtılmıştır, bu da daha yüksek yoğunluk seviyelerini sağlar [3,34]. Genellikle, parçacıkları birbirine yapıştırmak için bir polimer kullanılır. Polimer, sürtünme kuvvetlerini önemli ölçüde azaltan ılımlı sıcaklıkların uygulanmasıyla yumuşar veya erir. Kalıp sıkıştırma için tipik toz sınıflarıyla karşılaştırıldığında, polimer kaplı bir toz genellikle sıcak sıkıştırma için kullanılır ve bu önemli ölçüde maliyeti (kullanılan polimer türüne bağlı olarak) arttırabilir. Ejeksiyon kuvvetleri, seçilen polimer türüne göre önemli ölçüde değişir. Toz ve aletler genellikle 135 ila 150 °C civarında bir sıcaklığa kadar önceden ısıtılır ve kullanılan sıkıştırma basınçları çelikler için 700 MPa aralığındadır. Bu tekniğin uygulanması için toz besleme mekanizmasındaki bir ısıtıcının yanı sıra kalıp ve zimbaların modifikasyonları gereklidir.

Birkaç pres tedarikçisi, mevcut preslere uygulanabilen toz ve alet ısıtması için yenilenmiş sistemler geliştirmiştir. Sıcak sıkıştırma, artan ham yoğunluklara izin verir. % 92'nin üzerinde bağıl yoğunluk, ham kompaktların işlenmesini kolaylaştırır. Preslenmiş ve sinterlenmiş parçaların uygulamaları, el aletleri için helis dişli çarklar, zincir dişlileri, senkronizör halkaları ve otomotiv uygulamaları için çeşitli göbekler gibi bileşenler bu teknoloji ile üretilmektedir [3,35].

Sıcak presleme işlemlerinde, toz tek eksenli olarak yüksek sıcaklıkta, en azından yeniden kristalleşme sıcaklığının üzerinde preslenir. Sıkıştırma ve sinterleme aynı anda gerçekleştiğinden, süreç aynı zamanda basınçlı sinterleme olarak da bilinir. Yüksek sıcaklıklarda sıcaklıkla indüklenen difüzyon ve basıncın bir kombinasyonu, metalin akma dayanımının altında zamana bağlı bir plastik deformasyona neden olur. Kalıp, indüksiyonla ısıtmayı da kolaylaştırmak için genellikle grafitten yapılır ve işlem, parçanın kirlenmesini önlemek için genellikle vakumda gerçekleştirilir. Maksimum sıcaklıklar ve basınçlar sırasıyla 2200 °C ve 50 MPa civarındadır. Üç farklı ısıtma teknolojisi türü kullanılmaktadır. Bunlar, indüksiyonlu ısıtma, dolaylı dirençli ısıtma ve alan destekli sinterleme (FAST)/doğrudan sıcak presleme şeklinde sıralanabilir [15,36].

3.1.1. İzostatik Presleme

Kalıp presleme, toz parçacıkları arasındaki ve toz ile kalıp duvarları arasındaki sürtünme nedeniyle heterojen yoğunluğa sahip kompaktlar ile sonuçlanır. Bu durum, kompaktlama durumunda önlenemez. Basınç, tozun kapalı esnek bir kalıba yerleştirilmesi ve kalıbın bir sıvıya (sıvı veya sıvı) sokulmasıyla elde edilen her yönden (izostatik basınç) eşit olarak uygulanır. Sıvı, esnek kalıp aracılığıyla basıncı her yöne eşit olarak iletir. Kalıp presleme ile karşılaştırıldığında, izostatik presleme, belirli bir yoğunluğa ulaşmak için daha düşük basınçlar gerektirir ve elde edilen yoğunluk dağılımı daha homojendir. Homojen yoğunlaştırma adımının ortadan kaldırılması nedeniyle kütle ve boyutlardaki sınırlamaların çoğu ortadan kaldırılmıştır. Ayrıca yağlayıcıya ihtiyaç duyulmadığından kirlilik azalır ve yüksek ve düzgün yoğunluklar elde etmek mümkündür. Öte yandan, geometrik kesinlik genellikle tek eksenli kalıp sıkıştırmasından daha düşüktür [3].

3.1.2. Enjeksiyon Kalıplama

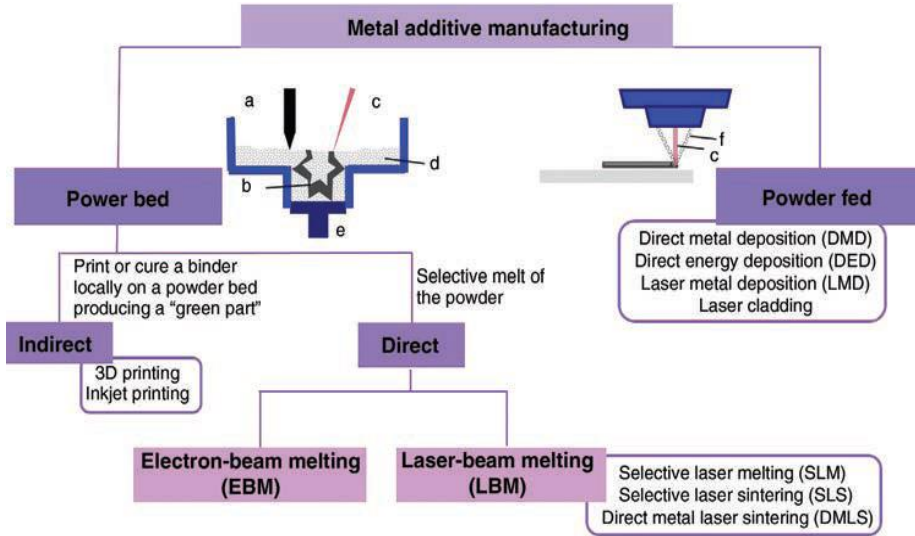
Enjeksiyon kalıplama, metalik tozların organik bir bağlayıcıyla karıştırılarak, orta sıcaklıklarda bir kalıba enjekte edilen bir "hammadde" oluşturduğu bir toz şekillendirme teknolojisidir. Gerekli şekle sahip boşluk, daha sonra bağlayıcı, bir ayrılma işlemiyle çıkarılır ve kalan toz yapısı sinterlenir. İdeal olarak, besleme stoğunda yüksek ve muntazam toz yüklemeleri elde etmek ve yüksek sinterleme aktivitesi elde etmek için çok ince tozlar kullanılır. Bağlayıcı miktarı tipik olarak hacimce % 40-50 mertebesinde. İnce toz parçacıklarının geniş özgül yüzey alanı sinterleme mekanizmalarını harekete geçirir, böylece yüksek yoğunluk seviyelerine (genellikle % 95'in üzerinde) ulaşır. Besleme stoğundaki toz yükü tekdüze ise çok iyi boyutsal toleranslar elde edilebilir. Bu teknolojinin kritik yönleri [3,31] ise; metalik toz partiküllerini ıslatan ve karıştırıldığında muntazam bir kütle oluşturan uygun bir bağlayıcı formülasyonu sahip olmasının yanı sıra ayrıca toz yapısına zarar vermeden çıkarılabilir olması gerekmektedir [3].

MIM teknolojisinin temel avantajları, çok sayıda yüksek performanslı malzemelerden karmaşık parçaları ekonomik olarak üretme imkânı, elde edilebilen

yüksek yoğunluk seviyeleri ve dar toleranslar ve çoğu malzemeyi (nikel süperalaşım, intermetalikler gibi özel malzemeler (değerli metaller, refrakter metaller ve seramik elyaf takviyeli seramik kompozitler dahil) işlemek için uygundur. Bu bağlamda MIM, polimer enjeksiyon kalıplamanın geometrik esnekliğini TM'nin malzeme esnekliğiyle birleştirir [3].

3.1.3. Katmanlı Üretim

Katmanlı imalat, 3 boyutlu bir şekil elde etmek için malzeme katmanının katman üzerine eklenmesiyle yapı parçalarına izin veren bir teknolojidir. Bu nedenle, işleme gibi eksiltici teknolojilerin aksine ek bir teknoloji olarak kabul edilir. Dijital bir 3B model, farklı teknikler kullanarak 3B bileşeni oluşturan bir makineye iletilir. Mevcut teknolojilerin sayısı son yıllarda hızla artmıştır ve farklı süreçler, örneğin kullanılan enerji kaynağı, başlangıç malzemesi (toz, tel, tabakalar veya sıvılar) ortaya çıkmıştır [3].



Şekil 3.2. Katmanlı üretim teknolojileri [3].

Şekil 3.2, bir toz bazlı metal katkı maddesi imalatının şematini ve aynı tür süreci tanımlamak için kullanılan farklı terimler içeren teknolojileri göstermektedir. Toz yatağı ve toz beslemeli teknolojiler arasında bir ayrım yapılabilir [18,37]. Toz yatağı işlemleri, daha sonra parçacıkları eriterek (doğrudan yöntemler) veya onları birbirine bağlayarak (dolaylı yöntem) bir 2D dilim olarak yerel olarak birleştirilen bir toz

tabakasının uygulanmasına dayanır. Daha sonra ikinci bir toz tabakası uygulanır ve birincisinin üzerine sağlamlaştırılır. İşlem, parça tamamlanıncaya kadar tekrarlanır [3].

Doğrudan teknolojilerde, toz katmanını seçici olarak eritmek için bir enerji ışını (lazer veya elektron ışını) kullanılır. Lazer ışını teknolojilerinde (doğrudan lazer eritme, DLM) lazer enerjisi malzeme tarafından emilir ve hızla katılaştıran bir eriyik havuzu oluşturur. Elektron ışını işlemi bir vakum odasında (105 hPa veya daha düşük) gerçekleşir. Parçalar daha sonra neredeyse artık gerilmelerden arınmış olur [3].

Dolaylı teknolojiler, 3D baskı olarak bilinir ancak 3D baskı artık DLM ve EBM için de kullanılan bir terimdir. Teknoloji, lazer ışını eritmeden daha verimlidir; oda sıcaklığında gerçekleşir ve parça yapım işlemi sırasında toz yatağı ile desteklendiği için destek yapıları gerektirmez. Tüm aşamalarda neredeyse izotermal olduğundan, distorsiyon ve artık gerilmeler, doğrudan varyantlara göre daha az sorunludur [3].

Toz beslemeli sistemlerde, toz halindeki malzeme bir nozül içinden akar ve tam olarak katılaştığı işlenmiş parçanın belirtilen yüzeyinde bir ışınla eritilir. Toz yatağı işlemlerinden daha yüksek verimlilik (yüksek biriktirme oranları sayesinde), daha iyi malzeme kullanımı ve daha büyük parçalar üretme yeteneği sunar. Hali hazırda mevcut bir parçaya malzeme eklemeye izin verdiği için metalik bileşenleri onarmak ve aynı veya farklı bir malzeme ile mevcut bir parçaya yeni işlevler eklemek için kullanılabilir. Bunun aksine, toz yatağı teknikleri, yüksek hassasiyetli parçalar ve toz besleme teknikleriyle üretilemeyen içi boş soğutma geçitleri gibi daha karmaşık özellikler oluşturmak için uygundur [3].

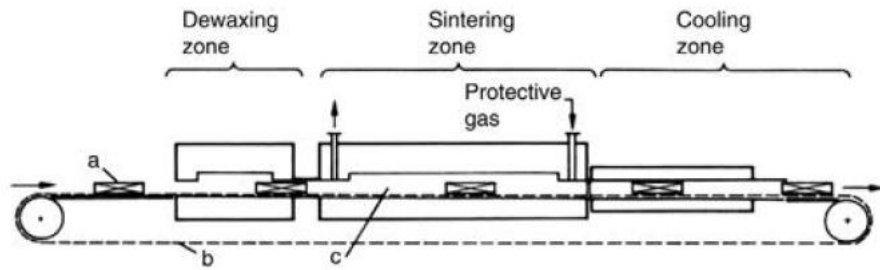
Katmanlı imalatta yaygın olarak kullanılan malzemeler titanyum alaşımları, kobalt-krom alaşımları, alüminyum ve nikeldir. Seçici eritmeye uygun yeni malzeme bileşimleri araştırılmaktadır. Doğrudan lazer eritme için, 10 ile 50 µm arasında boyut dağılımına sahip parçacıklar tercih edilmektedir. EBM için 150 µm'ye kadar daha iri parçalar kullanılır. Küresel şekiller, toz akışkanlığı için faydalıdır ve toz yataklı sistemlerde tekdüze tabakalar oluşturmaya izin verir. Katmanlı üretim teknolojileri,

çok çeşitli malzemelerle çalışma olasılığıyla birlikte rakipsiz bir tasarım özgürlüğü sunar. Katmanlı üretim, karmaşık parçaların hem prototiplenmesini hem de doğrudan üretimini sağlar. Uygulamalar havacılık, enerji, otomotiv, medikal, alet ve tüketici gibi birçok farklı sektörde bulunur [3].

3.2. SİNERLEME

Sinterleme, toz metalurjisinde en yaygın termal konsolidasyon tekniğidir. Terimin ISO tanımı şu şekildedir: "Bir tozun veya kompaktın, partiküllerin birbirine bağlanarak gücünü artırmak amacıyla ana bileşenin erime noktasının altındaki bir sıcaklıkta ısıl işlemidir. Sinterleme, binlerce yıldır kullanılan seramiklerin "pişirilmesi" ile ilişkilendirilebilir. Bununla birlikte temel fark, metallerin ortam atmosferinde tipik olarak kimyasal dengede olmamasından kaynaklanmaktadır; yani havada sinterleme, geniş özgül yüzeyle ilgili oksidasyona ve dolayısıyla toz bazlı sistemlerin yüksek kimyasal reaktivitesine neden olacaktır. Bu nedenle, metalik sistemlerin sinterlenmesi koruyucu atmosferler gerektirir [3].

