

**TUNGSTEN ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN
DEMİR VE BAKIRIN AŞINMA DAVRANIŞI
ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

**2013
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

Murat KILIÇ

**TUNGSTEN ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN DEMİR VE BAKIRIN
AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Murat KILIÇ

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

KARABÜK

Haziran 2013

Murat KILIÇ tarafından hazırlanan “TUNGSTEN ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN DEMİR VE BAKIRIN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 28 / 06 / 2013

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan: Prof. Dr. Mustafa BOZ (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)

Üye : Doç. Dr. Ali GÜNGÖR (KBÜ)

.../.../2013

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Nizamettin KAHRAMAN

Fen Bilimleri 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.”

Murat KILIÇ

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TUNGSTEN ALAŞIMLARINA İLAVE EDİLEN DEMİR VE BAKIRIN AŞINMA DAVRANIŞI ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Murat KILIÇ

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK

Haziran 2013, 78 sayfa

Bu çalışmada, W-Ni alaşımlarına ilave edilen Fe ve Cu'nun alaşımın aşınma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. W-Ni-Fe ve W-Ni-Cu alaşımları toz metalurjisi yöntemiyle 6 farklı bileşimde üretilmiştir. Farklı bileşimlerde üretilen alaşımlar şekillendirme ve sinterleme işlemlerinden sonra mikroyapı incelemeleri yapılmıştır. Toz metalurjisi ile üretilen W-Ni-Fe ve W-Ni-Cu alaşımları yoğunluk, sertlik, tane boyutu ölçümleri, tarama elektron mikroskobu (SEM+EDS) ve X-ışını kırınımı (XRD) ile karakterize edilmiştir. Aşınma testlerinde pin-on-disk tipi aşınma ünitesi kullanılmıştır. Tüm numuneler 20 N yük, 1 m sn^{-1} ve toplamda beş farklı (600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m) kayma mesafesinde test edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda, Fe ve Cu ilave edilen alaşım gruplarında W oranı arttıkça alaşımın yoğunluğunun ve sertliğinin arttığı gözlemlenmiştir. Aşınma testleri sonucunda yine W oranı arttıkça alaşımın aşınma direncinin arttığı belirlenmiştir.

Anahtar Sözcükler: Tungsten ağır alaşımı, toz metalurjisi, karakterizasyon, sıvı faz sinterleme, aşınma.

Bilim Kodu : 916.1.140

ABSTRACT

M.Sc. Thesis

AN INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF IRON AND COPPER ADDITION ON WEAR BEHAVIOUR OF TUNGSTEN ALLOYS

Murat KILIÇ

**Karabuk University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Manufacturing Engineering**

Thesis Advisor: Assoc. Prof. Dursun ÖZYÜREK

June 2013, 78 pages

In this study, the effects of Fe and Cu addition on wear characteristic of W-Ni alloys were investigated. W-Ni-Fe and W-Ni-Cu alloys were produced in 6 different compositions by powder metallurgy method. After forming and sintering, the microstructure of these alloys were characterized by Scanning Electron Microscopy (SEM+EDS), and X-Ray diffraction (XRD). Density, hardness and grain size measurements were examined. Pin-on-disc type test unit was used for wear tests. All samples were performed under 20 N load. with 1 m/sn^{-1} sliding speed and 5 different sliding distance (600, 1200,1800, 2400, 3000 m). As a result of this study, it is observed that the density and hardness values of Fe and Cu added alloys are increased with increasing W content. At the end of the wear tests, it is also observed that the wear resistance is increased with increasing W content in the alloy.

Anahtar Sözcükler: Tungsten heavy alloy, powder metallurgy, characterization, liquid phase sinterin, wear.

Bilim Kodu : 916.1.140

TEŞEKKÜR

Tez çalıŐmalarım sÜresince hertÜrlÜ yardımı esirgemeyen, doğru yÖnlendirmelerle zaman kazanmamı sağlayan değerli danıŐman hocam Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK'e yürekten teşekkür ederim. Ayrıca numune üretimleri, test, analiz ve sonuçların incelenmesinde özveriyle yardım eden mesai arkadaşlarım Dr. N. Kaan ÇALIŐKAN'a, A. Egemen VARLI'ya üretim altyapılarındaki işlerimde yardımcı olan tüm teknisyen arkadaşlara, yüksek lisans eğitimim boyunca anlayıŐlı tutum sergileyen savunma sektörünün kalbi TÜBİTAK-SAGE'deki amirlerime ve yöneticilerime teŐekkürü borç bilirim. AŞınma testlerini yapan lisans öğrencilerine ayrıca teşekkür ederim.

Aynı zamanda, bu çalışmanın gerçek mimarı olan eşime ve çocuklarıma gösterdikleri anlayıŐtan dolayı minnettarım.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
TOZ METALURJİSİ	3
2.1. TOZ METALURJİSİNİN TANIMI.....	3
2.2. TOZLARIN ÜRETİLMESİ	5
2.2.1. Öğütme	7
2.2.2. Fiziksel Üretim Yöntemi	8
2.2.3. Kimyasal İndirgeme	9
2.2.4. Gaz Atomizasyonu Yöntemi	9
2.3. TOZLARIN HAZIRLANMASI.....	11
2.3.1. Ön İşlemler	11
2.3.1.1. Metal Tozlarının Elekten Geçirilmesi.....	11
2.3.1.2. Tavlama.....	11
2.3.2. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması.....	11
2.3.3. Yağlayıcılar	12
2.3.4. Tozların Boyut ve Şekilleri.....	12
2.4. ŞEKİLLENDİRME	13

2.4.1. İzostatik Presleme.....	16
2.4.1.1. Soğuk İzostatik Presleme (CIP).....	17
2.4.1.2. Sıcak İzostatik Presleme (HIP).....	18
2.5. SİNERLEME.....	20
2.5.1. Katı Faz Sinterleme.....	21
2.5.1. Sıvı Faz Sinterleme.....	24
2.6. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI.....	25
2.6.1. Toz Metalurjisinin Avantajları.....	25
2.6.1. Toz Metalurjisinin Dezavantajları.....	25
BÖLÜM 3.....	26
TUNGSTEN VE TUNGSTEN AĞIR ALAŞIMLARI.....	26
3.1. TUNGSTEN.....	26
3.2. TUNGSTEN AĞIR ALAŞIMLARININ TANIMI.....	27
3.2.1. Sinterleme Atmosferi ve Sinterleme.....	28
3.3. TAA'DA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN KARAKTERİZASYONU.....	30
BÖLÜM 4.....	31
AŞINMA.....	31
4.1. GİRİŞ.....	31
4.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER.....	33
4.3. AŞINMA MEKANİZMALARI.....	34
4.3.1. Adhezif Aşınma.....	34
4.3.2. Abrazif Aşınma.....	35
4.3.3. Yorulma Aşınması.....	36
4.3.4. Eroziv Aşınma.....	36
4.3.5. Oymalı Aşınma.....	36
4.3.6. Kazımalı Aşınma.....	37
BÖLÜM 5.....	38
MALZEME VE METOT.....	38
5.1. GİRİŞ.....	38
5.2. TOZLARIN HAZIRLANMASI.....	38
5.3. TOZLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ.....	40

5.4. SİNERLEME	41
5.5. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMA	43
5.6. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ	43
5.7. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ	44
5.8. AŞINMA TESTLERİ.....	44
5.8.1. Aşınma Deney Cihazı	44
5.8.2. Karşılık Diski ve Malzemesi	45
5.8.3. Aşınma Deneyleri	45
5.9. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMESİ	46
5.10. ENERJİ DAĞILIMLI X-IŞINI SPEKTROSKOPİSİ İNCELEMESİ.....	46
5.11. TANE BOYUTU ÖLÇÜMLERİ	46
5.12. X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ	47
BÖLÜM 6	48
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA	48
6.1. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ	48
6.2. SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ	49
6.3. MİKROYAPI İNCELEMELERİ	51
6.3.1. SEM ve EDS Analizleri.....	51
6.3.2. Tane Boyutu Ölçümlerinin Değerlendirilmesi	57
6.3.3. XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi.....	57
6.4. AŞINMA TESTİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	61
6.4.1. Aşınma Testi Sonuçları	62
6.4.2. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi.....	67
BÖLÜM 7	73
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
7.1. SONUÇLAR	73
7.2. ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	78

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Toz Metalürjisi işlem basamakları	5
Şekil 2.2. Öğütme düzeneği şematik gösterimi.....	8
Şekil 2.3. Elektrolizin şematik gösterimi	8
Şekil 2.4. Atomizasyon sistemleri.....	10
Şekil 2.5. ISO 3252 standardına göre toz parçacık şekilleri.....	13
Şekil 2.6. Toz metal parçaların presleme basamakları.....	14
Şekil 2.7. Sıkıştırmanın metalurjik açıdan gösterimi.....	15
Şekil 2.8. Tek yönlü preslemede eşit dağılmayan yoğunluğun gösterimi.....	16
Şekil 2.9. Basınç – Yoğunluk ilişkisi.....	16
Şekil 2.10. CIP işleminin şematik olarak gösterimi.....	18
Şekil 2.11. HIP akışlarının gösterimi.....	20
Şekil 2.12. Katı faz sinterleme aşamalarının mikroskopik düzeyde şematığı	21
Şekil 2.13. Boyun bölgesinde meydana gelen sinterleme mekanizmaları.....	23
Şekil 2.14. Toz boyutunun tozların sinterleme yoğunluğu üzerine etkisi.....	23
Şekil 2.15. Sıvı fazlı sinterleme aşamalarının mikro düzeyde şematığı.....	24
Şekil 4.1. Tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi.....	32
Şekil 4.2. Aşınmanın sınıflandırılması.....	33
Şekil 4.3. Adhezif aşınmanın şematik gösterimi.....	35
Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan elementel tozların SEM görüntüleri...39	39
Şekil 5.2. Turbula® Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) karıştırıcı.....39	39
Şekil 5.3. Numelerin şekillendirilmesinde kullanılan Ø12 metal kalıp.....40	40
Şekil 5.4. Deney numunelerinin preslendiği ARI marka pres.....41	41
Şekil 5.5. Sinterlemelerin yapıldığı LINN marka HT-1800-M-Vac model fırın....42	42
Şekil 5.6. W-Ni-Fe alaşımları için sinterleme döngüsü grafiği.....42	42
Şekil 5.7. W-Ni-Cu alaşımları için sinterleme döngüsü grafiği.....43	43
Şekil 6.1. A1-A2-A3 için yoğunluk (g/cm ³) değişimi.....48	48
Şekil 6.2. B1-B2-B3 için yoğunluk (g/cm ³) değişimi.....49	49
Şekil 6.3. A1-A2-A3 için sertlik (HRC) değişimi.....50	50