TM ürünlerinin endüstriyel üretimi için kullanılan fırınlar, ne üretilene bağlı olarak farklılık gösterir. Sürekli veya parti tipi fırınlar kullanılabilir [38] ve çalışma sıcaklığı atmosferin türü ve saflığının yanı sıra değişebilir.



Şekil 3.3. Demirli hassas parçaların sinterlenmesi için kullanılan örgü bantlı fırının şeması a) Sinterleme tepsisi, b) Konveyör bandı, c) Fırın muflü [3].

Sıcaklık ile ilgili olarak, Al için yaklaşık 600 °C arasında değişebilir [3]. Cu alaşımları için 800–900 °C, demirli parçalar için 1120–1280 °C ve sert metaller için yaklaşık 1400 °C ve tungstenin sinterlenmesi için 2800 °C'ye kadar çıkılabilir. Her

durumda, enerji verimlilik giderek daha önemli hale gelir [39]. Demirli hassas parçaların seri üretimi için, sinterlenecek numunelerin farklı bölümlere ayrılmış ısıtılmış bir tünelden taşındığı sürekli fırınlar kullanılır [38]. 600–800 °C aralığındaki sıcaklıklarda çalışan birinci bölümde presleme yağı çıkarılır; ikinci bölümde sinterleme işlemi gerçekleştirilir. Daha sonra, bir karbon restorasyon bölgesi ve/veya bileşenlerin bir soğuk nitrojen akışı ile söndürüldüğü hızlı bir soğutma bölgesi takip edebilir. Tüm fırınlarda, koruyucu atmosfer altında bir soğutma tüneline tam soğutma sağlanır. Kullanılan fırın tipleri çoğunlukla elektrikle veya gazla ısıtılabilen ve maksimum 1150 °C sıcaklıkta çalışan örgü bantlı fırınlardır (Şekil 3.3). Çünkü daha yüksek sıcaklıklarda kayış ömrü önemli ölçüde azalma eğilimindedir.

Refrakter metallere sinterlenmesi için, vakum veya hidrojenle çalışan metalik ısıtma elemanlarına sahip parti tipi fırınlar kullanılır. Aynısı, sıcaklıkların tipik olarak daha düşük olduğu MIM bileşenleri için de geçerlidir; paslanmaz çelikler için 1350 °C ortak bir sıcaklıktır. Zaman zaman, üretim hacimleri daha yüksek yatırım maliyetini ve kaçınılmaz esneklik kaybını haklı çıkarmak için yeterince yüksekse, MIM üretimi için sürekli fırınlar kullanılır [3].

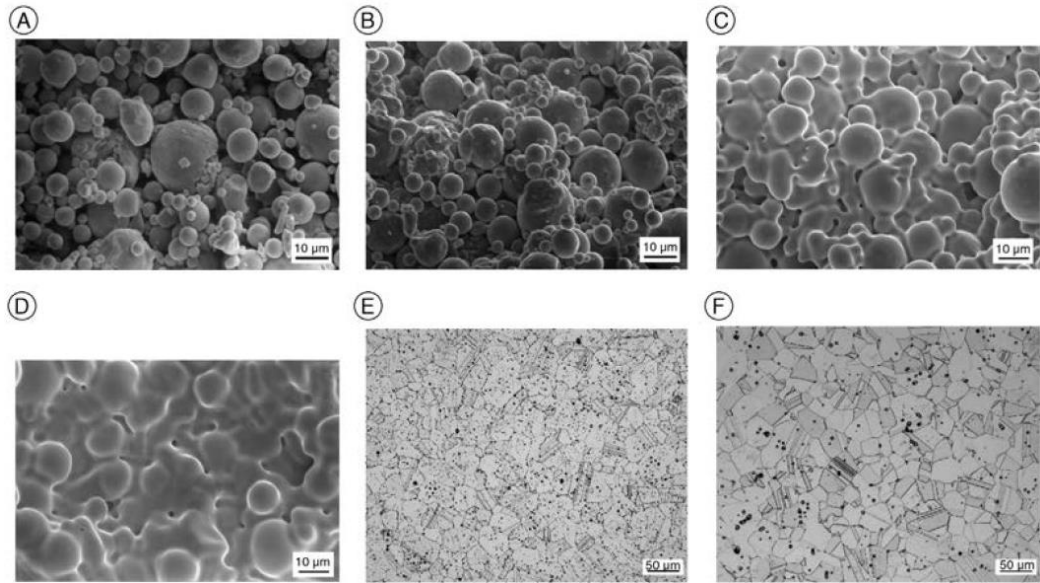
3.2.1. Katı Hal Sinterleme

Sinterleme, mevcut fazlara ve ilgili sistemlerin oluşturduğu bileşenlere bağlı olarak farklı varyantlarda gerçekleştirilebilir: katı hal, aktive, sıvı faz (kalıcı veya geçici), reaktif olarak sıralanabilir [40,41]. Sinterlemenin en basit çeşidi, tek bileşenli sistemlerin katı hal sinterlemesidir.

Başlangıçta, yığın halinde veya preslenmiş (ham) durumda, parçacıklar presleme temas noktalarında buluşur. Sinterlemenin ilk aşamalarında, metalik parçacıklar arası temaslar oluşur ve büyür; parçacıklar arası gözeneklilik hala birbirine bağlı ve açıktır. Daha sonraki aşamada hızlı küçülme meydana gelir; gözenekler kapanır ve birbirlerine karşı izole edilir. Son aşamada, kalan gözeneklilik yavaş yavaş azalır ve az miktarda bulursa bile [42] tane büyümesini engelleyen gözeneklerin kaybolma eğilimi göstermesi nedeniyle tane kabalaşması meydana gelir (Şekil 3.4).

İnce ve oldukça aktif başlangıç tozları ile büzülme belirgindir ve % 100'e yakın yoğunluk elde edilebilir. Bu, örneğin MIM [17] için uygulanan klasik sinterleme işlemidir. % 60 nispi yoğunluktan başlar ve sinterlemeden sonra yaklaşık % 95-100 yoğunluk elde edilebilir [43].

Hassas parçalar için boyutsal olarak kararlı sinterleme amaçlansa da, tek eksenli sıkıştırmadan kaynaklanan anizotropik yoğunluk dağılımı burada dikkate alınmalıdır [44]. Sinterleme sürecini incelemek için, ikiz küre modeli ve plaka üzerinde küre modeli gibi model sistemler kullanılmıştır; araştırılan parametre boyun yarıçapının büyümesidir ve kılcal kuvvetler süreci yönlendirir. Viskoz akış veya buharlaşma-yoğunlaşma gibi farklı taşıma mekanizmaları önerilmiştir, ancak ana mekanizma difüzyondur; sıcaklığa bağlı yüzey difüzyon, tane sınırı difüzyonu ve yığın difüzyon, materyali taşıyan baskın mekanizmalardır [3].



Şekil 3.4. MIM (Fraunhofer IFAM) tarafından üretilen Ti numunelerinde sinterleme aşamaları a) İnert gazla atomize edilmiş MIM tozu, b) Kahverengi kompakt, c) 1180 °C'de 5 dakika sinterlenmiş, d) 1340 °C'de 5 dakika sinterlenmiş, e) 1300 °C'de 60 dakika sinterlenmiş, f) 1350 °C'de 60 dakika sinterlenmiş kompaktlar [3].

"Kirkendall etkisi", örneğin Ti-Al karışımları sinterlendiğinde [45] gözlemlenir ve bunlar ekzotermik reaksiyonlarla ("reaktif sinterleme") geliştirilirse özel durumlarda sinterleme, ana bileşen içinde hemen hemen çözünmeyen, ancak bu bileşen için

yüksek çözünürlüğe sahip olan ikinci bir elemanın küçük bir miktarının eklenmesiyle etkinleştirilebilir. Bu durumda, ana bileşenin parçacık yüzeylerinde, içinden ana bileşenin hızla yayılabildiği ve böylece sinterlemeyi geliştiren ince bir katkı maddesi tabakası oluşur [46]. Tipik bir örnek W – Ni sistemidir: düz W'nin makul yoğunluk seviyelerine sinterlenmesi için 2700 °C gereklidir, % 0,3 Ni ilavesi hali hazırda 1400 °C'de neredeyse yoğun bir malzeme ile sonuçlanır [3].

3.2.2. Sıvı Faz Sinterleme

Sıvı fazdan sinterleme [47] adı verilen ve minimum iki bileşen gerektiren bir sıvı yoluyla taşıma sağlanırsa daha da hızlı sinterleme elde edilebilir. Sıvı faz sinterlemesinin iki varyantı ayırt edilebilir: eğer sinterleme sıcaklığında sıvı faz, katı faz (sistemin büyük bölümünü oluşturan) ile kimyasal dengede ise, buna kalıcı sıvı faz ile sinterleme denir. Sıvı faz, malzeme taşınmasını ve tipik olarak yoğunlaştırmayı geliştirir; bu nedenle kalıcı sıvı faz sinterleme, sert metaller ve tungsten ağır alaşımları gibi tam yoğunluğun gerekli olması halinde uygulanan işlemdir.

Katının sıvı faz tarafından ıslatılması temel bir kriterdir. Sıvı fazdaki ana bileşenin çözünürlüğü genellikle yoğunlaştırmayı destekler. Yoğunlaştırma mekanizmaları, sıvı fazın yağlama etkisiyle desteklenen partikül yeniden düzenlemesi ve katı fazın şeklini daha yüksek paketleme yoğunluğuna doğru değiştiren çözelti yeniden çökeltme prosesleridir [48].

Tane büyümesi, katı-sıvının arayüzey enerjisine bağlıdır; W–Ni sisteminde çok belirgindir, ancak düşük enerjili WC yüzeylerinin olduğu sert metallerde çok daha azdır. Bununla birlikte, ultra ince sert metal sınıflarında, mikron altı mikro yapıyı korumak için tane büyüme stabilizatörlerinin eklenmesi gerekir [49]. Oldukça homojen bir şekilde dağılan bu eriyik, örneğin dar bir sıcaklık aralığı içinde geliştirilmiş malzeme taşınması ve yoğunlaşması ile sonuçlanır. Yüksek hızlı çeliklerin sinterlenmesi için, bazı Al alaşımları için hetero supersolidus sıvı faz sinterleme geliştirilmiştir. Bu durumda, önceden alaşımlı bir toz saf Al ile karıştırılır

ve sinterleme, alaşım tozlarında süper katı eriyik oluşacak şekilde gerçekleştirilir; ancak bu, tüm toz kompaktta belirgin bir yoğunlaşma ile sonuçlanır [50].

Sıvı faz sinterleme yaygın bir işlemdir, örneğin sinterlenmiş çeliklerde, hassas parçalar için en yaygın kullanılan elik kalitesi Fe – Cu – C, bu şekilde sinterlenir. Bu tür sinterleme, yoğunlaşmaya neden olmama avantajına sahiptir, ancak aksine hafif bir şişme gözlemlenir - sık sık "bakır şişmesi" [51,52] olarak adlandırılan ve endüstriyel uygulamada preslenmiş ürünün doğal büzülmesini telafi etmek için kullanılır. Geçici sıvı fazın ikinci yararı, sadece Fe-Cu-C için değil, aynı zamanda Mo, Cr ve W ile alaşımlı çelikler için de gösterildiği gibi mekanik özellikleri iyileştiren alaşım elemanlarının geliştirilmiş dağılımı ve homojenleştirilmesidir [53].

3.3. İKİNCİL İŞLEMLER

TM bileşenleri, sadece sinterleme ile elde edilemeyen özellikler gerektirir. Örneğin, karmaşık şekilleri yeniden oluşturmak, daha yakın toleranslar elde etmek, mekanik özellikleri iyileştirmek veya korozyona karşı koruma sağlamak için tamamlayıcı işlemler kullanılabilir. İkincil işlemlerin neden olduğu maliyet artışına rağmen, çoğu zaman nihai ürünler, rakip teknolojilerden gelenlere kıyasla hala ekonomiktir. İkincil işlemlerden bazıları, TM parçalara özgüdür (buharla işleme ve metaller veya polimerlerle sızma gibi), ancak işlemlerin çoğu genellikle TM olmayan parçalarda da kullanılır. Bununla birlikte, TM malzemelerin kendine özgü özelliklerinin getirdiği sınırlamalar, özellikle gözeneklilik nedeniyle, TM parçalar için bazı özel gereklilikler dikkate alınmalıdır [3].

BÖLÜM 4

DEMİR BAZLI SİNERLENMİŞ MALZEMELER

Demir bazlı sinterlenmiş malzemelerle istenen mukavemet özelliklerini elde etmenin birkaç yolu vardır. En önemli etki parametreleri şunlardır:

- Yoğunluk
- Sinterleme koşulları
- Alaşım elementleri
- Isıl işlem koşulları

Bu parametreler mümkün olan en yakın sınırlar içinde kontrol edilmelidir, çünkü küçük değişiklikler bile sinterleme sırasında kabul edilemeyecek kadar geniş boyutsal değişikliklere neden olabilir ve böylece sinterlenmiş parçaların boyutsal kararlılığını bozabilir. Yoğunluk, sinterlenmiş yapısal parçaların mekanik özellikleri açısından birinci derecede önemlidir, çünkü sinterlenmiş yoğunluk ile yaklaşık doğrusal orantı, uzama ve çarpma mukavemetinde çekme mukavemeti ve yorulma mukavemeti katlanarak artar [54].

Sinterlenmiş yoğunluk temel olarak kompakt yoğunluğa bağlıdır ve bu da sıkıştırma basıncına ve yağlama sistemine bağlıdır. Yaklaşık 650 N/mm^2 'den daha yüksek sıkıştırma basınçları, sıkıştırma aletinin aşırı gerilme riski nedeniyle normalde uygulanmaz. Seri üretim koşullarında ($600\text{-}650 \text{ N/mm}^2$) tolere edilebilen maksimum pres yükleri ile $7,1\text{-}7,2 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar yoğunluklar elde edilebilir. Bu yoğunluk aralığı, Höganäs tarafından geliştirilen bir sıcak presleme tekniği kullanıldığında $7,3\text{-}7,4 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar genişletilebilir. $7,5\text{-}7,6 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar yoğunluklar, ancak nihai sinterlemeden önce kompaktların ön sinterlenmesi ve yeniden preslenmesi ile elde edilebilir. $7,7\text{-}7,8 \text{ g/cm}^3$ 'e kadar daha yüksek yoğunluklar, sıcak dövme önceden preslenmiş (ve önceden sinterlenmiş) kompaktlar aracılığıyla elde edilebilir. Sinterleme koşulları, (1) gözeneklerin ne kadar hızlı ve verimli bir şekilde

kapanacağına, (2) alaşım elementlerinin ne kadar hızlı homojenleşeceğine ve (3) hassas alaşım elementlerinin oksitlenip oksitlenmediğine bağlıdır [54].

Demir tozu metalurjisinde, sinterleme en yaygın olarak 1120 ila maksimum 1150 °C' de çalışan sürekli örgülü bant fırınlarında gerçekleştirilir. 1250-1350 °C' lik sinterleme sıcaklıkları, alaşım elementlerinin homojenleşmesini hızlandırır ve krom ve mangan gibi oksijene duyarlı alaşım elementleri kullanıldığında faydalıdır. Hasır bantlı fırınlar 1150 °C' nin üzerindeki sıcaklıklara dayanamaz. Ana metalde çözünen alaşım elementleri, çeşitli mikro yapıların oluşumuna neden olur ve malzemelerin deformasyona karşı direncini artırır. Alaşım elementleri ayrıca sinterleme sırasında yapısal parçaların boyutsal değişimini etkiler. Alaşım elementleri, geleneksel ve sinterlenmiş çeliklerin sertleştirilebilirliği açısından vazgeçilmezdir [54].

Prensip olarak, alaşım elementleri sinterlenmiş çelikler üzerinde geleneksel çeliklerle aynı etkiye sahiptir. Bununla birlikte, geleneksel çeliklerde yaygın olan tüm alaşım elementleri, sinterlenmiş çeliklerde kullanılamaz, çünkü bunlardan bazıları, örn. Mn ve V, ticari sinterleme atmosferlerinde çok kolay oksitlenir. Diğer yandan geleneksel çeliklerde istenmeyen elementler, örn. fosfor ("mavi kırılma"), sinterlenmiş çelikler üzerinde faydalı etkilere sahip olabilir.

Yapısal parçalar için sinterlenmiş çeliklerin alaşım bileşimleri, sadece istenen mukavemet açısından değil, aynı zamanda sinterleme sırasında boyutsal kararlılık açısından da dikkatlice seçilmelidir. 150-180 HV' nin üzerinde sertlik seviyeleri veren alaşım bileşimleriyle, sinterleme sırasında yapısal parçaların boyutsal değişikliklerinin olabildiğince küçük olması ve daha da önemlisi, bu boyutsal değişikliklerin dağılımının en yakın mesafe içinde tutulması önemlidir. 150 HV'ye kadar sertliğe sahip parçalar oldukça kolay bir şekilde boyutlandırılabilir veya basılabilirken, boyutlandırma veya kaplama sertlikleri bu seviyeyi ne kadar aşarsa, giderek zorlaşır ve sonunda imkânsız hale gelir. Bu nedenle, yüksek mukavemetli yüksek hassasiyetli parçaların seri üretiminde, sinterleme (ve ardından ısıl işlem) sırasındaki boyut değişikliklerinin kaçınılmaz olan küçük parçalara karşı duyarsız olması önemlidir [54].

4.1. ALAŞIM SİSTEMLERİ, MİKROYAPILAR VE ÖZELLİKLER

Çoğu durumda, sinterlenmiş demir ve çelik bileşenler günümüzde aşağıdaki alaşım sistemlerinden birine veya diğerine dayalı malzemelerden yapılmaktadır:

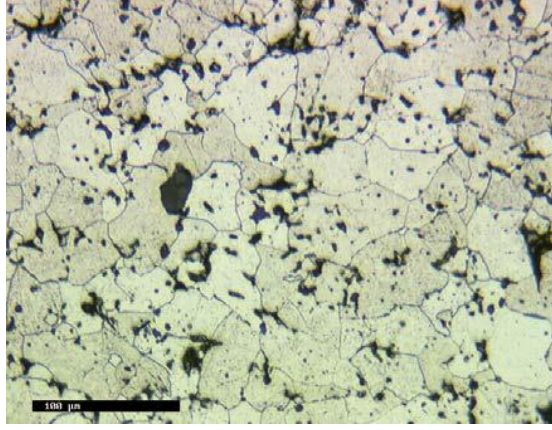
- Demir
- Demir - Karbon
- Demir - Bakır
- Demir - Bakır - Karbon
- Demir - Fosfor - Karbon
- Demir - Bakır - Nikel - Karbon
- Demir - Bakır - Nikel - Molibden - Karbon
- Demir - Nikel - Molibden - Karbon
- Demir - Krom - Molibden - Karbon
- Demir - Krom – Karbon

Yukarıda belirtilen alaşım sistemlerinden ilk dört sistem açıklanacaktır. Bu malzemeler genellikle saf demir tozunun ilgili elementlerle mekanik karışımları ve toz halinde bir miktar yağlayıcıdır. Bu tür karışımlar, tamamen ön alaşımli tozlardan daha kolay sıkıştırılabilir. Toz karışımlarından üretilen sinterlenmiş alaşımli çeliklerin mikroyapıları, tipik olarak geleneksel olarak alaşımli çeliklerden çok daha heterojendir. Karbon, bazik demir tozunda çok hızlı yayılır ve sinterleme sırasında kısa sürede dengeye ulaşırken, bakır, nikel ve molibden gibi diğer alaşım elementleri çok daha yavaş dağılır ve ancak çok uzun sinterleme sürelerinden sonra dengeye ulaşır. Ticari olarak kabul edilebilir sinterleme koşullarında, bu malzemeler her zaman belirli bir derecede heterojenlik sergileyecektir. Sonraki ısı işlem için bazen tamamen ön alaşımli malzemeler tercih edilir [54].

4.1.1. Saf Demir

Toz metalurjisi yöntemlerinin Avrupa ve ABD'de daha büyük bir endüstriyel ölçekte ilk kez kullanıldığı 1930'ların sonlarından bu yana, düşük mukavemetli ve yumuşak manyetik uygulamalar için kendinden yağlamalı rulmanlar ve sinterlenmiş yapısal

parçalar saf demir tozlarından üretilmektedir. Şekil 4.1, 7.10 g/cm³ yoğunluğa sıkıştırılmış saf bir sünger demir tozunun (NC100.24) mikro yapısını göstermektedir [54].



Şekil 4.1. 1120 °C'de 30 dakika sinterlenmiş NC100.24'ün mikroyapısı [54].

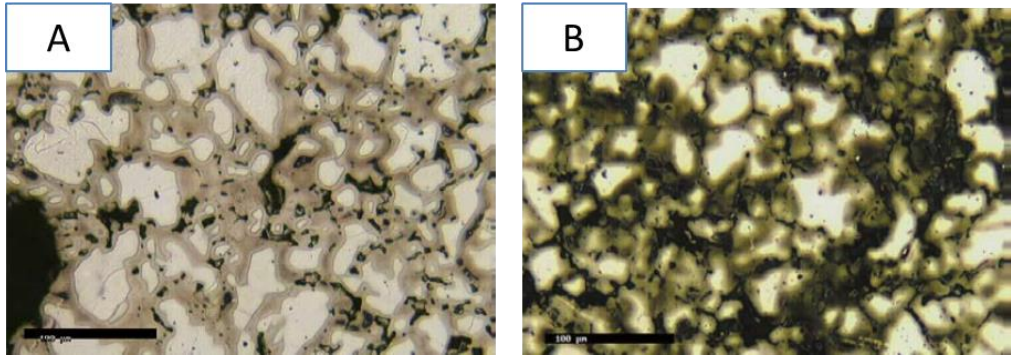
4.1.2. Demir – Karbon

Sinterlenmiş demirin çekme mukavemetini ve sertliğini artırmanın çok etkili bir yolu, onu karbon ile alaşımlamaktır. En uygun şekilde, bu, sıkıştırmadan ve sinterlemeden önce demir tozuna grafit tozu eklenerek elde edilir. Ara alaşım elementi olan karbon, sinterleme sırasında demir tozu yapısında çok hızlı çözünür. Bununla birlikte, karbon içeren malzemelerin başarılı bir şekilde sinterlenmesi, çok dikkatli bir şekilde kontrol edilen, dekarbürize olmayan sinterleme atmosferi gerektirir.

4.1.3. Demir – Bakır ve Demir - Bakır – Karbon

Demir ve bakır tozu karışımlarının iki yönlü faydası vardır: Bunlardan birincisi, Bakır 1083 °C' de, yani sinterleme sıcaklığının altında erir ve demir tozu partiküllerine nispeten kolay bir şekilde yayıldığı yerden kompaktın gözenek sistemine hızla sızar. İkincisi ise Bakır, γ -demir (ostenit) içinde yaklaşık ağırlık olarak % 9 ancak oda sıcaklığında α -demir (ferrit) içinde ağırlıkça sadece % 0,4'e kadar bulunur; sonuç olarak, demir-bakır alaşımları çöktürülerek sertleştirilebilir. Sinterlemeden sonra düşük sıcaklıkta tavlama ve aslında bu belirli bir ölçüde

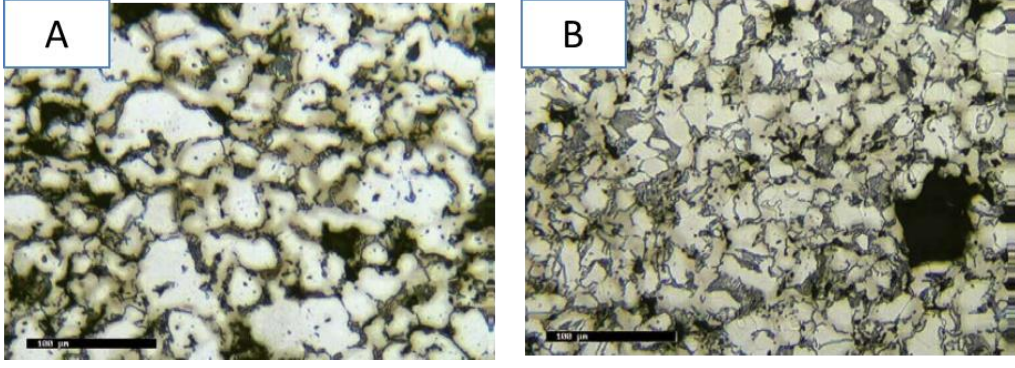
sinterlemenin soğutma bölgesinden geçerken gerçekleşir. Bakır, bazik demir tozuna genellikle ağırlıkça % 1,5 ila % 4 miktarlarında eklenir. Şekil 4.2, sırasıyla ağırlıkça % 2 ve % 4 oranında karıştırılmış bakır içeren iki demir-bakır malzemenin mikro yapılarını gösterir. Her ikisi de 1120 ° C'de 30 dakika sinterlenmiştir. Görüldüğü üzere bakır, sinterleme sonrasında demir matris içinde tamamen homojen dağılmamaktadır. Daha yüksek bakır konsantrasyonu bölgeleri, mikrograflarda tane sınırları boyunca kahverengimsi dikişler olarak görünür [54].



Şekil 4.2. a) ASC100.29 +% 2 Cu ve b) ASC100.29 +% 4 Cu mikro yapıları, her iki malzeme de 1120 ° C'de 30 dakika sinterlendi. Sinterlenmiş yoğunluk: Her ikisi için 7.10 g / cm³ [54].

Bakır içeriği ağırlıkça yaklaşık % 2.5' ten daha yüksek olan kompaktlar, sinterleme sırasında boyut toleranslarının kontrol edilmesi zor olacak kadar büyüme eğilimindedir. Sinterleme sırasında bakır içeren yapısal parçaların boyutsal kararlılığını korumak için demir-bakır tozu karışımına uygun miktarlarda grafit eklenir. Sinterleme sırasında grafitin karbonlama etkisi, bakırın büyüme üreten etkisine karşı koyar. Bu grafit ilavelerinin bir başka yararlı etkisi, mukavemette ilave bir artıştır [54].