Şekil 6.4. B1-B2-B3 için sertlik (HRC) değişimi.....	50
Şekil 6.5. 90W-7Ni-3Fe (A1) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.....	51
Şekil 6.6. 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.....	52
Şekil 6.7. 97W-2,1Ni-0,9Fe (A2) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.....	53
Şekil 6.8. 90W-7Ni-3Cu (B1) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.....	54
Şekil 6.9. 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.....	55
Şekil 6.10. 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.....	56
Şekil 6.11. 90W-7Ni-3Fe (A1) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.....	58
Şekil 6.12. 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.....	58
Şekil 6.13. 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.....	59
Şekil 6.14. 90W-7Ni-3Cu (B1) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.....	60
Şekil 6.15. 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.....	60
Şekil 6.16. 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.....	61
Şekil 6.17. 20N yük uygulanmış A1-A2-A3 kodlu numunelerin aşınma işlemi Sonucu ağırlık kayıpları.....	62
Şekil 6.18. 20N yük uygulanmış B1-B2-B3 kodlu numunelerin aşınma işlemi sonucu ağırlık kayıpları.....	63
Şekil 6.19. 20N yük uygulanmış A1-A2-A3 kodlu numunelerin aşınma oranları....	64
Şekil 6.20. 20N yük uygulanmış B1-B2-B3 kodlu numunelerin aşınma oranları....	65
Şekil 6.21. A1-A2-A3 kodlu numunelerin sürtünme katsayıları sonuçları.....	66
Şekil 6.22. B1-B2-B3 kodlu numunelerin sürtünme katsayıları sonuçları.....	67
Şekil 6.23. 90W-7Ni-3Fe (A1), 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2), 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3), 90W-7Ni-3Cu (B1), 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2), 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) kompozisyonlu numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri.....	68
Şekil 6.24. 90W-7Ni-3Fe (A1) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri...	69
Şekil 6.25. 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri	69
Şekil 6.26. 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.....	70
Şekil 6.27. 90W-7Ni-3Cu (B1) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri...	71

Şekil 6.28. 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.....	71
Şekil 6.29. 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.....	72

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler.....	6
Çizelge 2.2. T/M’de kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları.....	7
Çizelge 2.3. CIP yönteminde çeşitli metal tozlarına uygulanan basınç değerleri.....	18
Çizelge 3.1. Yüksek yoğunluklu alaşım ve elementlerin karşılaştırılması.....	28
Çizelge 5.1. Kimyasal Bileşimler ve anma kodlamaları.....	38
Çizelge 5.2. Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların özellikleri.....	39
Çizelge 5.3. ASTM B777-07 satandardı Tungsten Ağır Alaşımları yoğunluk ve sertlik değerleri çizelgesi.....	44
Çizelge 6.1. A1 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.....	52
Çizelge 6.2. A2 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.....	53
Çizelge 6.3. A3 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.....	53
Çizelge 6.4. B1 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.....	54
Çizelge 6.5. B2 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.....	55
Çizelge 6.6. B3 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.....	56
Çizelge 6.7. A1 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.....	69
Çizelge 6.8. A2 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.....	70
Çizelge 6.9. A3 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.....	70
Çizelge 6.10. B1 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.....	71
Çizelge 6.11. B2 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.....	72
Çizelge 6.12. B3 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.....	72

SİMGELER VE KISALTMALAR

SİMGELER

W	: Tungsten
Ni	: Nikel
Fe	: Demir
Cu	: Bakır
F	: Kuvvet
P	: Basınç
A	: Alan
g	: Gram
m	: Metre
km	: Kilometre
μm	: Mikron
$^{\circ}\text{C}$: Derece
MPa	: Megapascal
H ₂	: Hidrojen
ml	: Mililitre
Dv/dk	: Devir sayısı
N	: Newton

KISALTMALAR

T/M	: Toz metalurjisi
TAA	: Tungsten ağır alaşımları
CIP	: Soğuk izostatik presleme
HIP	: Sıcak izostatik Presleme
SEM	: Tarama elektron mikroskop
EDS	: Enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Toz metalurjisi (T/M), istenilen kimyasal kompozisyonu verecek şekilde karıştırılmış metal tozlarının, oda sıcaklığında, üretilecek parça şekil ve boyutlarına sahip kalıp içinde sıkıştırılarak şekillendirildikten sonra, yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi ile gerçekleştirilen üretim yöntemidir [1].

Bu yöntemin üretim sektörü için önemi ise, geleneksel üretim yöntemleri olarak tanımlanan döküm ve talaşlı üretim gibi yöntemlerle üretilmeleri zor veya imkansız olan parçaların kolaylıkla üretilebilmesidir. Ayrıca bu yöntemle, yüksek ergime dereceli metal ve alaşımlarından ekonomik, hızlı ve hassas parçalar üretmek mümkündür. Bütün bunların yanısıra talaşlı üretiminin vazgeçilemez enstrümanı olan ve yüksek hızlarda parça işlemeye olanak sağlayan, aşınma ve yüksek sıcaklık dayanımları mükemmel yakın kesici uçların T/M kullanılmadan üretilmemesi, T/M yönteminin öneminin belirtilmesi açısından çarpıcı bir örnektir.

Çok yüksek sıcaklıklara ve aşınmaya maruz kalan parçaların üretimlerinde, tungsten ve tungsten alaşımları tercih edilmektedir. Tungstenin 3410 °C ergime sıcaklığı ile en yüksek ergime sıcaklığına sahip metal olması, T/M yöntemiyle üretimini zorunlu hale getirmektedir. Toz halindeki tungstene çalışma koşullarına uygun alaşım elementleri ilave edilerek ekonomik, hızlı ve hassas parçalar üretilebilmektedir [2].

Tungsten Ağır Alaşımları (TAA), ağırlıkça %90-98 tungsten içeren ve bağlayıcı faz olarak nikel-demir veya nikel-bakır kullanılan ticari bileşimlerdir. TAA, sahip olduğu 17-18.5 g/cm³lük yoğunluk, 27-30 HRC sertlik, yüksek mekanik dayanım, iyi işlenebilirlik, korozyon ve aşınma direnci gibi üstün mekanik özelliklere sahiptir. Bu nedenle, hava araçlarında kullanılan motorlar için karşı ağırlık ve eylemsizlik kitlelerinin yapımında, çok yüksek yüke ve aşınmaya maruz kalan yarış otomobilleri

kranklarında, radyoaktif geçirgenliklerinin düşük olması sebebiyle tıbbi cihazlarda kalkan olarak, gelişmiş mühimmat sistemlerinde kinetik enerjili zırh delici yapımında, spor aletlerinde ve avcılıkta kurşun içermeyen mermi yapımında kullanılmaktadır. Ticari olarak üretilen TAA'lar için sahip olması gereken mekanik özellikler, MIL-T-21014D, ASTM B777-7, AMS-7725B standartlarında tanımlanmıştır. Mekanik özelliklerin standart değerlere ulaşması, kullanılan tozların saflığına ve sinterleme atmosferinin kontrolüne bağlıdır [3].

Bu çalışmanın amacı, özellikle savunma sanayi uygulamalarında kullanılan W-Ni alaşımlarına farklı oranlarda ilave edilen Fe ve Cu'nun, alaşımın mikroyapısal özelliklerine ve aşınma davranışına etkisinin incelenmesidir. Yapılan çalışma ile, W-Ni alaşımında öncelikli olarak hangi alaşım elementinin aşınma dayanımını arttırdığını, daha sonra ise en yüksek aşınma dayanımına sahip olan bileşimler ile aşınma dayanımına katkı sağlayan mekanizmaların belirlenmesi hedeflenmiştir.

BÖLÜM 2

TOZ METALURJİSİ

2.1. TOZ METALURJİSİNİN TANIMI

Tozların istenilen geometriye sahip olacak şekilde bir araya getirilmesiyle parça üretme yöntemine toz metalürjisi (T/M) denir. Tozların üretimi, özellikleri, kalıplanması ve elde edilen parçanın kullanılabilirlik testleri gibi alt başlıkların tamamı da toz teknolojisi kapsamında incelenmektedir.

T/M birçok yerde geleneksel olmayan üretim yöntemleri arasında gösterilse de, bir asrı aşan süredir kullanılmakta ve yöntemle ilgili çok sayıda akademik çalışma yapılmaktadır. Özellikle I. ve II. Dünya Savaşları'nın sebep olduğu daha fazla üretme gereksinimleri ve otomotiv sektöründeki olağanüstü büyüme, bu yöntemin daha da geliştirilmesi yönündeki çalışmaları hızlandırmaktadır [4]. Geleneksel üretim yöntemlerinde olduğu gibi T/M yönteminde de hala geliştirme çalışmaları devam etmektedir. Ülkemizde T/M 1960'lı yıllarda akademik çalışmalar düzeyinde başlamıştır. Bugün otomotiv, savunma, havacılık gibi üretim sektörlerinin birçok alanında kullanılan bir yöntem haline gelmiştir.

T/M ürünlerinin özellikleri, parçacıkların şekli, boyutu, bileşimi, kullanılan yağlayıcı tipi, presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve süresi ile bitirme işlemleri gibi çok sayıda değişkene bağlıdır. T/M yöntemi kullanılarak üretilen parçaların yoğunlukları geniş bir aralıkta değişirken, çekme mukavemetleri 70 MPa ila 1250 MPa arasında değişmektedir. Bazı durumlarda bu yöntemle üretilen malzemelerin çekme mukavemetini 1250 MPa'nın üzerine çıkarmak da mümkündür. Genellikle mekanik özellikler yoğunlukla ilişkilidir. Yoğunluğun tokluk, süneklik ve sürünme direnci ile ilişkisi, mukavemet ve sertlik değerlerine göre daha fazladır.

Düşük mukavemetli metal ve alaşımlarından üretilen sinter ürünlerinin mekanik özellikleri, dövme tekniği ile üretilen ürünlere eşdeğerdir. Yüksek mukavemetli parçaların üretimi için elementel metal tozları ilave edilen alaşım elementi miktarı kritik bir oranın üzerinde artırıldığında ise, (elde edilen eşdeğer dövme ürünlerine göre özelliklerinde) mekanik özelliklerde dikkate değer bir azalma meydana gelmektedir. Daha yüksek yoğunlukta parçaların üretimi için yüksek kapasiteli presler kullanılmaktadır. Presleme işlemi oda sıcaklığı şartlarında yapıldığı gibi sıcak izostatik presleme ile de yapılabilmektedir. Böylece elde edilen yoğunluk değerleri, dövme ürünlerinin özelliklerine yaklaşır. Tam yoğunluğa ulaşılması ve çok ince tane boyutunun sağlanması halinde ise, toz parçaların mekanik özellikleri dövme ürünlerinin üzerine çıkmaktadır.

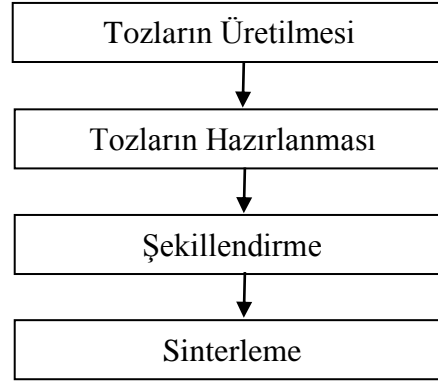
T/M yöntemiyle üretilen parçalarda meydana gelen gözenekli yapı, parçaların fiziksel özelliklerini olumsuz etkiler. Bu nedenle artan gözenek oranı parçaların korozyon direncini azaltır. Diğer yandan gözenek, ses ve titreşim söndürme özelliğini arttırmaktadır. Bu nedenle toz metalürjisi ürünlerinin önemli bir kısmı, gözeneklerin sağladığı avantajları kullanmak üzere tasarlanmıştır. Manyetik, elektrik ve ısı iletkenlik özellikleri, yoğunluğa bağlı olarak değişmektedir.