Şekil 4.3, ağırlıkça % 2 bakır ve % 0.2 bakır içeren iki demir-bakır malzemenin mikroyapılarını göstermektedir. Ağırlıkça % 0.6 karbon içermektedirler ve 1120 °C'de 30 dakika sinterlenmişlerdir. Ağırlıkça % 0.2 bakır içeren materyalin alınan mikroyapı resminde, karbon bakımından zengin alanlarında çözülmüş bakır konsantrasyonlarının bulunduğu görülmektedir. Bakır, sinterleme sıcaklığına kadar ısıtma sırasında tercihen ferrit ve sementit lameller arasındaki sınırlara nüfuz ederken, perlitik alanların östenitleşmesi gecikmiştir [54].



Şekil 4.3. a) ASC100.29 +% 2 Cu ve b) ASC100.29 +% 4 Cu mikro yapıları [54].

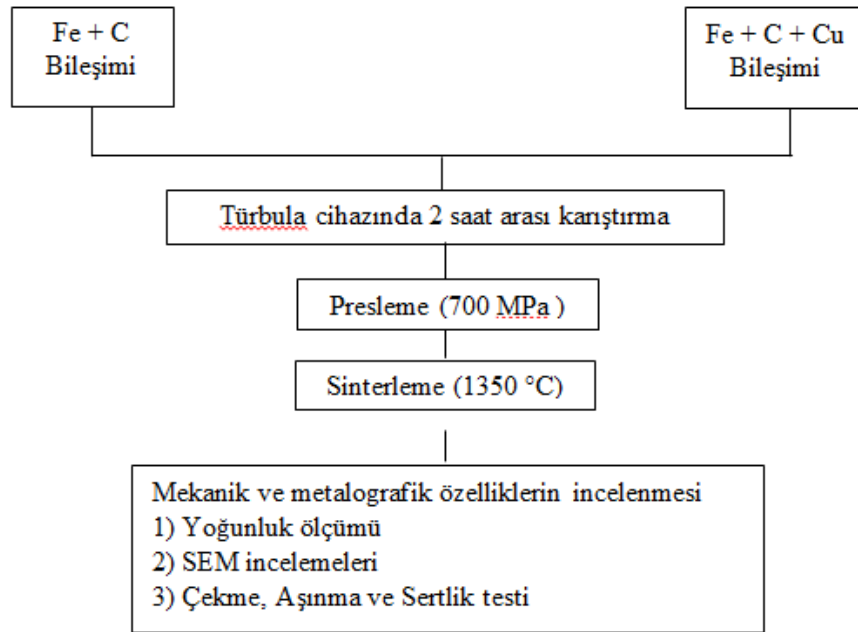
BÖLÜM 5

DENEYSEL METOD

Bu çalışmada, istenen oranlardaki alaşımlar toz metalurjisi yöntemiyle numune haline getirilmiştir. Gerçekleştirilen işlem basamakları, çekme, sertlik ve aşınma testinin uygulanması, SEM görüntüleri analizi, yoğunluk ölçümleri açıklanmıştır.

5.1. DENEY İŞLEM BASAMAKLARI

Bu deneysel çalışmada gerçekleştirilen işlem basamakları Şekil 5.1’de olduğu gibi gerçekleştirilmiştir. Değişik firmalardan temin edilen tozlar, belirlenen kompozisyonlarda tartılıp karıştırma işlemine tabi tutulmuştur. Ardından tek yönlü presleme ve sinterleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Sinterleme sonrası numunelerin karakterizasyon aşamasına geçilmiştir.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmada proses adımları.

5.2. PARÇA ÜRETİMİ

Tozlar, izelge 5.1’de verilen oranlarda, RADWAG AS-60-220 C/2 marka terazi ile tartılmıştır. Tartılan tozlar üç eksenli karıştırıcı olan Turbula marka karıştırıcı ile 120 dakika süreyle bilyesiz olarak karıştırma işlemine tabi tutulmuştur.

Çizelge 5.1. Deney için hazırlanmış numunelerin kimyasal kompozisyonları.

Bileşim	C (%ağ.)	Cu (%ağ.)	Fe (%ağ.)
Fe-C	0,55	-	99,55
Fe-C-4Cu	0,55	4	95,55
Fe-C-8Cu	0,55	8	91,55
Fe-C-16Cu	0,55	16	83,55

Elde edilen karışım toz partiküllerinin preslenmesi 96 ton basma kapasiteli Hidroliksan marka tek yönlü preste, 700 MPa basıta gerçekleştirilmiştir. Sinterleme işlemleri koruyucu gaz olarak argon gazı kullanılan Protherm PTF 16/75/610 modeli atmosfer kontrollü boru fırında 1350 °C’ de 2 saat süre ile gerçekleştirilmiştir.



şekil 5.2. Sinterlemede kullanılan atmosfer kontrollü fırın görüntüsü.

5.3. SERTLİK VE ÇEKME TESTİ

Üretilen numunelerin sertlik ölçümü Shimadzu marka sertlik ölçüm cihazıyla HV1 (1 kg) yük altında gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan her bir numuneden 5 adet sertlik ölçümü yapılarak, bu değerlerin ortalaması alınıp sertlik değeri belirlenmiştir.

Örnekler, Shimadzu marka çekme test cihazı kullanılarak oda sıcaklığında 1 mm/dak çekme hızında çekme testlerine tabi tutulmuştur.

5.4. AŞINMA TESTİ

Aşınma testleri UTS marka aşınma test cihazında ASTM G33 standardına göre lineer ileri-geri hareket tipi ile kuru ortamda ve korozif sıvı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Aşınma testinde 6 mm çapında 100Cr6Al bileşiminde bilyalar kullanılmıştır. Numunelere, farklı yükler (40 N, 50 N, 60 N) altında her bir çevrimde 20 mm, numune üzerindeki iz boyu (stroke distance) 10 mm olacak şekilde toplam 100 m yol aldırılmıştır. Aşınma izi alanı, Mitutoyo marka SJ-410 model yüzey pürüzlülüğü cihazında ISO 4287-1997 standardına göre ölçülmüştür. Numunelerin aşınma hızı (W_r) Eşitlik 5.1’de verilen formüle göre aşınma izi alanı ile aşınma izi boyu çarpımı ile elde edilen toplam aşınma hacminin (W_v) alınan toplam yola (d) bölünmesiyle hesaplanmıştır.

$$\text{Aşınma hızı} = \frac{\text{Aşınma izi hacmi}}{\text{Alınan Yol}} = \frac{\text{Aşınma izi alanı} \times \text{Aşınma izi boyu}}{\text{Alınan Yol}} \quad (5.1)$$

5.5. SEM İNCELEMELERİ

SEM incelemeleri ise Karabük Üniversitesi, Demir-Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir. Sinterlenmiş toz metalurjisi alaşımli çelik numuneler, mikroyapı incelemesi için bakalite alınmıştır. Ardından sırasıyla küçükten büyüğe doğru 320 meshten başlayarak 2000 meshlik SiC zımpara kağıtları kullanılarak zımparalama işlemi gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemi 1 ve 0,3 μm ’luk Al_2O_3 kullanılarak keçe üzerinde gerçekleştirilmiştir. Parlatma işlemi sonrası numuneler %3’lük nital çözeltisi ile dağlanmıştır.

5.6. YOĞUNLUK ÖLÇÜMÜ

Numunelerin yoğunluk ölçümleri, Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü Mekanik Laboratuvarında bulunan hassas tarazide RADWAG

AS yoğunluk ölçüm kiti ile gerçekleştirilmiştir. Üretilen malzemelerin gözenek oranının belirlenmesinde Eşitlik 5.2’de verilen formül kullanılmıştır. Numunelerin teorik yoğunlukları ise, karışım kuralı esasına göre hesaplanmıştır.

Burada; q_{teorik} teorik yoğunluğu, $q_{deneysel}$ ise deneysel yoğunluğu göstermektedir.

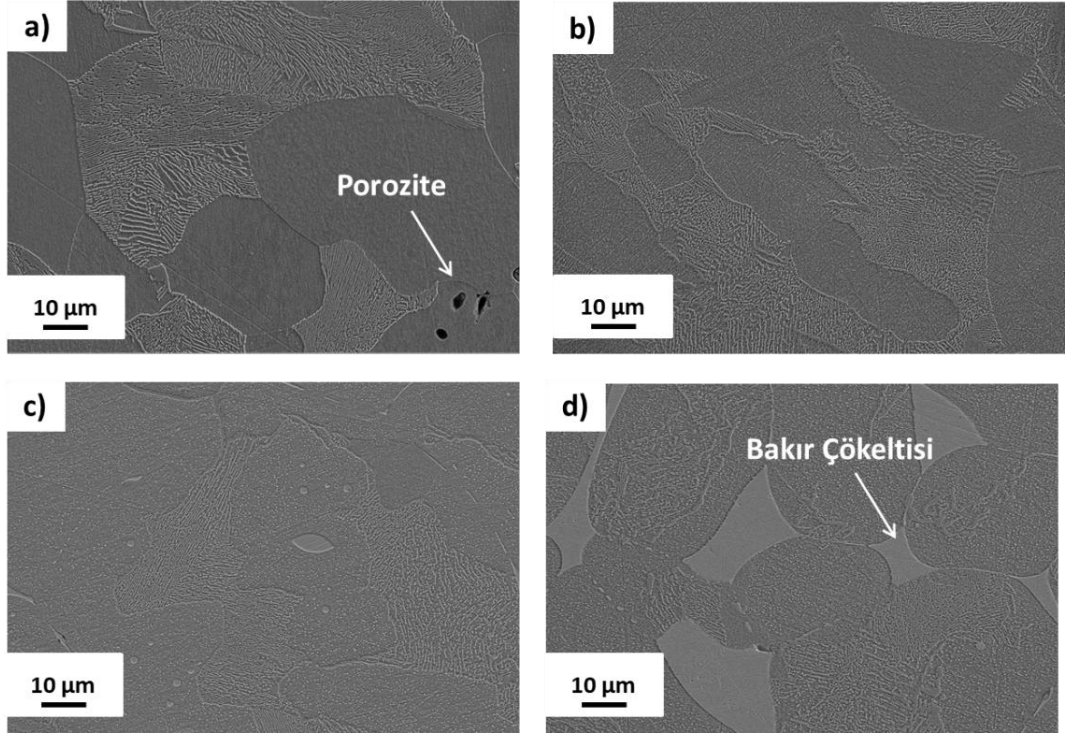
$$\% \text{ Gözeneklilik} = (q_{teorik} - q_{deneysel}) \times (100) / (q_{teorik}) \quad (5.2)$$

BÖLÜM 6

BULGULAR VE TARTIŞMA

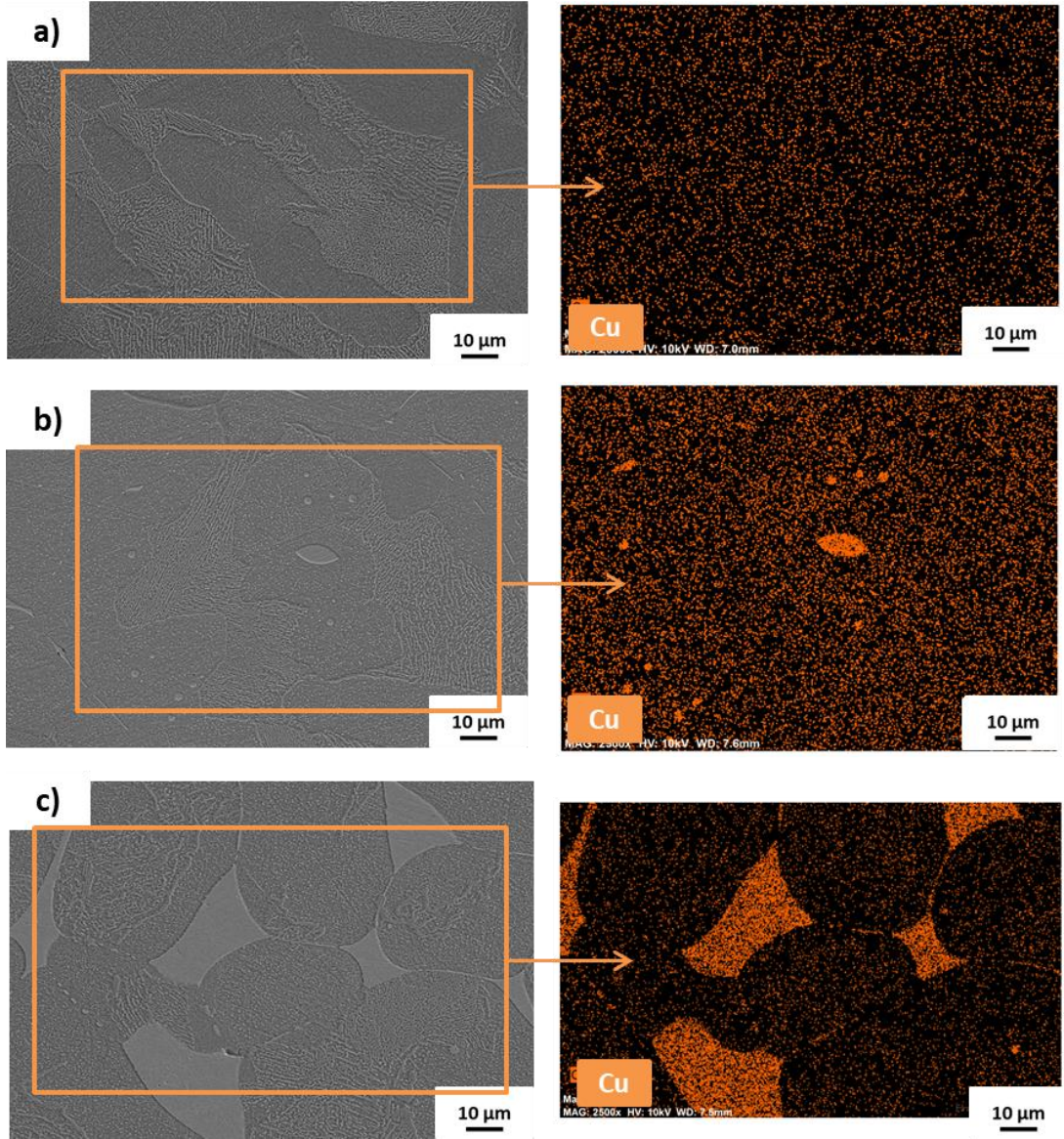
6.1. NUMUNELERİN MİKROYAPI ANALİZİ

Numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri Şekil 6.1' de sunulmuştur. Mikroyapı görüntüleri incelediğinde, bakır içermeyen numunede (Şekil 6.1a) porozite olduğu görülmektedir. Toz metalürjisi tekniğinde, sinterleme sırasındaki hatalardan dolayı bu poroziteler oluşmaktadır [55]. Ancak, bakır içeren numunelerde (Şekil 6.1b-d) bu gözeneklerin bakır içermeyen numuneye göre daha az olduğu görülmektedir. Bunun sebebi bakırın 1083 °C'de erimesi ve sinterleme işlemi sırasında sıvı faza geçişinin bir sonucu olarak kılcal kuvvetler sayesinde ana alaşımda iyi dağılmasıdır. Sonuç olarak, Cu gözenekleri doldurarak elde edilen alaşımların yoğunluğunu arttırmaya yardımcı olur [56]. Nitekim Çizelge 6.1'de yoğunluk ölçüm sonuçları da gözeneklilik miktarının bakır ilavesiyle azaldığını doğrulamaktadır.



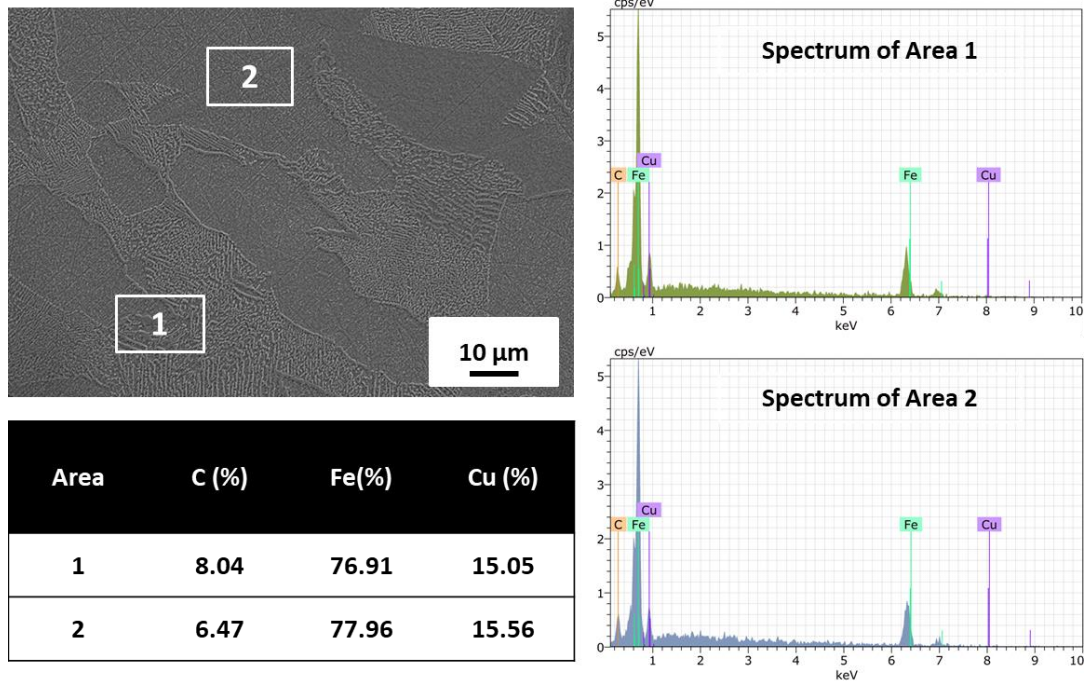
Şekil 6.1. Sırasıyla, a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM mikroyapı görüntüleri.

Bakırın çelik matrisler içerisinde dağılımını anlamak için SEM-Mapping (**Hata! Başvuru kaynağı bulunamadı.**) analizi gerçekleştirilmiştir. SEM-Mapping analizine göre bakırın matris içerisinde homojen olarak dağıldığı söylenebilmektedir. Bu durum, Şekil 6.3'te sunulan SEM-EDX analizi ile desteklemiştir. Numune üzerinde seçilen 2 farklı bölge için sırasıyla bakır oranları 15,05 ve 15,56'dır.



Şekil 6.2. Sırasıyla a) %4, b) %8, c) %16 bakır içeren numunelerin SEM-Mapping analizleri.

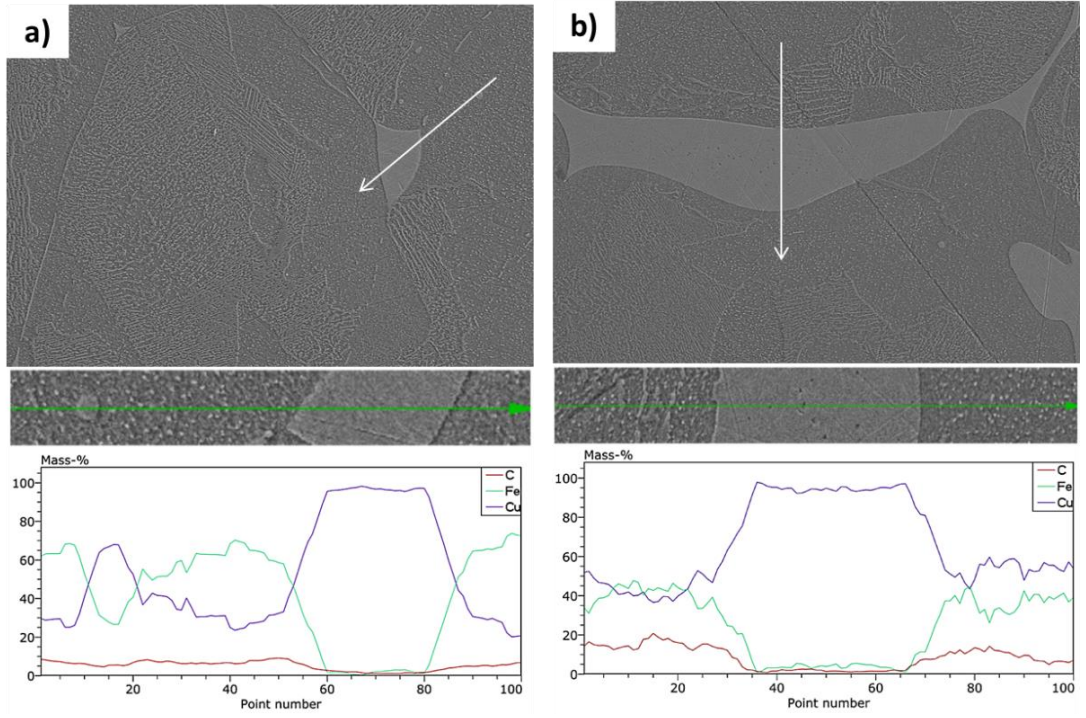
Bakır oranı %4'ten %8'e çıktığında, matris içerisinde bakırın dağılımı yine söz konusudur. Ancak, bakır çökeltilerinin daha belirgin olduğu söylenebilmektedir (Şekil 6.2b). Bakır oranı %16 olan numunede ise bakır çökeltileri daha büyük olarak matris içerisinde kısmi yerlerde görülmektedir (Şekil 6.2c).



Şekil 6.3. %4 Bakır içeren numune için SEM-EDX analiz sonucu.

Çökelti ve matris fazları için bakır miktarındaki değişim SEM-Line EDX analizi incelenmiştir (Şekil 6.4). Analiz sonucuna göre matris içerisinde bakırın çözüldüğü, çözünmeyen bakırın ise çökelti oluşturduğu ve çökeltilerin sadece bakır elementinden oluştuğu tespit edilmiştir.

Çizelge 6.1’de numunelerin teorik, gerçek yoğunlukları ve gözeneklilik değerleri verilmiştir. Yukarıda bahsedildiği üzere bakır miktarının artmasıyla gözeneklilik değerleri azalmıştır. Bulgular, önceki çalışmalarla uyumludur [57].



Şekil 6.4. a) %8, b) %16 bakır içeren numune için SEM-line EDX analiz sonucu.

Çizelge 6.1. Numunelerin teorik, gerçek yoğunlukları ve gözeneklilik değerleri verilmiştir.

Numune	Teorik Yoğunluk (gr/cm ³)	Gerçek Yoğunluk (gr/cm ³)	Bağlı Yoğunluk (%)
Fe-C	7,8292	6,9641	88,95
Fe-C-4Cu	7,8732	7,2433	92
Fe-C-8Cu	7,9172	7,1904	90,82
Fe-C-16Cu	8,0052	7,1830	89,73

6.2. NUMUNELERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ

Çizelge 6.2’de numunelerin sertlik değerleri görülmektedir. Alaşımsız çelik ile bakırlı çelikler karşılaştırıldığında; bakır ilavesi arttıkça malzemelerin sertliklerinde artış gözlenmiştir. Alaşım elementleri eklemek veya ısıl işlem uygulanması, başta çelikler olmak üzere demir karbon alaşımlarının çekme dayanımı, sertliğini ve aşınma direncini artıracaktır [58]. Malzemenin sertlik değeri, içerisindeki karbon,

bakır ve mangan oranına paralel olarak artmaktadır, benzer sonuçlar daha önceki çalışmalarda da elde edilmiştir [59,60].

Çizelge 6.2. Numunelerin sertlik değerleri

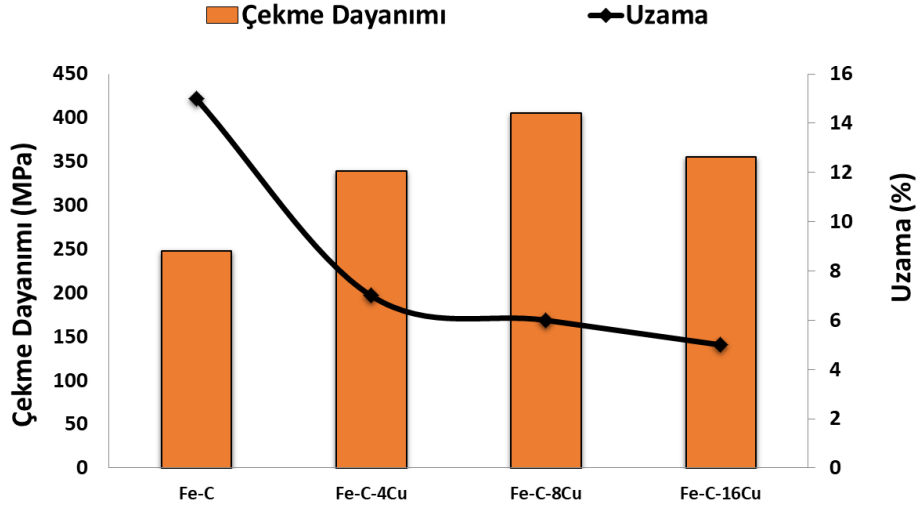
Numune	1. Ölçüm (Hv)	2. Ölçüm (Hv)	3. Ölçüm (Hv)	Ortalama (Hv)
Fe-C	85,2	86,6	85,5	85,8±0,74
Fe-C-4Cu	120	124	134	126±7,21
Fe-C-8Cu	139	158	152	149,7±9,71
Fe-C-16Cu	214	210	192	205,3±11,72

Şekil 6.5, TM yöntemiyle üretilen alaşımsız ve bakır ilave edilen çelik numunelerin gerilme-% uzama değerlerini gösterilmiştir. Sertlik değerinde olduğu gibi dayanım değerlerinde de bakır ilavesi ile artış görülmüştür. Bunun sebebi bakırın tane içinde ve sınırlarında çökmesi sonucu oluşan çökelti sertleşmesi ve tane boyutu küçültme mekanizmasına mekanizması sonucudur.

Ayrıca sıvı faz sinterleme mekanizmasıyla da taneler arasında yayılarak tanelerin birbiri arasındaki metalurjik bağı kuvvetlendirmiş bu sayede de dayanıma katkı sağlamıştır [61]. Bu artışın bir diğer sebebi de malzeme içerisine bakır ilave edilmesiyle beraber perlitik tanelerin incelmesi ve ağırlık olarak % Cu miktarının artması ile perlit miktarında bir artış gözlemlenmesinin olabileceği düşünülmektedir [62]. Abdou vd. yaptıkları çalışmada dökme demir malzemeye bakır (ağırlıkça % 0–3,15) ilavesinin aşınma ve sertlik değerlerine etkisi araştırmıştır. İlave edilen bakır içeriği ile Fe-Cu alaşımının sertliğinin arttığını gözlemlemişlerdir. Alaşımdaki bakır miktarındaki artış, alaşımın mukavemetini artıran perlit oluşumunu arttırmış ve ağırlıkça % 3,15 Cu ilavesi ile alaşım tamamen perlitik yapı gözlenmiştir [60].