Toz metalürjisinin en önemli amacı ise, mühendislik uygulamalarında düşük maliyetli ve kaliteli parça üretiminin sağlanmasıdır. Üretimin başarılı olması için parça tasarımı, malzeme seçimi ve uygun üretim altyapısı son derece önemlidir. T/M parçalarının tasarımında dikkate alınması gereken hususlar şu şekilde özetlenebilir:

- Parça şekli preslemeden sonra kalıptan çıkarmaya uygun olmalıdır.
- Parça şekli tozun ince duvarlar ve keskin köşeler gibi küçük boşlukların doldurulmasını gerektirmemelidir.
- Parça şekli dayanıklı kalıp üretimine uygun olmalıdır.
- Parça şekli presleme ile elde edilebilecek kesit kalınlığı değerlerine uygun olmalıdır.
- Parçaların kesit farklılığı mümkün olduğunca az olmalıdır.
- Ürünlerin boyutsal toleransları dikkate alınmalıdır.

- Sinterleme sırasındaki hacimsel küçülme gibi boyutsal değişimler, kalıp tasarımı sırasında dikkate alınmalıdır.
- Mukavemetin bütün parça boyunca homojen olması için yoğunluğunda homojen olması gerekir. Bu sebeple parçalar, üniform kesitli ve kesit boyutlarına göre kalınlık değerleri küçük olacak şekilde tasarlanmalıdır.

Yukarıda belirtilen hususlar dikkate alınarak yapılan parça üretiminde işlem basamakları Şekil 2.1’de ana başlıklar halinde gösterilmektedir.



Şekil 2.1. Toz Metalürjisi işlem basamakları [3].

2.2. TOZLARIN ÜRETİLMESİ

T/M yöntemiyle üretilen bir parçanın bitmiş ürün özellikleri, toz parçacıklarının şekli, boyutu ve yüzey alanı gibi etkenlere bağlıdır. Tozların yüzey şekli şekillendirme sırasındaki akıcılık davranışlarını etkilemektedir. Genel olarak tozların yüzey şekli düzensizdir. Ayrıca küresel veya küresele yakın olan tozların kalıp içerisine akış davranışları ile kalıp içerisinde paketlenme özellikleri daha iyi olmaktadır. Ayrıca aynı malzeme türü için küresel şekilli tozlar, yaprak levha şekli tozlara oranla preslemede basıncı daha etkili iletmektedir. Burada belirtilenlerin dışında, tozların fiziksel ve mekanik özellikleri de sıkıştırılabilirlik üzerinde etkilidir. Çizelge 2.1’de tozların önemli özellikleri ve bunların etki ettiği faktörler verilmektedir.

Çizelge 2.1. Tozun önemli özellikleri ve etki ettiği bazı faktörler [5].

Önemli Özellikler	Etkisi
Tozun boyutu (partikül boyutu)	Görünen (ham) yoğunluk
Boyut dağılımı	Akış davranışı
Toz şekli (partikül şekli)	Ham dayanım
Kimyasal kompozisyon	Sıkıştırılabilirlik
Yüzey özellikleri	Sinterleme
Mikro yapı	Şekillendirilebilirlik, tokluk

Toz üretim yöntemleri temelde mekanik, fiziksel, kimyasal ve atomizasyon yöntemi olmak üzere dört gruba ayrılmaktadır. T/M’de kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları Çizelge 2.2’de gösterilmektedir. Endüstride kullanılan tüm metaller ve seramikler uygun bir yöntem seçilerek toz haline getirilebilmektedir. Malzemeler birbirlerinden farklı özelliklere sahip oldukları için, tek tip toz üretim yönteminin olması mümkün değildir. Bir toz üretim yönteminin diğerlerine göre tercih edilir olması, yöntemin uygulanabilirliğine, ekonomikliğine, elde edilen tozların özelliklerine ve bu özelliklerin kullanım yeri ihtiyaçlarını ne ölçüde karşılayabildiğine bağlıdır [2].

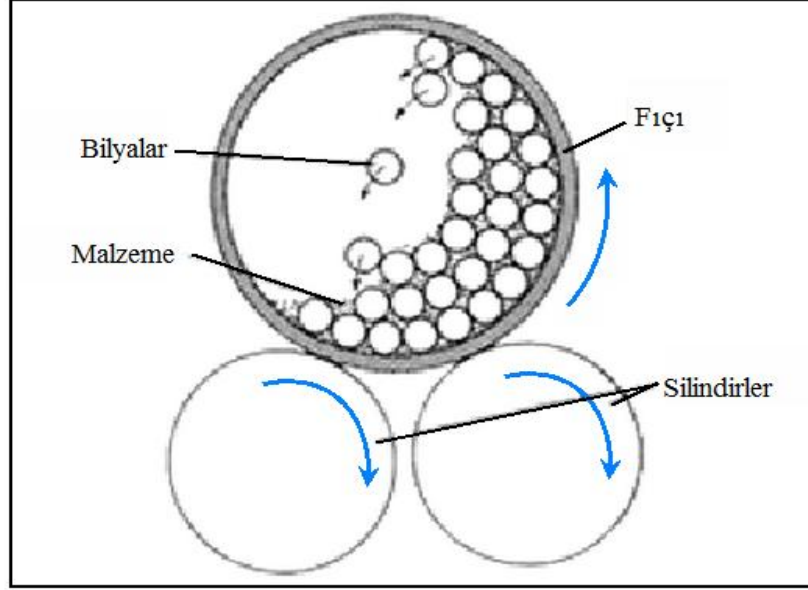
Çizelge 2.2. T/M’de kullanılan toz malzemelerin üretim yöntemi ve oranları [5].

Üretilen Miktar	%70	%15	%15			
			Atomizasyon	Kimyasal İndirgeme	Öğütme	Elektrolitik çökeltme
Alüminyum / Al alaşımları	X					
Berilyum			X	X		
Bakır / Bakır alaşımları	X	X		X		X
Cu-Al	X					
Cu-Pb	X					
Cu-Sn (bronz)	X					
Cu-Zn (pirinç)	X					
Cu-Ni-Zn	X					
Demir / Demir Alaşımları	X	X	X	X	X	
Düşük alaşımlı çelik	X					
Paslanmaz çelik	X					
Takım çeliği	X					
Molibdenim		X				
Nikel		X			X	X
Nikel alaşımları	X		X			
Gümüş	X			X		X
Tantalum		X		X		
Kalay	X					
Titanyum	X	X			X	
Tungsten		X				
Zirkonyum	X				X	

2.2.1. Öğütme

Mekanik üretim yönteminde, öğütme, mekanik alaşımlama, darbe ve talaşlı üretim yöntemleri alt başlıkları olarak sıralanmaktadır. Bu yöntemlerden öğütme en fazla tercih edilen mekanik üretim yöntemidir. Tozlar, parçacık boyutlarının kontrolü için darbe veya talaşlı üretimle elde edildikten sonra öğütme işlemine tabi tutulmaktadır. Tipik bir öğütme işlemi, şematik olarak Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Öğütme işleminde öğütücü bilye çapı, parçacık çapının yaklaşık 30 katı olmalıdır. İdeal bir

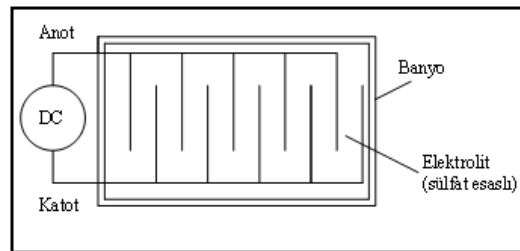
öğütme ortamında bilyeler buldukları kap hacminin $\frac{1}{2}$ 'sini geçmemeli ve öğütülecek tozlarda kap hacminin $\frac{1}{4}$ 'ü kadar olmalıdır [2].



Şekil 2.2. Öğütme düzeneği şematik gösterimi [2].

2.2.2. Fiziksel Üretim Yöntemi

Bu yöntemle toz üretimi, saflık derecesi yüksek metallerin elektrolitik bir çözelti içerisinde çökeltilmesiyle gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.3'te verilen şematik düzende katot üzerinde biriken tozlar alınarak yıkama, kurutma, öğütme ve tavlama gibi işlemlerden geçirilmektedir. Bu ilave işlemler, üretim maliyetini artırıcı bir dezavantaj gibi görülmese, mutlaka yapılması gerekli olan işlemlerdir. Yöntemin en önemli avantajı ise, yüksek saflıkta toz elde edilebilmesidir. Bu yöntemle demir, bakır, çinko, krom tozları yaygın olarak üretilirler.



Şekil 2.3. Elektrolizin şematik gösterimi [2].

2.2.3. Kimyasal İndirgeme

Kimyasal üretim yöntemi, demir, bakır, tungsten, molibden, nikel, kobalt gibi metal oksitlerin, CO veya H₂ gibi indirgeyici gazlarla kimyasal olarak indirgenmesi ile gerçekleştirilmektedir [1]. Kimyasal yöntemle üretilen sünger-demir tozu bu yöntemin önemli bir uygulamasıdır. Sünger demir, demir oksit cevherinin uygun nitelikte indirgeyici elemanlara indirgenerek, süngerimsi bir kütleye dönüştürülmesiyle elde edilmektedir. İşlem sırasında magnetit (Fe₃O₄), kok ve kireç taşı ile karıştırılarak seramik kaplara doldurulmaktadır. Karışım seramik kaplar içerisinde 1260 °C sıcaklıktaki fırınlarda 68 saat bekletilerek indirgenmenin tamamlanması ile sünger demir elde edilmektedir. Elde edilen sünger demir külçeleri yüksek sıcaklıkta (1260 °C) birbirine kaynak olmuş tozlardan oluştuğundan dolayı, öğütülerek istenilen tane büyüklüğüne getirilmektedir. Daha sonra hidrojen gazı altında tavlansarak oksijen ve karbondan mümkün olduğu kadar arındırılarak elekten geçirilir [2].

2.2.4. Gaz Atomizasyonu Yöntemi

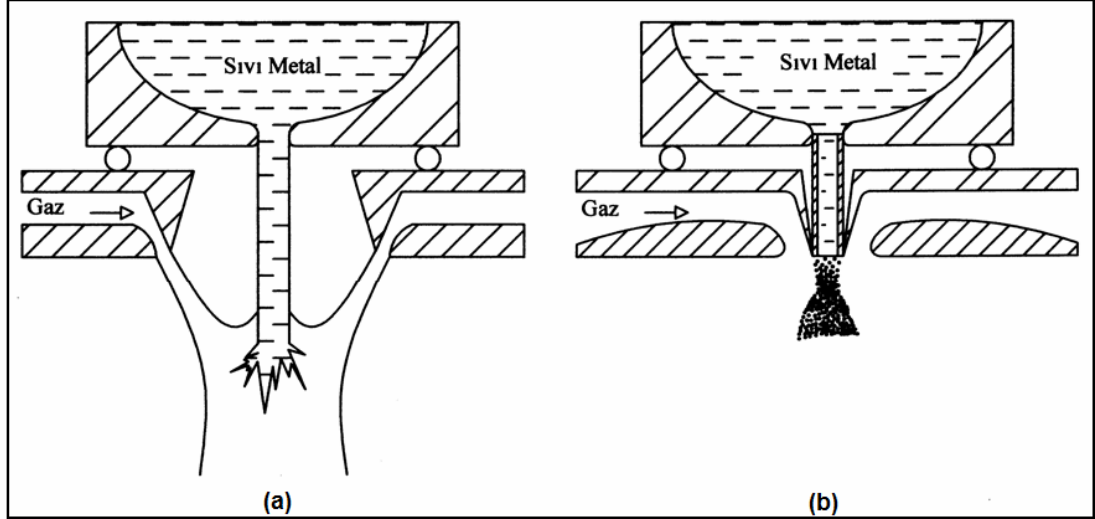
Gaz atomizasyonu sıvı metalin, yüksek hızlara sahip gaz akışının etkisiyle küçük damlacıklara ayrıştırılması işlemidir. Gönderilen gaz basıncının etkisi ile sıvı metal damlacıklar aniden küreselleşerek soğur ve katılaşır. Bu şekilde üretilen toz parçacıklarının çapları 1 µm'den 1 mm'ye kadar değişmektedir. Üretilen küresel metal alaşım tozları, işlem sırasında gösterdiği hızlı katılaşma karakteristiğinden dolayı, üstün özelliklere sahiptir. Bu yöntemle elde edilen tozların mikroyapısı, diğer yöntemlerle elde edilen tozlara göre daha üstündür. Toz boyutu ve dağılımının kontrol edilebilir olmasından dolayı, gaz atomizasyon yöntemi çok tercih edilen bir yöntemdir [3].