Fakat bakır miktarının ağırlıkça %8’ den daha fazla alaşım içerisine ilave edilmesiyle bakır etkinliğini yitirmiştir. Tane sınırlarında aşırı şekilde çökelti oluşumu dayanım azalmasına sebep olmaktadır [63,64]. Stepanova vd. % 9 bakır içeren orta karbonlu çeliklerde, ferrit taneleri ve perlitler arayüzeyinde üçüncül sementitlerin oluştuğunu

gözlemlemiştir. Bu da bakır oranının %5' ten %9' a çıkmasıyla birlikte mekanik özelliklerin düşüşüne yol açmıştır [65].

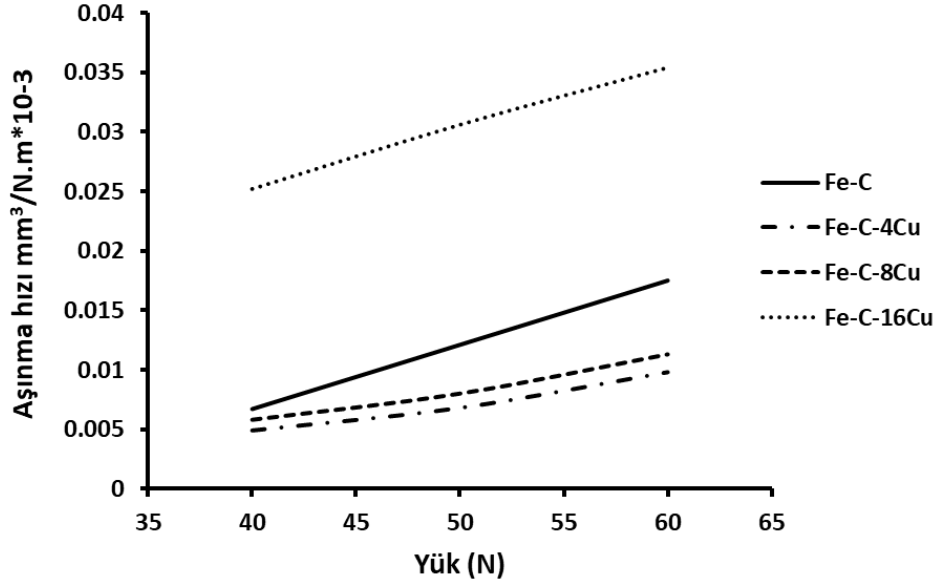


Şekil 6.5. Numunelerin çekme dayanımı ve % uzama değerleri.

6.3. NUMUNELERİN AŞINMA DAVRANIŞLARI

Numunelerin kuru ortamda yapılan aşınma testi sonuçları Şekil 6.6' da verilmiştir. TM çelik numunelere uygulanan aşınma testleri sonucu elde edilen verilere göre yük arttıkça aşınma hızları arttığı görülmüştür. Çelik numunelere ağırlıkça %8'e kadar bakır ilavesinin sertlik ile beraber aşınma direncini de arttırdığı görülmektedir. Elde edilen sonuç, literatürle uyumludur. Stepanova vd. [65] % 6' ya kadar bakır ilavesinin orta karbonlu çeliklerin aşınma direncini iyileştirdiğini tespit etmişlerdir. Bir başka çalışmada ise Abdou vd. [60] gri dökme demirin aşınma direncinin % 3,15 bakır takviyesi ile % 30 iyileştirilebileceğini raporlamışlardır. Ancak, bakır oranı % 8'den % 16' ya çıktığında sertlik değerinde artış görülmesine rağmen, aşınma direnci alaşımsız numuneye göre daha düşüktür ve en yüksek aşınma hızı Fe-C-16Cu numunesine aittir. Çeliğin aşınma direnci üzerine yapılan çalışmalarda genel olarak sertlik değerinin artmasıyla beraber aşınma direncinin arttığı görülse de sertlik ve aşınma direncinin uyumsuz olduğu çalışmalarda mevcuttur. Çeliğin aşınma hızı aşınan yüzeyin sertliğine ve morfolojisine bağlıdır [66]. Fe-C-16Cu numunesine bakırın yüksek oranlarda topaklanmasından ötürü debris (aşınan partikül) oluşumu

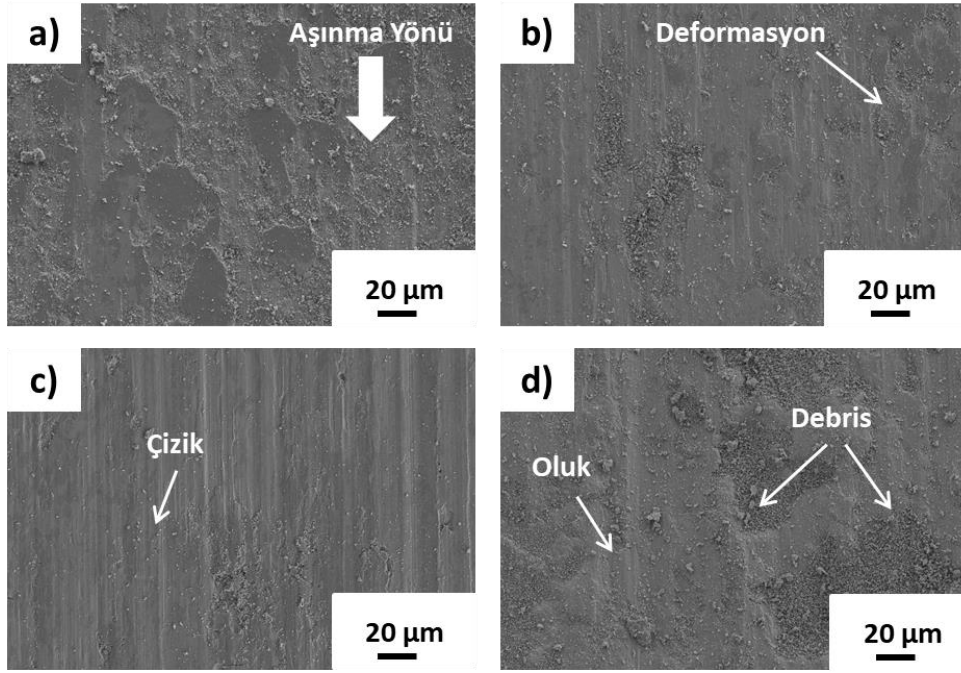
Şekil 6.7’de görüldüğü üzere diğer numunelere göre daha fazladır. Bunun sonucunda da diğer numunelere kıyasla hacimsel kaybının yüksek olmasına, dolayısıyla da aşınma direncinin düşük olmasına yol açmıştır. Literatürde topaklanmayla beraber aşınma direncinin olumsuz etkilendiği çalışmalar mevcuttur.



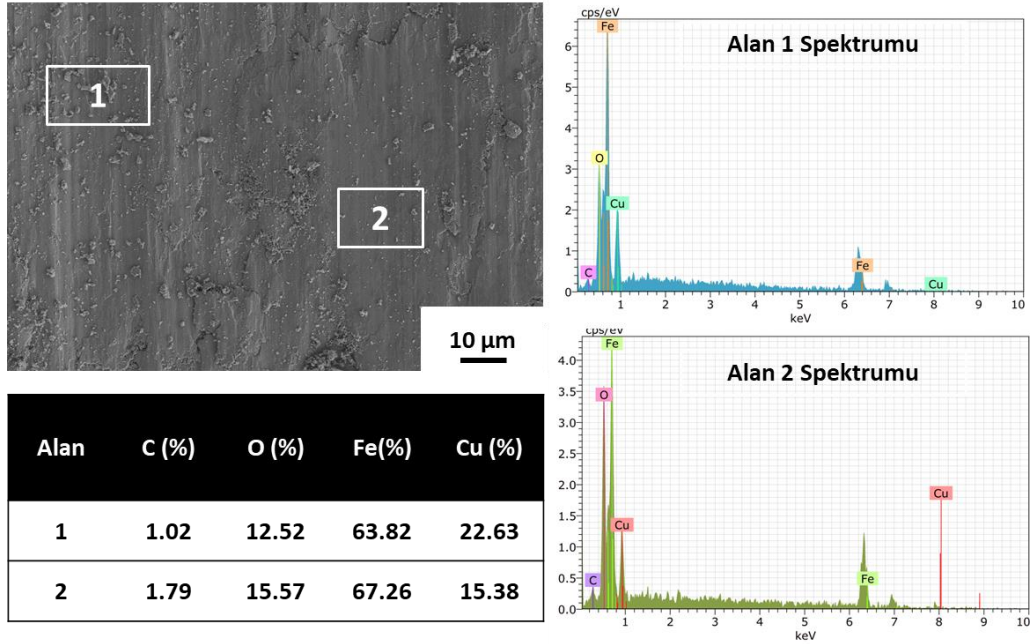
Şekil 6.6. Kuru ortamda numunelerin farklı yükler altındaki aşınma hızları.

Kuru ortamda yapılan test sonrası incelenen aşınma yüzeylerinde aşınma yönüne paralel olarak aşınma çizgilerinin oluştuğu görülmektedir. Bu da abrasif aşınma mekanizmasının etkin olduğunu ortaya koymaktadır. Aşınmanın en az görüldüğü Fe-C-4Cu numunesine göre Fe-C-8Cu ve Fe-C-16Cu numunesinde çizikler ve oluklar daha belirgindir. Bu da aşınmanın bu numuneler için daha fazla olduğunu doğrulamaktadır.

Kuru ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası %8 bakır içeren numunenin SEM aşınma yüzeyi görüntüsü ve SEM-EDX sonucu Şekil 6.8’de gösterilmiştir. Kopan parçacıkların bakır oranının matrise kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir.



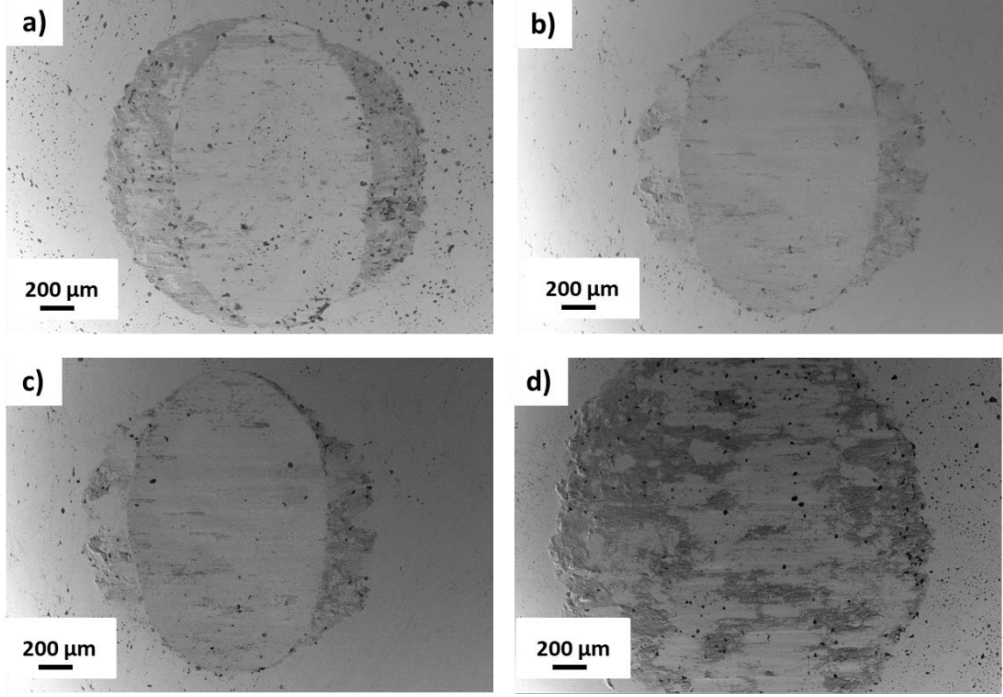
Şekil 6.7. Kuru ortamda 40N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM aşınma yüzeyi görüntüleri.



Şekil 6.8. Kuru ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası %8 bakır içeren numunenin SEM aşınma yüzeyi görüntüsü ve SEM-EDX sonucu.

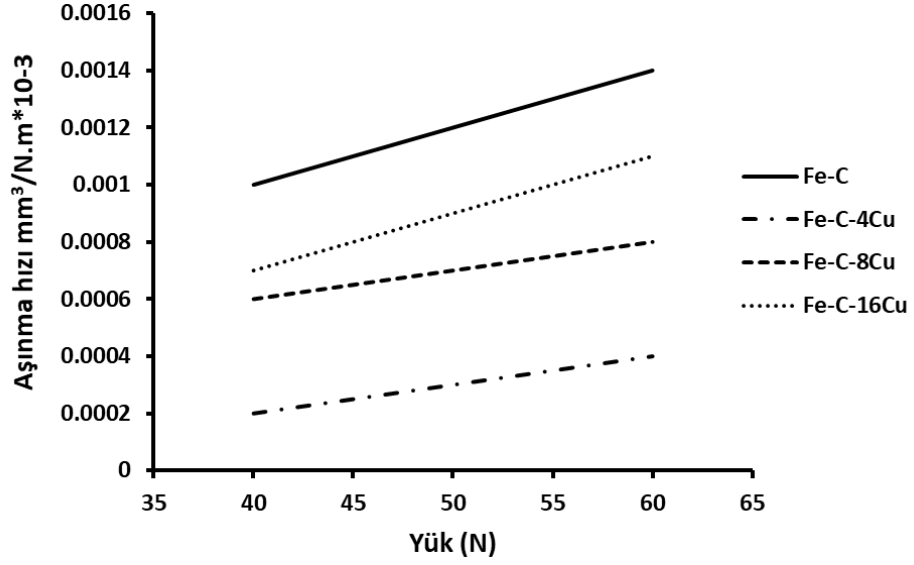
Kuru ortam aşınma testleri sonrası bilyelerin yüzeyleri

Şekil 6.9’da sunulmuştur. Aşınmanın en fazla görüldüğü Fe-C-16Cu için bilye üzerindeki izin de daha geniş oluştuğu görülmektedir.



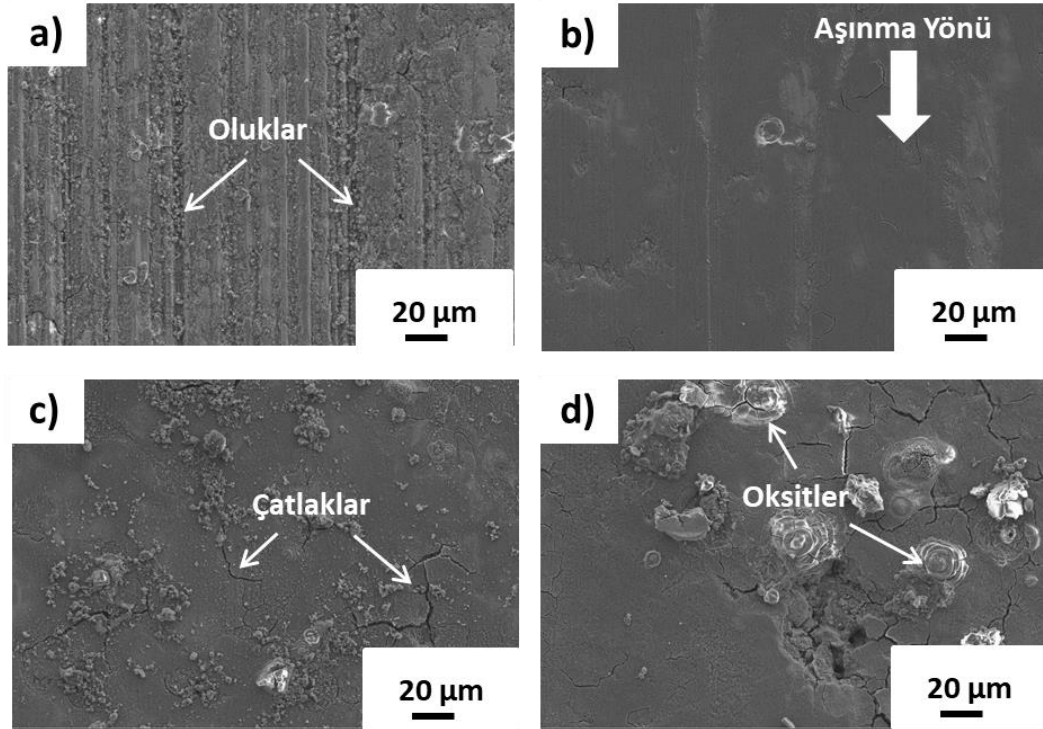
Şekil 6.9. Kuru ortam aşınma testleri sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numuneler için bilye görüntüleri.

Şekil 6.10’da korozif ortamda numunelerin farklı yükler altındaki aşınma hızları sunulmuştur. Korozif ortamdaki aşınma hızları kuru ortama göre farklılık göstermiştir. Bunun sebebi test sonucuna numunelerin aşınma direncinin yanı sıra korozyon dirençlerinin de tesir etmesidir. Nitekim literatürde yapılan çalışmalarda bakırın çeliğin korozyon direncini arttırdığı çalışmalar görülmektedir. Dolayısıyla bakır ilave edilen numunelerin korozif aşınma direnci alaşımsız numuneye kıyasla daha yüksek çıkmıştır.



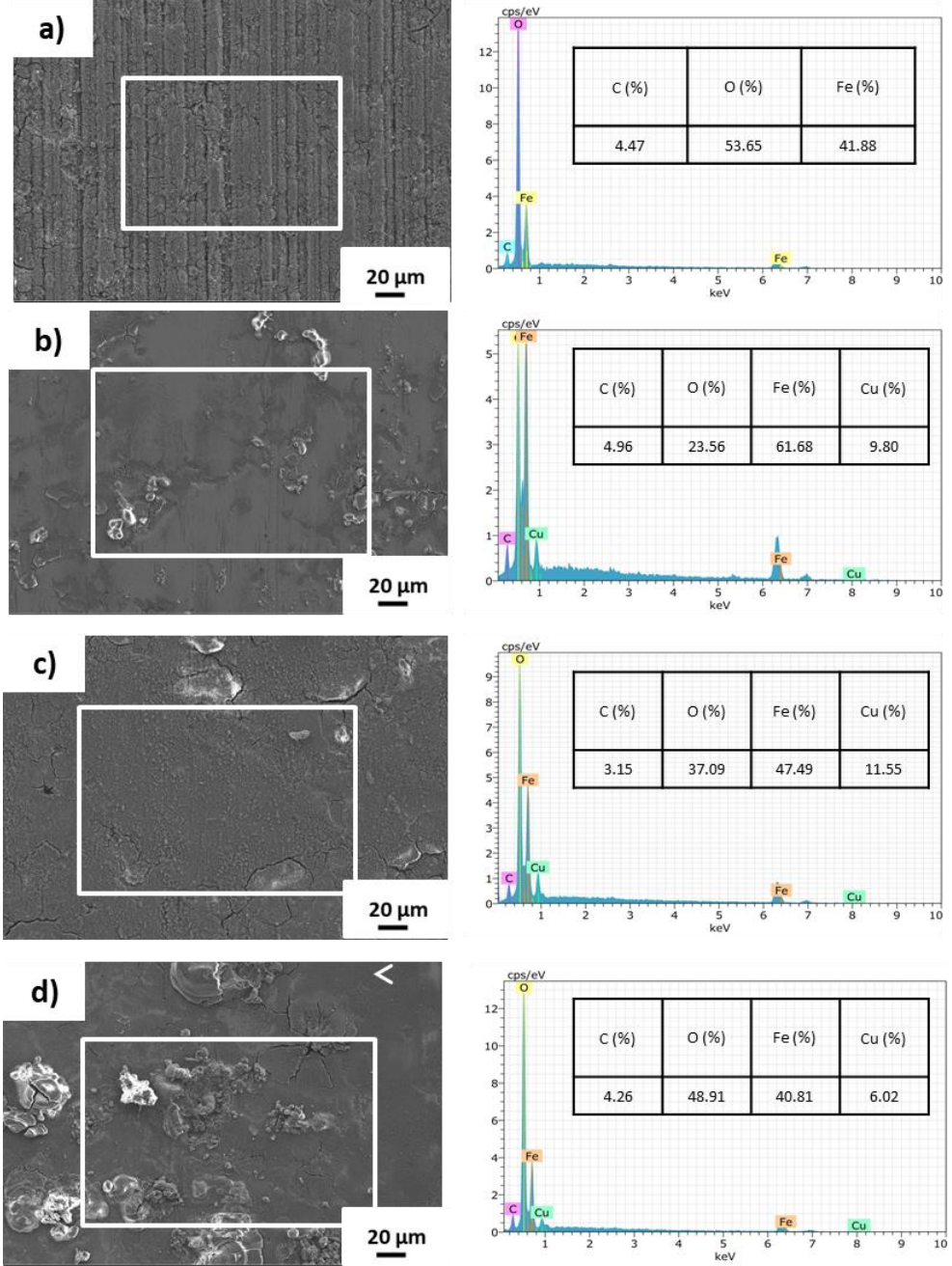
Şekil 6.10. Korozif ortamda numunelerin farklı yükler altındaki aşınma hızları.

Korozif aşınma sonrası incelenen aşınma yüzeyleri Şekil 6.11’de sunulmuştur. Alaşımız numunede olukların oluştuğu görülmektedir. Korozyona bağlı olarak numunelerde çatlaklar da gözlemlenmiştir. Ayrıca, oksit partikülleri oluşmuştur.



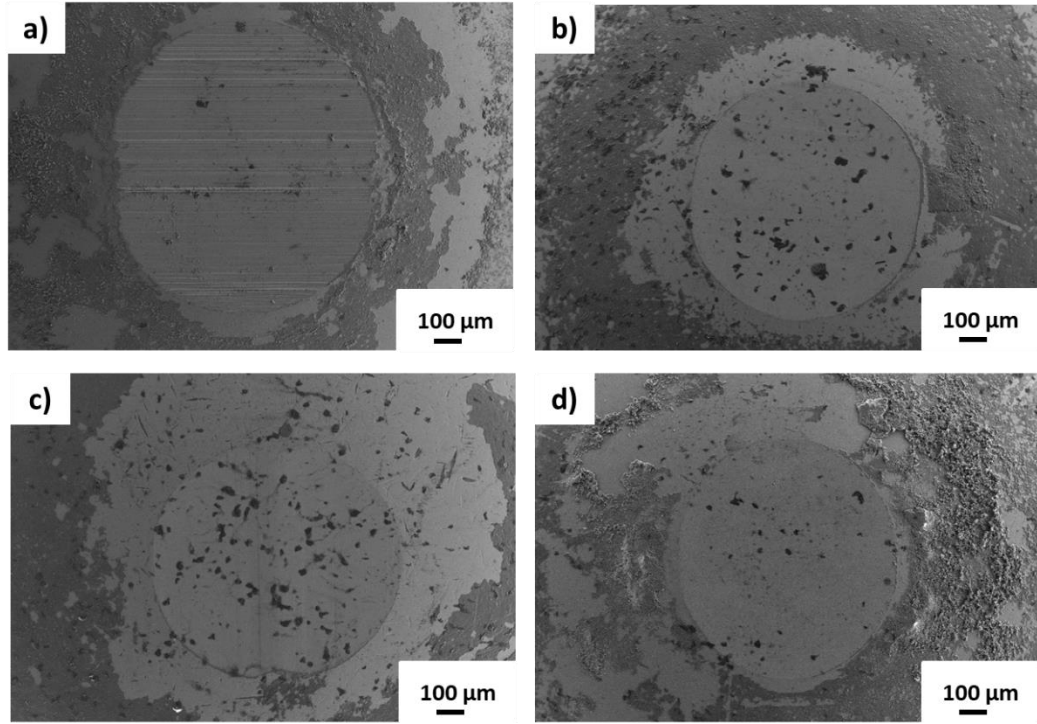
Şekil 6.11. Korozif ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM aşınma yüzeyi görüntüleri.

Şekil 6.12’de korozyif ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası numunelerin SEM aşınma yüzey görüntüleri ve SEM-EDX sonuçları sunulmuştur. SEM-EDX sonuçlarına göre oksijen miktarı en fazla alaşimsız numunede çıkmıştır. Bu oksitlenmenin bakırlı numunelerde daha az oluştuğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.12. Korozyif ortamda 60N altında gerçekleştirilen aşınma testi sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numunelerin SEM aşınma yüzey görüntüleri ve SEM-EDX sonuçları.

Şekil 6.13’de korozif ortam aşınma testleri sonrası bilyelerin aşınan yüzey görüntüleri gösterilmektedir. Bilye yüzeylerinde de oksitlenmenin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 6.13. Korozif ortam aşınma testleri sonrası a) %0, b) %4, c) %8, d) %16 bakır içeren numuneler için bilye görüntüleri.

BÖLÜM 7

SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında farklı oranlarda bakır içeren çelik numuneler toz metalürjisi yöntemiyle üretilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenmiştir:

- Gözeneklerin bakır içeren numunelerde alaşımsız numuneye göre daha az oluştuğu görülmektedir. Bunun sebebi bakırın 1083 °C'de erimesi ve sinterleme işlemi sırasında sıvı faza geçişinin bir sonucu olarak kılcal kuvvetler sayesinde ana alışımda iyi dağılmasıdır.
- %4'e kadar bakırın matris içerisinde diğer numunelere kıyasla homojen olarak dağıldığı söylenebilmektedir. Bakır oranı %4'ten %8'e çıktığında, matris içerisinde bakırın dağılımı yine söz konusudur. Ancak, bakır çökeltilerinin daha belirgin oluştuğu tespit edilmiştir. Bakır oranı %16 olan numunede ise bakır çökeltileri daha büyük olarak matris içerisinde kısmi yerlerde görülmektedir.
- Alaşımsız çelik ile bakırlı çelikler karşılaştırıldığında; bakır ilavesi arttıkça malzemelerin sertliklerinde artış gözlenmiştir. Bunun sebebi bakırın tane içinde ve sınırlarında çökmesi sonucu oluşan çökelti sertleşmesi ve tane boyutu küçültme mekanizmasına mekanizması sonucudur. Ayrıca sıvı faz sinterleme mekanizmasıyla da taneler arasında yayılarak tanelerin birbiri arasındaki metalürjik bağı kuvvetlendirmiş bu sayede de dayanıma katkı sağlamıştır.
- Çelik numunelere ağırlıkça %8'e kadar bakır ilavesinin sertlik ile beraber aşınma direncini de arttırdığı görülmektedir. Ancak, bakır oranı % 8'den % 16' ya çıktığında sertlik değerinde artış görülmesine rağmen, aşınma direnci

alaşimsız numuneye göre daha düşüktür. Bunun sebebi, Fe-C-16Cu numunesinde bakırın yüksek oranlarda topaklanmasından ötürü diğer numunelere kıyasla hacimsel kaybının yüksek olmasına, dolayısıyla da aşınma direncinin düşük olmasıdır.