Bu yöntemde amaç, yüksek hızda genleşen gazın kinetik enerjisini sıvı metale aktararak, metalin küçük damlacıklara ayrışmasını sağlamaktır. Yüksek basınçlı gaz atomizasyon yöntemi ile ince metal ve alaşım tozu üretimi kolaylıkla yapılabilmektedir.

Düzenli bir atomizasyon işlemi için sağlanması gereken koşullar aşağıda belirtilmiştir.

- Yüksek gaz kinetik enerjisi,
- Metal akış borusu ucunda negatif basınç oluşumu,
- Metal akış borusu ucunda radyal basınç farkı.

Atomizasyon sistemleri serbest düşmeli ve yakından eşlemeli olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Serbest düşmeli sistemlerde sıvı metalin, gaz jeti ile temas edinceye kadar serbest olarak akışı Şekil 3.1’de şematik olarak gösterilmiştir. Sıvı metal, yerçekimi etkisi ile belli bir süre akıtıldıktan sonra gaz jeti ile tepkimeye girmektedir. Yakından eşlemeli sistemlerde ise, sıvı metal nozulun gaz çıkış bölgesine, seramik bir akış borusu ile gönderilmektedir. Bu sistemlerde daha iyi enerji aktarımı gerçekleştiği için, atomizasyon verimleri yüksektir [6].



Şekil 2.4. Atomizasyon sistemleri. Serbest düşmeli atomizasyon sistemi (a), ve yakından eşlemeli atomizasyon sistemi (b) [6].

2.3. TOZLARIN HAZIRLANMASI

2.3.1. Ön İşlemler

Ön işlemler malzemelere şekillendirmeden önce uygulanan, elekten geçirme, tavlama yağlayıcı ilavesi, harmanlama ve karıştırma gibi yapılması gerekli olan işlemlerdir.

2.3.1.1. Metal Tozlarının Elekten Geçirilmesi

Birçok metal tozunun üretim işleminde, kontrol edilmesi gereken en önemli özellik toz boyut dağılımıdır. Çünkü, taşıma yoğunluğu, akışkanlık, şekillendirilebilme, sinterleme oranı, boyutsal değişim ve mekanik mukavemet gibi özellikler toz boyut dağılımına bağlıdır. T/M sektöründe parçacık boyut dağılımında en yaygın kullanılan metot eleme işlemidir. Toz parçacıklar farklı aralıklardaki elekler yardımıyla sınıflandırılmaktadır [7].

2.3.1.2. Tavlama

Metal tozların tavlama işlemi, en yaygın ısıl işlemlerden biridir. Birçok toz, üretim aşamasında, üretim yöntemine de bağlı olarak kirlenmektedir. Karbon, oksijen ve azot gibi kirlilikler, ürünün sinterlenmemiş (ham) mukavemetini ve sıkıştırılabilirliğini olumsuz yönde etkilemektedir. Metal tozlarına uygulanan tavlama işlemi ile, parçacıkların üzerindeki ince oksit film tabakasının ve nemin giderilmesi hedeflenmektedir [6].

2.3.2. Tozların Harmanlanması ve Karıştırılması

Metal tozların harmanlanması, aynı nominal yapıdaki tozların birbirleriyle karıştırılması olarak tanımlanmaktadır. Karıştırma ise, iki veya daha çok sayıdaki farklı tozların karıştırılması olarak tanımlanmaktadır.

Tozlar, akma oranı, yoğunluk, kalıptan çıkarmak için gerekli güç, kuru haldeki davranış, sinterleme sonrası çekme, mekanik mukavemet gibi birçok özellikler göz önüne alınarak tanımlanmaktadır. Ürünü meydana getiren tozların karışımında, tane boyutu ve yoğunluğundaki çok küçük değişimler bile malzemenin özelliklerini değiştirmektedir. Bu yüzden T/M parça üreticileri, zamandan tasarruf sağlamak için farklı partilerde aynı kompozisyonlar verilmiş olsa bile tüm kontrollerin yeniden yapılmasını gerektirdiği için, aynı partide maksimum parçanın üretilmesini hedeflemektedirler [6].

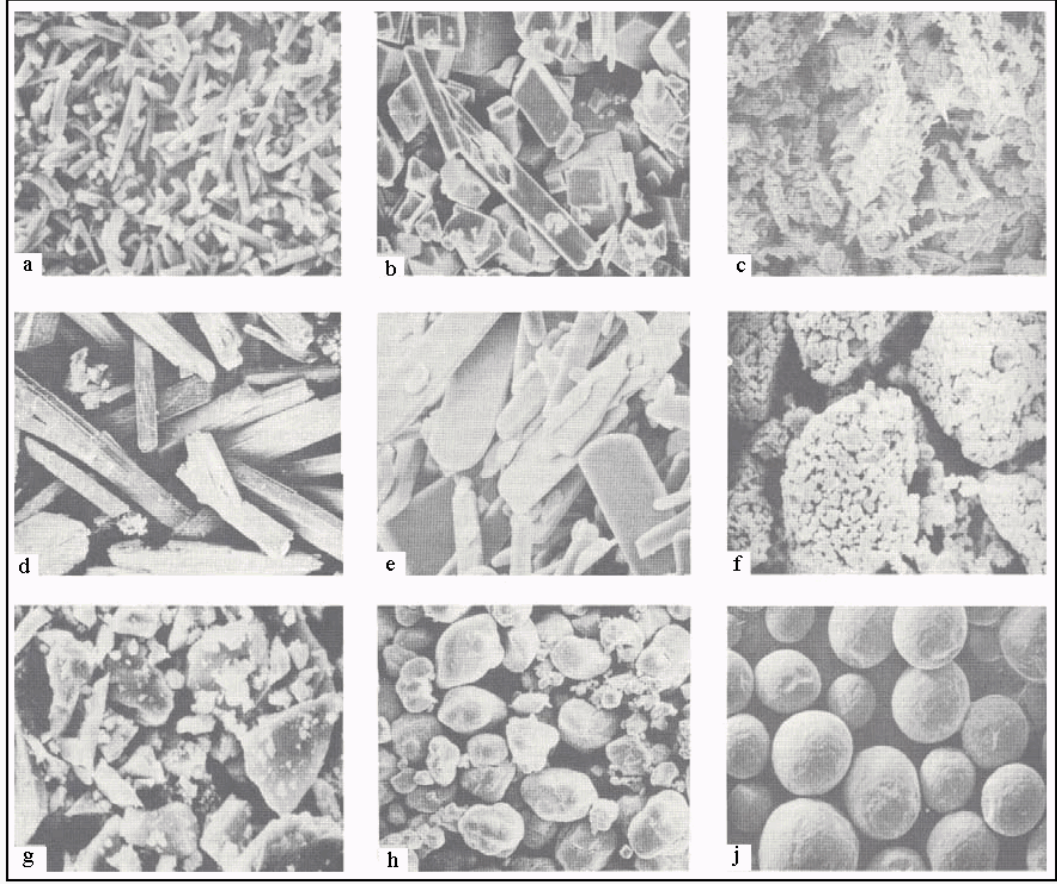
2.3.3. Yağlayıcılar

Metalik tozlar ve yağlayıcılar (isteğe bağlı alaşım elementleri ile birlikte), homojen bir karışım elde etmek için karıştırılmaktadır. Karışım içerisine genellikle % 0,5-1,5 arası yağlayıcı ilave edilmektedir. Metalik stearit ve parafin en çok kullanılan yağlayıcılar. Yağlayıcı kullanmanın ana amacı, toz kütleleri, takım yüzeyleri ve kalıp duvarları arasındaki sürtünmeyi azaltmak, tozların sıkıştırma esnasında kolay kaymalarını sağlamaktır. Bunlar parçanın her bölgesinde düzgün bir yoğunluğun oluşmasına yardımcı olmaktadır [8].

2.3.4. Tozların Boyut ve Şekilleri

Metal tozu ile yapılan işlemlerde kullanılan tozun boyut ve şekli malzemenin bir çok özelliğini etkilemektedir. Bu nedenle toz boyutlarının ölçülmesi gerekmektedir. T/M sektöründe en çok kullanılan toz ölçüm yöntemi elek analizi yöntemidir. Eleklerle, sadece toz boyut analizi değil aynı zamanda hangi oranda ne boyutta toz elde edildiği de belirlenmektedir [8].

Üretilen toz şekli ve boyutu, T/M ürünlerin optimum özelliklerini belirleyen ana faktörlerin başında gelmektedir. Kullanılan atomizasyon yöntemi, toz şeklinin belirlenmesinde önemli bir etkiye sahiptir. Gaz veya hava atomizasyonu ile üretilen toz parçacıkları küresel şekilli olmasına rağmen, su atomizasyonu ile düzensiz şekilli toz parçacıkları üretilmektedir. Şekil 2.5’de ISO 3252 standardına göre, bazı tozları tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri verilmektedir.



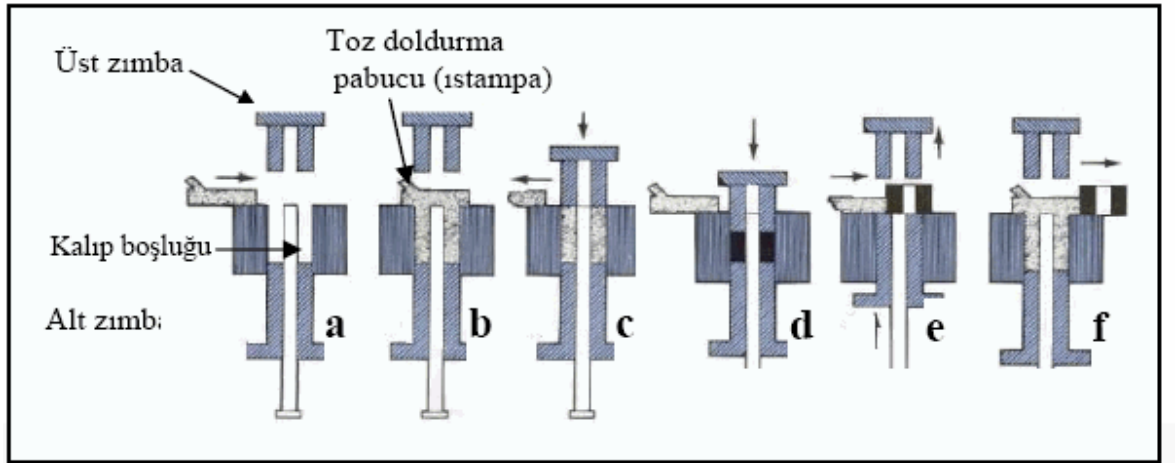
Şekil 2.5. ISO 3252 standardına göre toz şekilleri. İğne şekilli toz (a), Köşeli toz (b), Dentritik toz (c), Lifli toz (d), Pul toz (e), Taneli toz (f), Düzensiz toz (g), Yumru toz (h), Küresel toz (j) [9].

2.4. ŞEKİLLENDİRME

Toz metalurjisindeki en önemli ve üçüncü işlem basamağı şekillendirme dir. Metal tozlar, özel olarak hazırlanmış kalıp içerisinde basınç etkisiyle şekillendirilmektedir. Sıkıştırmanın temel amacı, toz parçacıklarının istenilen şekle dönüştürülmesi için, yapıya kendi ağırlığını taşıyabilecek kadar yoğunluk kazandırılmasıdır. Presleme, aksel, izostatik ve hacim deformasyonu olarak üç farklı yöntemde gerçekleştirilmektedir. Aksel sıkıştırma, tek ve çift yönlü olabildiği gibi soğuk, sıcak ve ılık presleme şeklinde de olabilmektedir. İzostatik presleme soğuk ve sıcak olmak üzere iki farklı şekilde uygulanabilmektedir. Hacimsel deformasyon işlemleri ise, toz dövme, toz ekstrüzyon ve toz haddeleme olarak uygulanmaktadır [5].

Değişik presleme teknikleri olmakla beraber, en yaygın kullanılanı tek eksenli bir kalıp ile basma işlemidir. Tek eksenli kalıp ile presleme yöntemi, kesintisiz üretim, otomasyon sistemleri, yüksek miktarlarda metal ve seramik parçalar ile ilaç ve patlayıcı endüstrisinde yaygın kullanım alanına sahiptir. Bundan dolayı endüstriyel uygulamalardaki çoğu T/M parçaları, bu teknik kullanılarak üretilmektedir [5].

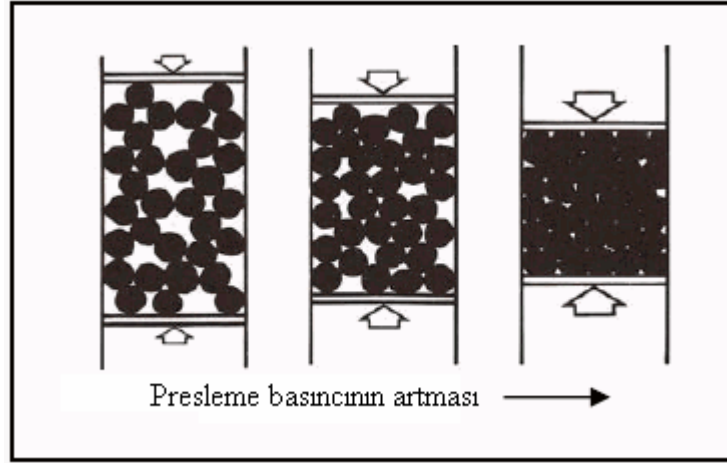
Çift yönlü preslemede zımbaların her ikisi de hareketlidir. Çift yönlü presleme Şekil 2.6’da şematik olarak gösterilmektedir. İlk aşamada (a) üretilecek parçanın kalıbı prese monte edilmektedir. İkinci aşamada (b), toz parçacıkları kalıp doldurma pabucundan, kalıba serbest akışla doldurulmaktadır. Üçüncü aşamada (c), kalıp boşluğuna doldurulan toz, sistemin titreşim mekanizmasıyla sıkıştırma öncesi titreşimli yoğunluk kazandırma işlemi yapılarak, tozun kalıpta düzgün bir şekilde yerleşmesi sağlanır, (bu sırada da, ıstampa ile kalıp yüzeyinde artan tozlar diğer toz haznesine itilir) ve üst zımba presleme için dişi kalıp boşluğuna yerleştirilir. Dördüncü aşamada (d), presleme işlemi gerçekleştirilir. Bu aşamada, toz taneleri presleme etkisiyle belli bir değerde yoğunluk ve mukavemet kazanarak ön şekillendirilir. Beşinci aşamada (e) ise, mukavemet ve yoğunluk kazandırılmış ham parça, belli bir sıyırma kuvvetiyle alt zımba tarafından kalıp boşluğundan çıkartılır. Altıncı ve son aşamada (f) ise, kalıp boşluğundan çıkarılan ham parça toz doldurma pabucu tarafından itilerek, ikinci parçanın preslenmesi için toz doldurma işlemi gerçekleştirilmektedir.



Şekil 2.6. Toz metal parçaların presleme basamakları [6].

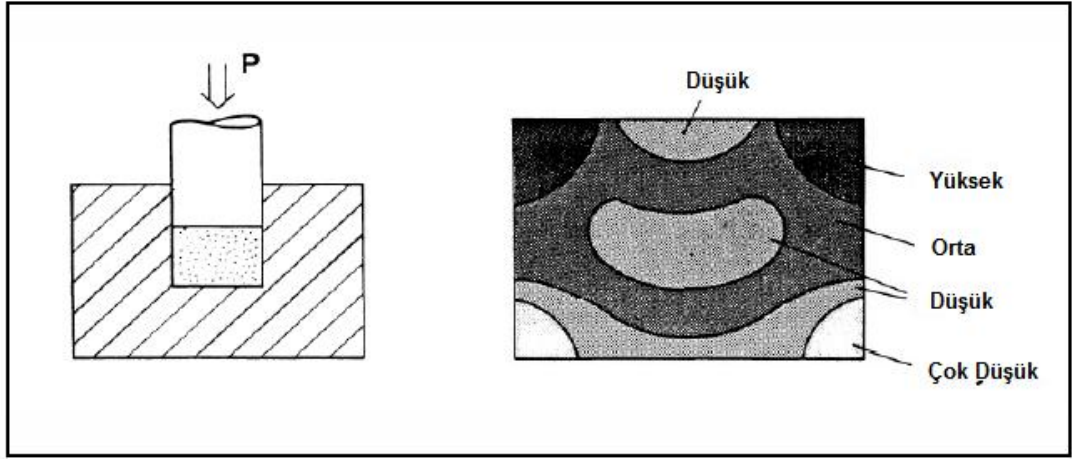
Sıkıştırma işlemi metalürjik açıdan üç aşamada ele alınmaktadır (Şekil 2.7).

- *İlk aşama:* Presleme basıncı uygulamasından sonra, toz tanelerinin yer değiştirmesi ve yeniden pozisyon belirlemesi sağlanır. Bu aşamada, plastik şekillendirme yoktur. Ancak bir kısım toz tanelerinde kırılma olabilmektedir. Parçacık boyutu, şekli, toz boyut dağılımı ve taneler arası sürtünme bu aşamada önemli rol oynamaktadır.
- *İkinci aşama:* Elastisite ve plastik deformasyon faktörleri baskındır. Parçacıklar arası soğuk şekillendirmeye bağlı olarak bağlar oluşmaktadır. Ayrıca, tanelerin mekanik kilitlenmeleri ve tane-tane etkileşimleri bu aşamada gerçekleşmektedir.
- *Son aşama:* Presleme basıncının artması, toz tanelerinin kırılması, boşlukların dolması ve toz taneleri arasında soğuk kaynaklanmanın oluşması ile ham yoğunluk kazandırılmaktadır.

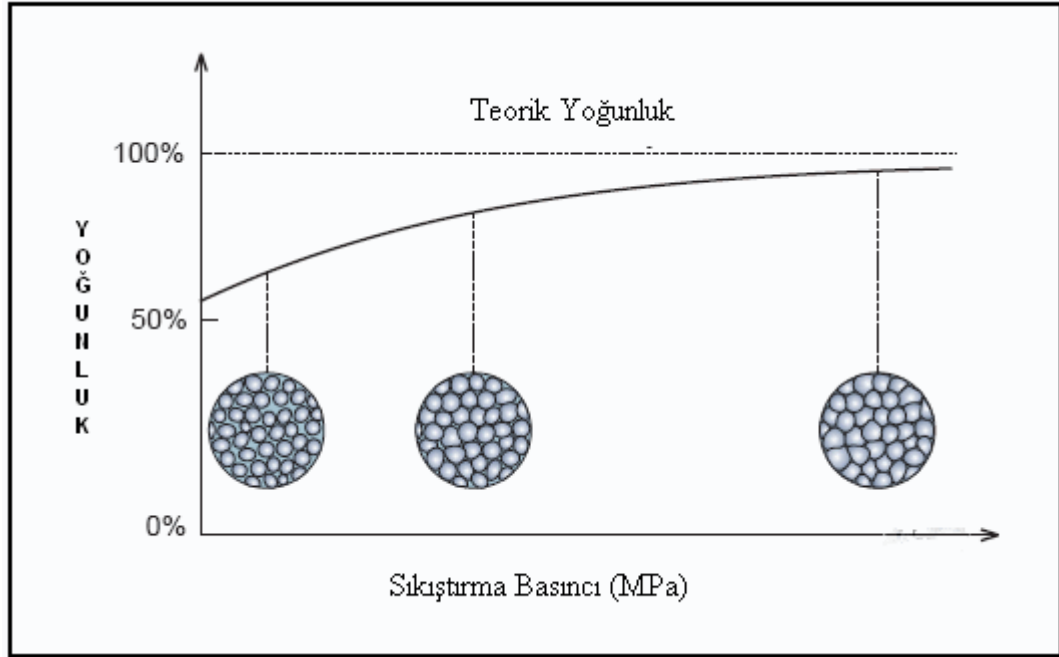


Şekil 2.7. Sıkıştırmanın metalürjik açıdan şematik olarak gösterilmesi [2].

Tek yönlü preslemede kuvvet tek yönde uygulandığından, malzemenin yoğunluğu parçanın tüm bölgelerinde eşit değildir. Bu durum Şekil 2.8’de şematik olarak gösterilmektedir. Uygulanan basıncın artırılması, malzemeyi teorik yoğunluğa yaklaştırır. Fakat sıkıştırma ile teorik yoğunluğun %100’e ulaşması mümkün değildir. Basıncın yoğunluğa etkisi Şekil 2.9’da verilmektedir.



Şekil 2.8. Tek yönlü preslemede eşit dağılmayan yoğunluğun şematik olarak gösterilmesi [10].



Şekil 2.9. Basınç – yoğunluk ilişkisi [6].

2.4.1. İzostatik Presleme

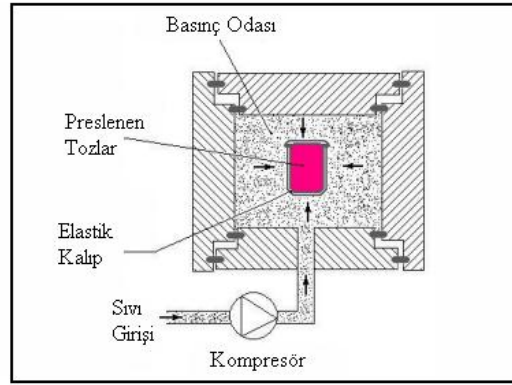
İzostatik presleme, bir toz kütesine veya ön şekillendirilmiş bir parçaya bütün yönlerden eşit şekilde basınç uygulaması ile gerçekleştirilen bir şekillendirme yöntemidir. İzostatik preslemede eşit basınç uygulaması ile taneler arasındaki temas noktaları artarak reaksiyonun ilerlemesi hızlanmaktadır. Ayrıca bu yöntem, kalıp iç

yüzeyi ile sürtünmeyi de azaltmaktadır. Oda veya ortam sıcaklığında yapılan izostatik presleme soğuk izostatik presleme (CIP) olarak adlandırılırken, yüksek sıcaklıkta yapılan izostatik presleme ise sıcak izostatik presleme (HIP) olarak adlandırılmaktadır. CIP’de ön şekillendirilmiş olan parçaya, bir yüksek sıcaklık sinterlemesi uygulanarak, daha yüksek yoğunluğa sahip ürünler elde edilmektedir. HIP yönteminde ise toz kütlenin preslenmesi ve sinterlenmesi aynı anda gerçekleştirilmektedir. Ayrıca CIP’de basınç geçirici ortam olarak çeşitli sıvılar kullanılırken, HIP’te ise inert gazlar kullanılmaktadır.