- Korozif ortamdaki aşınma hızları kuru ortama göre farklılık göstermiştir. Bunun sebebi test sonucuna numunelerin aşınma direncinin yanı sıra korozyon dirençlerinin de tesir etmesidir. Dolayısıyla bakır ilave edilen numunelerin korozif aşınma direnci alaşimsız numuneye kıyasla daha yüksek çıkmıştır.

KAYNAKLAR

1. Vander Voort, G. F., Lampman, S. R., Sanders, B. R., Anton, G. J., Polakowski, C., Kinson, J., Muldoon, K., Henry, S. D., and Scott Jr, W. W., "ASM handbook", *Metallography And Microstructures*, 9: 44073–0002 (2004).
2. Committee, A. I. H., "ASM Handbook", *ASM International*, (1998).
3. Danninger, H., Calderon, R. D. O., and Gierl-Mayer, C., "Powder metallurgy and sintered materials", *Additive Manufacturing*, 19 (4): (2017).
4. Skaupy, F., "Metallkeramik, 4th Edn, Verlag Chemie", *Weinheim (In German)*, (1950).
5. Schwarzkopf, P., "Powder Metallurgy: Its Physics and Production", *Macmillan Company*, (1947).
6. Kieffer, R. and Hotop, W., "Sintereisen Und Sinterstahl", *Springer-Verlag*, (2013).
7. Groza, J. R. and Vol, A. H., "7: Powder Metal Technologies and Applications, eds", *Lee PW, Eisen WB, German RM (ASM International Handbook Committee, Ohio)*, 583–589 (1998).
8. Balasubramaniam, R., "Story of the Delhi Iron Pillar", *Foundation Books*, (2005).
9. Johnson, P. K., "TUNGSTEN FILAMENTS-THE FIRST MODERN PM PRODUCT", *International Journal Of Powder Metallurgy (1986)*, 44 (4): 43–48 (2008).
10. Schade, P., "100 years of doped tungsten wire", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 28 (6): 648–660 (2010).
11. Ortner, H. M., Ettmayer, P., Kolaska, H., and Smid, I., "The history of the technological progress of hardmetals", *International Journal Of Refractory Metals And Hard Materials*, 49: 3–8 (2015).
12. Schubert, W., "Feinst-und Ultrafeinkornhartmetalle—vom Pulver zum Werkzeug", *Keramische Zeitschrift*, 67 (7): 365–376 (2015).
13. Lindskog, P., "The history of Distaloy", *Powder Metallurgy*, 56 (5): 351–361 (2013).
14. Flodin, A., "Powder metallurgy gears: Opportunities for enhancing automotive transmission design", *Powder Metall. Review*, 3: 45–53 (2014).

15. Kuhn, H. A., "Forging and Hot Pressing", (2013).
16. German, R. M., "Metal Injection Molding: A Comprehensive MIM Design Guide", *Metal Powder Industries Federation*, (2011).
17. German, R. M., "Injection molding of metals and ceramics", *Metal Powder Industries Federation*, 3: (1997).
18. Isaza, J. F. and Aumund-Kopp, C., "Additive Manufacturing with metal powders: Design for Manufacture evolves into Design for Function", *Powder Metallurgy Review*, 3 (2): 41–50 (2014).
19. Whittaker, D., "Innovation drives powder metallurgy structural components forward in the automotive industry", *Powder Metallurgy Review*, 4 (2): 35–53 (2015).
20. German, R. M., "Markets applications, and financial aspects of global metal powder injection moulding (MIM) technologies", *Metal Powder Report*, 1 (67): 18–26 (2012).
21. Johnson, P. K., "METAL INJECTION MOLDING TRENDS–2016.", *International Journal Of Powder Metallurgy*, 52 (1): (2016).
22. Schatt, W. and Wieters, K., "Powder metallurgy-process and materials", *European Powder Metallurgy Association, UK*, (1997).
23. Wahlster, M., Stephan, H., and Ruthardt, R., "COST ESTIMATES AND ECONOMIC-CONSIDERATIONS IN THE PRODUCTION AND PROCESSING OF HIGH-QUALITY METAL POWDERS", *Powder Metallurgy International*, 12 (4): 173–178 (1980).
24. Lawley, A., "Atomization: the production of metal powders", *Metal Powder Industries Federation, 1105 College Rd. East, Princeton, New Jersey 08540-6692, USA, 1992. 159*, (1992).
25. Lubanska, H., "Correlation of spray ring data for gas atomization of liquid metals", *JOM*, 22 (2): 45–49 (1970).
26. Yule, A. J. and Dunkley, J. J., "Spray Deposition, Atomization of Melts", (1994).
27. Gerking, L., "Powder from metal and ceramic melts by laminar gas streams at supersonic speeds", *Powder Metallurgy International*, 25 (2): 59–65 (1993).
28. MAURYA, H. S., "Feedstock preparation with wax based binder and green micromachining of cemented carbide", (2019).
29. Euro, P. M., "Olle Grinder: plenary presentation on “Evolution of the European Powertrain—a Focus on PEV and PHEV”", (2009).

30. Kaysser, W. A. and Weise, W., "Powder metallurgy and sintered materials", *Ullmann's Encyclopedia Of Industrial Chemistry*, (2000).
31. Eisen, W. B., Ferguson, B. L., German, R. M., Iacocca, R., Lee, P. W., Madan, D., Moyer, K., Sanderow, H., and Trudel, Y., "Powder metal technologies and applications", (1998).
32. Fischmeister, H. F. and Arzt, E., "Densification of powders by particle deformation", *Powder Metallurgy*, 26 (2): 82–88 (1983).
33. Ernst, E., Thümmeler, F., Beiss, P., Wähling, R., and Arnhold, V., "Friction measurements during powder compaction", *PMI. Powder Metallurgy International*, 23 (2): 77–84 (1991).
34. Hoganas, A. B., "Hoganas Hand Book for Warm Compaction", *Sweden*, (1998).
35. James, W. B., Narasimhan, K. S., and Han, F. L., "Warm compaction and warm-die compaction of ferrous PM materials", *Powder Metall. Technol*, 6: 463–474 (2013).
36. Guillon, O., Gonzalez-Julian, J., Dargatz, B., Kessel, T., Schierning, G., Räthel, J., and Herrmann, M., "Field-assisted sintering technology/spark plasma sintering: mechanisms, materials, and technology developments", *Advanced Engineering Materials*, 16 (7): 830–849 (2014).
37. Frazier, W. E., "Metal additive manufacturing: a review", *Journal Of Materials Engineering And Performance*, 23 (6): 1917–1928 (2014).
38. Bradbury, S., "Powder metallurgy equipment manual", (1986).
39. Ernst, E., "Energy balance of a belt sinter furnace", *Powder Metallurgy*, 56 (2): 96–101 (2013).
40. German, R. M., "History of sintering: empirical phase", *Powder Metallurgy*, 56 (2): 117–123 (2013).
41. Kang, S.-J. L., "Sintering: Densification, Grain Growth and Microstructure", *Elsevier*, (2004).
42. Dlapka, M., Strobl, S., Danninger, H., and Gierl, C., "Austenite grain size in sinter hardened powder metallurgy steels", *Praktische Metallographie/Practical Metallography*, 47 (12): 686 (2010).
43. Danninger, H., Spoljaric, D., Jangg, G., Weiss, B., and Stickler, R., "Characterization of pressed and sintered ferrous materials by quantitative fractography", *Praktische Metallographie*, 31 (2): 56–69 (1994).
44. Molinari, A., Menapace, C., Torresani, E., Cristofolini, I., and Larsson, M., "Working hypothesis for origin of anisotropic sintering shrinkage caused by prior uniaxial cold compaction", *Powder Metallurgy*, 56 (3): 189–195 (2013).

45. Danninger, H., Wang, Y., Wolfsgruber, E., and Seyrkammer, J., "Reactive sinter brazing of PM aluminium to sintered and wrought steels", *Pow. Metall. Progress*, 5: 199 (2005).
46. German, R. M. and Munir, Z. A., "Enhanced low-temperature sintering of tungsten", *Metallurgical Transactions A*, 7 (12): 1873–1877 (1976).
47. German, R. M., "Liquid Phase Sintering", *Springer Science & Business Media*, (2013).
48. Kingery, W. D., "Densification during sintering in the presence of a liquid phase. I. Theory", *Journal Of Applied Physics*, 30 (3): 301–306 (1959).
49. Hayashi, K., Fuke, Y., and Suzuki, H., "Effects of addition carbides on the grain size of WC-Co alloy", *Journal Of The Japan Society Of Powder And Powder Metallurgy*, 19 (2): 67–71 (1972).
50. Neubing, H.-C., Gradl, J., and Danninger, H., "Sintering and microstructure of Al-Si P/M components", *ADVANCES IN POWDER METALLURGY AND PARTICULATE MATERIALS*, (13): 13–128 (2002).
51. Dautzenberg, N. and Dorweiler, H. J., "Dimensional behaviour of copper-carbon sintered steels", *PMI. Powder Metallurgy International*, 17 (6): 279–282 (1985).
52. Lenel, F. V., "Powder Metallurgy: Principles and Applications", *Metal Powder Industry*, (1980).
53. Danninger, H., Pöttschacher, R., Bradac, S., Šalák, A., and Seyrkammer, J., "Comparison of Mn, Cr and Mo alloyed sintered steels prepared from elemental powders", *Powder Metallurgy*, 48 (1): 23–32 (2005).
54. Höganäs, A. B., "Höganäs handbook for sintered components", *Sweden: Höganäs*, (2004).
55. Simsir, H., Akgul, Y., and Erden, M. A., "Hydrothermal carbon effect on iron matrix composites produced by powder metallurgy", *Materials Chemistry And Physics*, 242: 122557 (2020).
56. Wong-Ángel, W. D., Téllez-Jurado, L., Chávez-Alcalá, J. F., Chavira-Martínez, E., and Verduzco-Cedeño, V. F., "Effect of copper on the mechanical properties of alloys formed by powder metallurgy", *Materials & Design*, 58: 12–18 (2014).
57. Wanibe, Y., Yokoyama, H., and Itoh, T., "Expansion during liquid phase sintering of iron–copper compacts", *Powder Metallurgy*, 33 (1): 65–69 (1990).
58. Agunsoye, J. O., Bello, S. A., Hassan, S. B., Adeyemo, R. G., and Odii, J. M., "The effect of copper addition on the mechanical and wear properties of grey cast iron", *Journal Of Minerals And Materials Characterization And Engineering*, 2 (05): 470 (2014).

59. Narasimhan, K. S., "Sintering of powder mixtures and the growth of ferrous powder metallurgy", *Materials Chemistry And Physics*, 67 (1–3): 56–65 (2001).
60. Abdou, S., Elkaseer, A., Kouta, H., and Abu Qudeiri, J., "Wear behaviour of grey cast iron with the presence of copper addition", *Advances In Mechanical Engineering*, 10 (10): 1687814018804741 (2018).
61. Uygur, I., "Influence of manganese addition on mechanical properties of Fe-Cu-C steels", *J. Fac. Eng. Archit. Gazi Univ*, 22: 325–330 (2007).
62. Erden, M. A., ODABAŞI, Ç., FERİK, F., and Kuyupınar, Ö., "TOZ METALURJİSİ İLE ÜRETİLEN ALAŞIMSIZ ÇELİĞE BAKIR İLAVESİNİN MİKROYAPI MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI", *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 7 (1): 68–74 .
63. Özdemirler, D., Gündüz, S., and Erden, M. A., "Influence of NbC addition on the sintering behaviour of medium carbon PM steels", *Metals*, 7 (4): 121 (2017).
64. Erden, M. A., BARLAK, S., ADALI, B., and ÇELİKKIRAN, Ö., "Toz Metalurjisi İle Üretilen Nb-V Mikroalaşım Çeliğine Vanadyum İlavesinin Mikroyapı Mekaniksel Özellikleri Üzerine Etkisi", *Düzce Üniversitesi Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 6 (3): 629–636 (2018).
65. Stepanova, N., Zimogliadova, T., Ognev, A., Krivizhenko, D., Maliutina, Y., and Zimogliadova, O., "Effect of copper on the structure and antifriction properties of cast hypoeutectoid steel", *IOP Conference Series: Materials Science And Engineering*, 286 (1): 012024 (2017).
66. Syarif, J., Iswadi, A., Ghazali, M. J., Sajuri, Z., and Omar, M. Z., "Wear behavior of copper-containing ferritic iron under a dry sliding condition", *Journal Of Zhejiang University SCIENCE A*, 14 (12): 906–914 (2013).

ÖZGEÇMİŞ

Kerem Alper ACAR 1993 yılında İstanbul’da doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini aynı şehirde tamamladı. 2013 yılında Karabük Üniversitesi, İmalat Mühendisliği Bölümünde öğrenime başlayıp 2018 yılında mezun oldu. 2018 yılında yüksek lisans eğitimine Karabük Üniversitesi, Makine Mühendisliği anabilim dalında başlamıştır.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Ümraniye/İstanbul

Tel : 0530 245 9148

E-posta : keremalperacar@gmail.com