2.4.1.1. Soğuk İzostatik Presleme (CIP)

Soğuk izostatik presleme, basıncın sürekli ve her yönden eşit olarak uygulandığı bir presleme yöntemidir. Tozların CIP ile şekillendirilmesi Şekil 2.10’da şematik olarak gösterilmektedir. Bu yöntemde, toz malzemeler kalıp olarak hizmet eden esnek bir elastik kap içerisine yerleştirilmektedir. Kalıp, basınç kabının içindeki bir sıvı ortamına daldırılır ve böylece sıvıya uygulanan yüksek basınç sıvı yardımıyla preslenecek tozlara iletilerek, tozlar üzerinde bir hidrostatik basınç oluşturulur. Daha sonra kalıp basınç kabından çıkarılarak, her bir parçanın kalıptan boşaltılması sağlanır. Sıvı ortam olarak su, yağ veya gaz kullanılmaktadır. Yaş veya hareketli kalıp olarak adlandırılan bu yönteme alternatif bir diğer yöntem ise, kuru kalıp veya sabit kalıp yöntemidir. Sabit kalıp yöntemi, elastik kalıbın sürekli olarak basınç kabında sabit bir şekilde kalmasını ifade etmektedir. Genellikle bu yöntem büyük hacimli parçaların (kare, dikdörtgen, hegzagonal tüp veya çubukların) üretiminde kullanılmaktadır. Hareketli kalıp yöntemi ise, bir çok avantajlarından dolayı tercih edilmektedir. Presleme işlemi izostatik ortamda gerçekleştiği için, basınç homojen bir şekilde dağılmakta ve böylece uniform bir yoğunluk elde edilmektedir.

Bu yöntemde tek eksenli preslerin aksine, kalıp duvarı ile pres arasında sürtünmeden doğan kalıcı gerilmeler oluşmamaktadır. Ayrıca sürtünme olmadığından dolayı herhangi bir bağlayıcı veya yağlayıcı ilavesine de gerek kalmamaktadır. Karmaşık şekilli parçaların son şekle çok yakın oranlarda ve çok küçük hata toleransları ile üretimi mümkündür.



Şekil 2.10. CIP işleminin şematik olarak gösterilmesi [6].

CIP yönteminde farklı metal tozları için uygulanan farklı basınç değerleri Çizelge 2.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 2.3. CIP yönteminde çeşitli metal tozlarına uygulanan basınç değerleri [9].

Toz Malzemesi	Basınç Değeri (MPa)
Alüminyum	55-140
Bakır	140-275
Demir	310-415
Yüksek hız takım çeliği	240-345
Paslanmaz çelik	310-415
Titanyum	310-415
Tungsten	240-415
Tungsten karbür	170-205

2.4.1.2. Sıcak İzostatik Presleme (HIP)

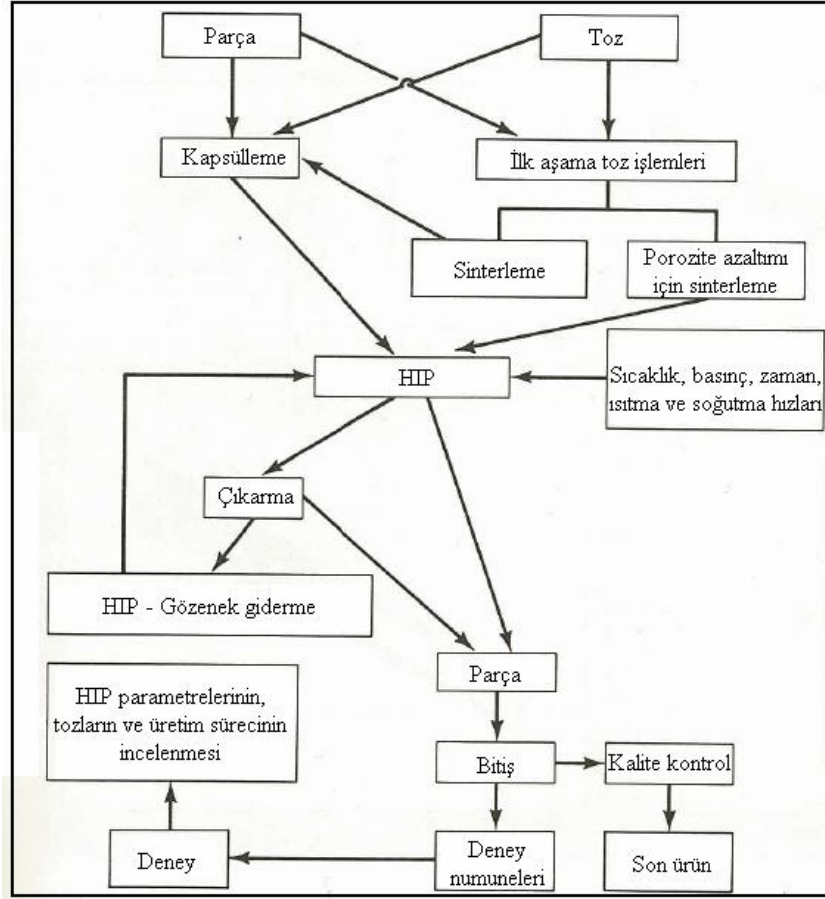
HIP, toz metalurjisinin izostatik etkiyle yüksek basınçta ve yüksek sıcaklık kullanılarak parça üretme yöntemidir. Bu yöntemle T/M’de kullanılan diğer üretim yöntemlerine ve geleneksel döküm yöntemine göre, mekanik özellikler bakımından çok daha kaliteli parçalar üretilebilmektedir. Özellikle alaşımların teorik yoğunluğa çok yakın yoğunlukta istendiği durumlarda, en iyi sonucu bu yöntem vermektedir.

HIP seri üretim uygulamaları için elverişli olduğundan endüstriyel uygulamalarda çok yaygın olmasa da kullanılmaktadır.

HIP aynı zamanda klasik sinterleme veya döküm yöntemiyle üretilen parçalara da uygulanmaktadır. Burada amaç; parçalardaki gözeneklerin giderilerek, mekanik özellikleri iyileştirilmiş ve kritik uygulamalarda kullanılabilir hale getirilmiş parçaların üretilmesidir.

HIP için akış şeması Şekil 2.11’de verilmiştir. T/M HIP uygulamalarında element veya alaşım tozları önce kapsülleme işlemine tabi tutulmaktadır. Kapsüller, tozları birarada istenen geometride tutan kalıplar gibi düşünülebilir. 2-3 mm kalınlığındaki saclardan TIG kaynağı ile birleştirilerek üretilen bu kapsüller istenen son ölçüden (çekmeden dolayı) ortalama %10 daha büyük yapılmaktadır. Yüksek basınçta gerçekleştirilen HIP’te argon gazı kullanılmaktadır. Uygulanan basınç 20 – 300 MPa aralığında değişebilmektedir. Yöntemin sıcaklık aralığı 400–2200 °C’dir. Alüminyum alaşım tozları için uygulama yaklaşık 480°C iken tungsten iken yaklaşık 1700°C olarak uygulanmaktadır [6].

HIP genellikle petrol ve gaz boru hatlarında, yüksek basınca maruz kalan flanş ve vanaların, tungsten karbürlü takımların, nikel tabanlı alaşımların, turbojet motorların türbin diskleri ve millerinde, refrakter malzemelerin üretimlerinde, mıknatıs üretiminde, tungsten ağır alaşımlarından üretilen parçalarda kullanılmaktadır.



Şekil 2.11. HIP akış şeması gösterimi [6].

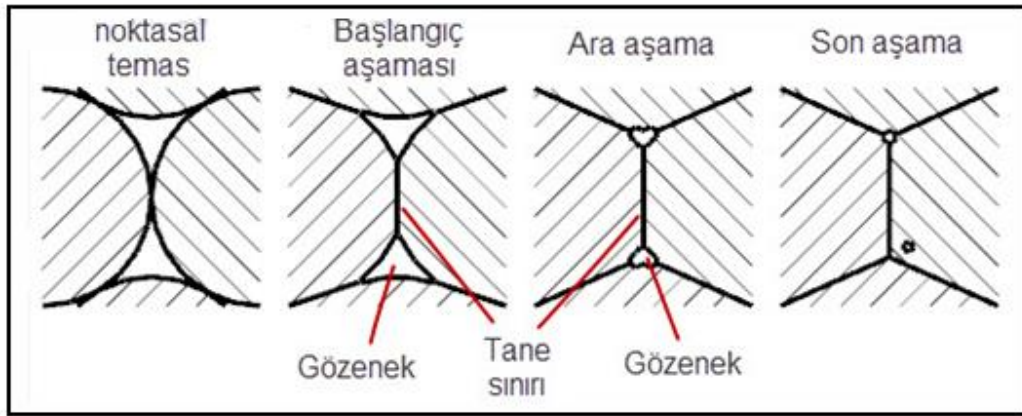
2.5. SİNERLEME

Kalıpta sıkıştırılmış toz kütesinin veya malzeme sisteminin ergime sıcaklığının altında ısıtılarak, difüzyon yolu ile kimyasal bağlanmasını sağlayarak gözenek miktarının azaltılması işlemi sinterleme olarak tanımlanmaktadır. Şekillendirilmiş toz parçalara mukavemet kazandırmak amacıyla, yüksek sıcaklıklarda sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Sinterleme, T/M en fazla enerji gereksinimi olan işlem basamağıdır. Preslenmiş toz parçalar arasındaki bağlantı mekanik kilitleme şeklinde zayıf bir bağ olup, kristal kafes içerisindeki bağ dayanımına kıyasla çok zayıftır. Preslenmiş yapıdaki toz tanecikleri birbiri ile temas etsede, her bir tane diğerinden bağımsızdır. Sinterleme ile tane temas noktaları artmakta ve fiziksel bir bağ oluşmaktadır. Bu türden bağ oluşumu kristal kafes sistemi içerisindeki yüksek dayanımlı atomik bağlanma ile benzeştir [9].

Sinterleme, ham parçayı yüksek performanslı parçaya dönüştürdüğü için, T/M'nin en önemli aşamasıdır. Sinterleme sırasında, polimer yakma, taneler arası bağlanma, boyutsal değişim ve tane irileşmesi gibi önemli olaylar gerçekleşmektedir. Sinterleme, hedeflenen amacın gerçekleştirilebilmesi için kontrollü olarak yapılmalıdır. Sinterlenen parçanın istenilen özelliklerde ve istenilen boyutta olması bir zorunluluktur. Katı faz sinterlemesi teorik olarak çok iyi anlaşılırsa, sinter ürünlerinin %70'i sıvı faz sinterlemeyle üretilmektedir [11].

2.5.1. Katı Faz Sinterleme

Tek fazlı sistemlerde (tek tip toz kullanılan) sinterleme tamamen katı faz sinterlemedir. Sinterleme ile preslenmiş toz parçalarda yoğunluk artışı (hacimsel küçülme) meydana gelmektedir. Bu durum özellikle çok küçük taneli tozlarda daha fazla görülmektedir. Hacimsel küçülme, malzeme türüne göre farklılık göstermektedir. Şekillendirmede kullanılan toz basma kalıpları bu küçülmeler göz önüne alınarak, çekme miktarı kadar büyük yapılmaktadır. Katı faz sinterleme, temelde üç aşamada gerçekleşir ve bu aşamalar Şekil 2.12'de şematik olarak gösterilmiştir.



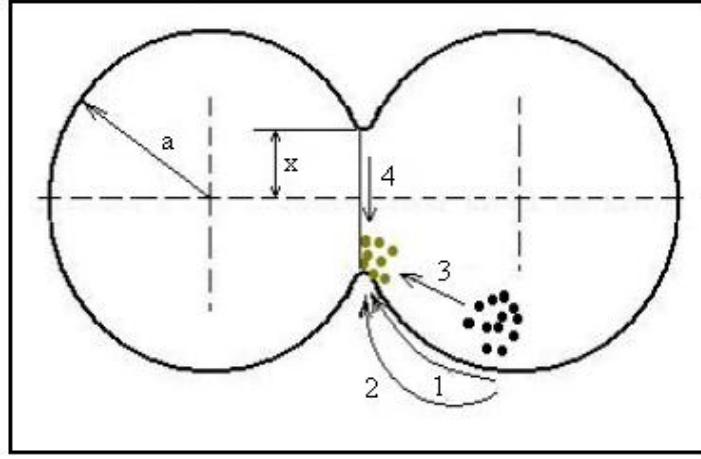
Şekil 2.12. Katı faz sinterleme aşamalarının mikroskopik düzeyde şematiği [11].

- *Başlangıç Aşaması* : Hacimsel daralmanın sınırlı olduğu bu aşamada taneler arası temasla "boyun" olarak adlandırılan sinter köprüleri oluşmaktadır. Bu aşamada toz parçacıkları birbirinden bağımsızdır. İki tane arasındaki temas

düzlemlerinde, tane sınırı oluşumu başlamaktadır. Temas halindeki tanelerin merkezlerinde küçük miktarlarda yaklaşma gözlemlenir.

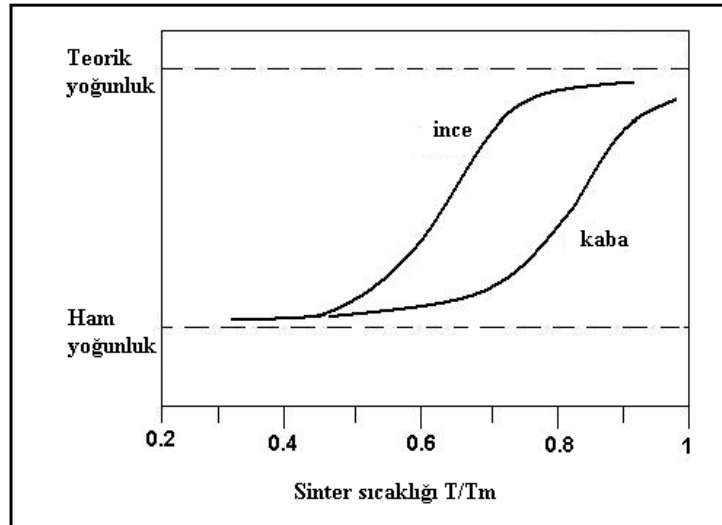
- *Ara Aşama* : Boyun oluşumunu takip eden aşamadır. Bu aşamada tane şekli tanınabilirliğini kaybeder ve düzenli bir boşluk ağı oluşumu gözlenir. Bundan sonra yeni mikroyapı oluşumuna izin veren tane büyümesi meydana gelmektedir. Gözenekler parça yüzeyine kadar birbiri ile bağlantılıdır. Parçada meydana gelen boyutsal küçülme en fazla bu aşamada gerçekleşmektedir.
- *Son Aşama* : Son aşamada kapalı gözenek oranı hızla azalmaktadır. Birbirinden izole gözenekler, küresel şekil kazanmaya başlar. Eğer gözenekler içerisinde hapsolmuş ve dışarıya çıkması mümkün olmayan gaz varsa ve gözenekteki gazın basıncı ile yüzey geriniminden doğan basınç denge halini alırsa, sinterlenmiş yapıda teorik yoğunluğa ulaşamaz. Eğer vakumla sinterleme yönteminde olduğu gibi gözeneklerde gaz yok ise veya gözenekteki gaz ana yapıdan kolayca difüz olup sistemden uzaklaşabiliyorsa, yoğunluk artışı devam eder ve tam yoğunluğa ulaşılır.

Katı faz sinterlemede taneler arasında boyun bölgesinde meydana gelen sinterleme mekanizmaları, Şekil 2.13'da gösterilmektedir. Yüzey taşınımında boyutsal küçülme ve gözenek daralması görülmesine de, yapıda düzensiz şekilli yüzeylerin düzleşmesi, gözeneklerin küreselleşmesi ve boyun genişlemesi meydana gelmektedir. Tüm taşınım mekanizmaları içerisinde yüzey taşınımı, en az aktivasyon enerjisine ihtiyaç duyulan difüzyon mekanizmadır. Yüzey atomları dış bükey yüzeylerde, iç bükey yüzeylere oranla daha yüksek hareketlilik kabiliyetine sahiptirler. Dolayısıyla, bu atomlar keskin boyun oluşumunda iç bükey yüzeyler tarafından yakalanırlar. Yüzey taşınımı dışında tek fazlı sistemlerde düşük sıcaklıklarda tane sınırı difüzyon mekanizması da önemli rol oynamaktadır.



Şekil 2.13. Boyun bölgesinde meydana gelen sinterleme mekanizmaları. Yüzey taşınımı (1), buharlaşma ve yoğunlaşma (2), kütle taşınımı (3), tane sınır taşınımı (4) [2].

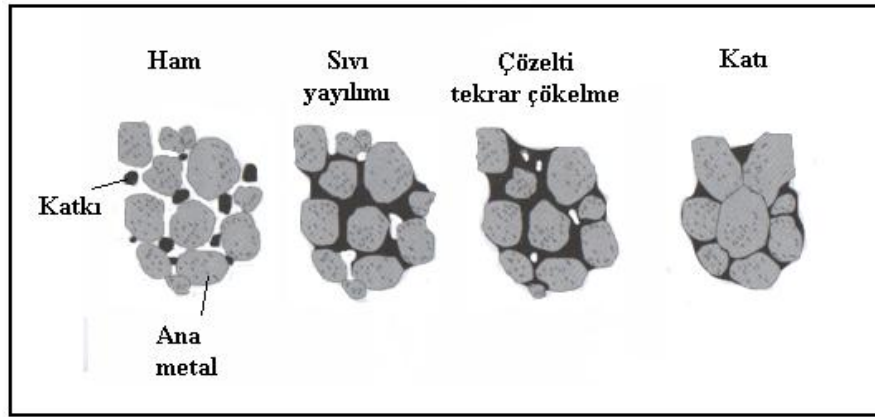
Sinterlemede, toz boyutu, soğuk presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı, atmosferi ve süresi, üretilen parçaların özelliklerini belirleyen önemli parametrelerdir. Üretilen parçaların teorik yoğunluğa ulaşması veya yaklaşması için uygun şartların sağlanması gereklidir. Toz boyutunun, tozların sinterleme yoğunluğu üzerine etkisi Şekil 2.14`de verilmiştir. İnce taneli (1-10 μm) tozların kaba tanelilere (50-200 μm) oranla kolay sinterlenebilirliği, bu tozların yüksek oranda temas noktası ve yüksek yüzey enerjisine sahip olmalarından kaynaklanmaktadır.



Şekil 2.14. Toz boyutunun tozların sinterleme yoğunluğu üzerine etkisi [10].

2.5.1. Sıvı Faz Sinterleme

Sıvı faz sinterleme, birden fazla alaşım içeren bileşimlerde alaşımlardan birinin ergime sıcaklığının hemen üzerine çıkarılması ile gerçekleşmektedir. Ortamda sıvı bir fazın bulunması malzeme taşınımını kolaylaştırdığından, mikroyapı değişiklikleri hızla gerçekleşmektedir. Parçada sıvı faz oluşumu ile ani bir büzülme meydana gelmektedir. Bu sırada, katı parçacıklar, sıvı faz içerisinde yeni bir düzene girerler. Bu sistemde, sıvı fazın miktarı minimum tutulmakta ve miktarı hiçbir zaman %20'yi geçmemektedir.



Şekil 2.15. Sıvı fazlı sinterleme aşamalarının mikro düzeyde şematik olarak gösterilmesi [12].

Sıvı faz sintelededeki yoğunlaşma aşamaları, Şekil 2.15'de görülmektedir. Başlangıç ısıtmasıyla birlikte katı faz sinterlemesinde olduğu gibi taneler arası bağlanma başlamaktadır. İlk sıvı oluştuğunda, tanelerin yeniden düzenlenmesiyle hızlı bir yoğunluk artışı meydana gelmektedir. Oluşan sıvı, katı parçacıkları ıslatarak hareket etmelerini kolaylaştırarak ve yeniden düzenlenmeyi sağlamaktadır. Bundan sonra çözeltide tekrar çökme gerçekleşir ve sıvı, katı atomların taşıyıcısı olmaktadır. Bu aşamada, daha küçük taneler sıvı içinde çözünür, yayılır ve büyük taneler üzerine çöklerler. Katı tane çözünürlüğü tane boyutuyla ters orantılıdır. Bu nedenle, öncelikle küçük taneler sıvı faz içinde çözünür. İşlemin sonlarına doğru tane sayısı azalarak tane irileşmesi meydana gelir [13].

Sıvı faz sinterlemenin en önemli avantajı sinterleme hızıdır. Sıvı faz matrisin teorik yoğunluğuna ulaşmasında engel gibi görülsede, tanelerin yerdeğiştirmesi için gerekli kuvveti azaltarak, sinterlemenin daha düşük sıcaklık ve sürede olmasını sağlamaktadır. Aynı zamanda sıvı faz taneler arası sürtünmeyi azaltıcı etki de yapmaktadır. Sıvı faz içerisinde ana metal tanelerinin taşınımını zorlaştıran keskin kenar ve köşelerinin çözünmesi de taşınımı kolaylaştırmaktadır. Sıvı faz sinterlemede parça geometrisinde meydana gelen şekil bozuklukları yöntemin dezavantajı olarak gösterilmektedir [13].

2.6. TOZ METALURJİSİNİN AVANTAJ VE DEZAVANTAJLARI

2.6.1. Toz Metalurjisinin Avantajları

- Talaş kaldırma işlemleri azaltılarak veya ortadan kaldırılarak hurda kayıpları giderilir.
- Ergitme kayıpları yoktur.
- Dar toleranslarda, düzgün yüzeyli parçalar üretilebilir.
- Yoğunluk ve ergime noktasındaki farklılıklar nedeniyle, başka yöntemlerle üretimi mümkün olmayan alaşım veya karışımlar üretilebilirler.
- Aşınma dayanımını artırmak için üretilen parçaların gözeneklerine yağ emdirilebilir.
- Seri üretime uygundur.

2.6.1. Toz Metalurjisinin Dezavantajları

- Tozların kalıp içindeki akışı sınırlı olduğundan, parçanın şekli sınırlayıcı bir faktör olabilir.
- Karmaşık şekilli parçaların yoğunluğu her yerde aynı olmayabilir.
- Üretilen parçaların mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek için ek işlemler gerekebilir.
- Metal tozları ingot halindeki malzemelerden daha pahalıdır.

BÖLÜM 3

TUNGSTEN VE TUNGSTEN AĞIR ALAŞIMLARI

3.1. TUNGSTEN

Gümüş grisi renginde bir metal olan tungstenin atom numarası 74 ve atom ağırlığı 183.85 g/mol'dür. Tungsten 3410°C ile en yüksek ergime noktasına sahip en ağır elementtir. Yoğunluğu 20 °C'de (oda sıcaklığında) 19.3 g/cm³'dür. Aşınmaya karşı direnci, ısı ve elektrik iletkenliği yüksek, genleşme katsayısı düşüktür. 1650 °C'den yüksek sıcaklıklarda tungsten en yüksek gerilim mukavemetine sahiptir. Yirmiden fazla tungsten ihtiva eden mineral mevcutsa da, ancak şelit ve volframit ekonomik olarak işletilen tungsten mineralleridir.

Dünya rezervlerinin yaklaşık %50'sini oluşturan ve ekonomik önem taşıyan Şelit (CaWO₄) bileşimi kalsiyum tungstattır. Saf halde iken %80.6 WO₃, %64 W içerir. Beyaz, kirli beyaz, sarımsı, pembemsi renklerde bulunmaktadır. Sertliği 4.5, yoğunluğu 6 g/cm³' tür.

Volframit (Fe, Mn) WO₄ değişik oranlarda Fe⁺² ve Mn⁺² karışımı gösteren tungsten mineraline genelde volframit denir. %20'den fazla FeO içeren mineral Ferberit (FeWO₄), %20'den fazla MnO içeren mineral Hübrenit (MnWO₄), aradakiler ise volframit olarak adlandırılır. Volframit %60 W ihtiva eder. Rengi siyah olup, sertliği 5.5, özgül ağırlığı 7.5 g/cm³' tür.

Dünya tungsten kaynaklarının %27.5' i gelişmiş ülkelerde, %15.2' si gelişmekte olan ülkelerde, %57.3' ü ise Çin ve Rusya'da bulunmaktadır. Ülkemiz tungsten rezervi 64148 ton olup dünya toplam rezervinin yaklaşık %2'sine sahiptir [14].

3.2. TUNGSTEN AĞIR ALAŞIMLARININ TANIMI

Tungsten ağır alaşımları (TAA) ana malzemesi ağırlıkça %90-98 oranında Tungsten olan Tungsten-Nikel-Demir (W-Ni-Fe) veya Tungsten-Nikel-Bakır (W-Ni-Cu) alaşımlarıdır. Bu alaşımlara uygulanan sıvı faz sinterlemeden dolayı, teorik yoğunluğun elde edilmesi mümkündür. Alaşımlar iyi işlenebilirlik ve ciddi süneklik özelliklerine sahiptir. Örneğin 90W-7Ni-3Fe alaşımı %40 uzama sergileyebilir. Bakır içeren alaşımlar enine kesiti büyük parçalarda tercih edilirler ve alaşım yumuşaklığı düşüktür. Bu nedenle tam yoğunluğa sinterlemek zordur. Bakır içeren alaşımların en önemli avantajı manyetik olmamasıdır. TAA'da elementel metal tozları herhangi bir standart toz karıştırma yöntemi kullanılarak karıştırılabilir. Tozların ince taneli olması öncelikli bir durum arzeder. Tozlar kirlilikten arındırma ve topaklanmaya karşı -200 mesh elekten geçirilmelidirler. Tozların şekillendirilmesi için tek yönlü presleme kullanılacağı gibi izostatik preslemede kullanılabilir. Tek yönlü preslemede ham yoğunluk %55 olurken, izostatik preslemede bu değer %65 olabilmektedir [6].

TAA yaygın olarak kullanım alanları;

- Ticari uçak, helikopter pervaneleri, motor, kanatçıklar ve güdümlü füzeler için dengeleme ağırlıkları olarak,
- CNC tezgahlarda titreşim sönümlenme kabiliyetlerinden dolayı takım tutucu olarak,
- Bilgisayar disk okuyucuları için sönümlenme ağırlıkları olarak,
- Kinetik enerjili delicilerde,
- Parçacık etkili savaş başlıklarında ve uçaksavar mermilerinde,
- Radyasyon koruyucu olarak röntgen ve kanser tedavi cihazlarında,
- Avcılıkta kurşun içermeyen mermi yapımında,
- Dönüölçer bileşenlerinde titreşim sönümlenme amaçlı olarak,
- Yelkenli ve yarış otomobillerinde ağırlık dengeleme amaçlı olarak,
- Spor aletleri yapımında kullanımları yaygındır.

TAA, minimum hacimde yüksek ağırlığa sahip parçalar üretme gereksinimlerine, iyi işlenebilirlik ve hızlı ve seri üretilebilme kabiliyetleri sayesinde en iyi çözümlerden biridir. Yüksek yoğunluklu alaşım ve elementlerin karşılaştırıldığı Çizelge 3.1'e bakıldığında bu durum daha iyi anlaşılabilir.

Çizelge 3.1. Yüksek yoğunluklu alaşım ve elementlerin karşılaştırılması [9].

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Ergime Derecesi (°C)	Elastisite Modülü (GPa)
Çelik	7.86	1536	207
Civa	13.5	-39	Oda sıcaklığında sıvı
Uranyum	18.9	1132	160
Tungsten Alaşımları	17 – 18.5	1450	310-380
Tantal	16.6	2996	186
Tungsten	19.3	3410	410
Altın	19.3	1064	80
Platin	21.4	1772	147
İridyum	22.5	2443	524

3.2.1. Sinterleme Atmosferi ve Sinterleme

TAA gibi çok bileşenli sistemlerin sinterlenmesi, bir bileşenli veya çok bileşenli homojen sistemlerin sinterlenmesinden farklıdır. Sinterleme sırasında ergimeyen toz parçacıkları, sıvı faz tarafından çimento gibi birleştirilmektedir. Bu bağlayıcılık özelliği elde edilen mekanik mukavemetin başlıca sebebidir. Ergimemiş toz parçacıkları arasındaki çekme kuvvetleri etkisiz ikinci derecede rol oynamaktadır. Boşluk fazı ile bunun çevrelediği ergimemiş toz parçacıkları arasındaki mevcut kuvvetler, kohezyon için esastır. Ergime ile elde edilmiş metallerde, ergimemiş fazla bağlayıcı faz arasındaki limitler tane sınırlarına tekabül etmektedir. Sıvı faz, katı parçacıkları tamamen sardığında, ideal şartlar gerçekleşmiş olmaktadır. Bunun için sinterleme sıcaklığında sıvının, alaşımının ergime sıcaklığı yüksek olan bileşeni içinde eritebilmesi gerekmektedir. Eğer sıvının bu içinde eritme kabiliyeti yoksa, yukarıda belirtilen ideal sarma mümkün olmamaktadır. Bu takdirde sıvının ergime sıcaklığı yüksek olan bileşeni “ıslatmadığı” söylenebilir.

TAA sinterlenmesi, gerekli sıcaklığı sağlayabilen ve uygun atmosfer koşullarının oluşturulabildiği herhangi bir fırında yapılabilmektedir. Sıcaklığın ve ısıtma sürelerinin tutarlı olması, kaliteli TAA üretmek için gereklidir. Sinterlemede genellikle saf hidrojen kullanılır. Hidrojen ve azot karışımları ve ayrılmış amonyakta kullanılmaktadır. Argon veya hidrojen-argon karışımları kullanılmaz. Çünkü sinterleme esnasında yüksek argon varlığı düşük yoğunluğa neden olmaktadır.

Sinterleme sırasında kullanılan atmosfer ne olursa olsun, yaklaşık 1000°C'de hidrojenle yapılacak bir temizleme basamağı sürece eklenmektedir. Küçük parçalar için bu sıcaklıkta birkaç dakikalık süre yeterli olurken, büyük parçalarda bu süre bir saatin üzerindedir. Vakum ortamında yapılacak sinterleme boyunca, hidrojenle temizleme yapılmaktadır. Kalıpla şekillendirme yapılan alaşımlar için, yağlayıcıların uzaklaştırılması ve karbon kalıntılarının yok edilmesi için, bu temizleme büyük önem arz etmektedir. Eğer önemli miktarda karbon ortamda hala mevcut ise sıvı faz formlarında, yoğunlukta ve mekanik özelliklerde ciddi problemler oluşmaktadır [6].

W-Ni-Cu üçlü alaşımının sıvı fazlı sinterlemesinde, bakırın ergime sıcaklığının düşük, ergime sıcaklık aralığının da geniş olmasından dolayı, tam yoğunluğun elde edilmesi zordur. Bu alaşımlara başarılı bir sinterleme 1380–1450 °C sıcaklık aralığında, çok düşük ısıtma hızında yapılmaktadır. Küçük parçalar için sinterleme süresi 1 saatin altında gerçekleşirken, büyük parçalar için birkaç saat sürebilmektedir. Bakır ilaveli bu alaşımın sinterlemedeki en büyük avantajı, parçaların sıcaklık nedeniyle deformasyon (çökme) eğilimi göstermemesidir.

W-Ni-Fe üçlü alaşımının sinterlemesi 1450–1600 °C aralığında gerçekleşir. Sinterleme sıcaklığı W oranının artışına bağlı olarak artmaktadır. Isıtma oranları bakır takviyeli alaşıma göre kritik değildir. Büyük parçalarda 1450 – 1560 °C sıcaklık aralığı yavaş yapılmalıdır. Çok hızlı gerçekleşecek büyük sıcaklık değişimleri mikroyapılarda bozulmaya ve gözenekliliğe sebep olmaktadır.

3.3. TAA'DA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN KARAKTERİZASYONU

TAA'ları, tungsten elementinin ergime sıcaklığı yaklaşık 3410 °C olduğu için, ergime sıcaklığı göreceli olarak düşük elementler ile karıştırılarak üretilmektedirler. Sıvı faz sinterleme işlemini gerçekleştirmek için katı fazın (tungsten tanelerinin), sıvı faz içerisinde kısmi çözünürlüğü gereklidir. Katı fazın sıvı faz içerisinde çözünürlüğü, sıvı faz sinterleme işleminde, sıvının katı tungsten taneleri arasındaki yayılımı ve tekrar çökmesi için gereklidir. Bu sebepten dolayı genellikle tungsten, nikel, bakır veya demir ile karıştırılarak sıvı faz sinterleme işlemi uygulanmaktadır. Tungstenin nikel içerisindeki yüksek çözünürlüğü nedeniyle nikel ile sıvı faz sinterleme işlemi yapılmaktadır. Ancak tungsten, nikel ile kırılğan fazlara sahip bileşik oluşturmaktadır. Bu sebeple, tungsten çözünürlüğünün kontrol edilmesi ve kırılğan fazların oluşmasını engellemek için demir bileşime alaşım elementi olarak eklenmektedir. Ayrıca, ferromanyetik özellik istenmiyorsa ve mekanik özelliklerin düşük olmasının sorun yaratmadığı durumlarda bakırda bileşime ilave edilebilmektedir.

BÖLÜM 4

AŞINMA

4.1. GİRİŞ

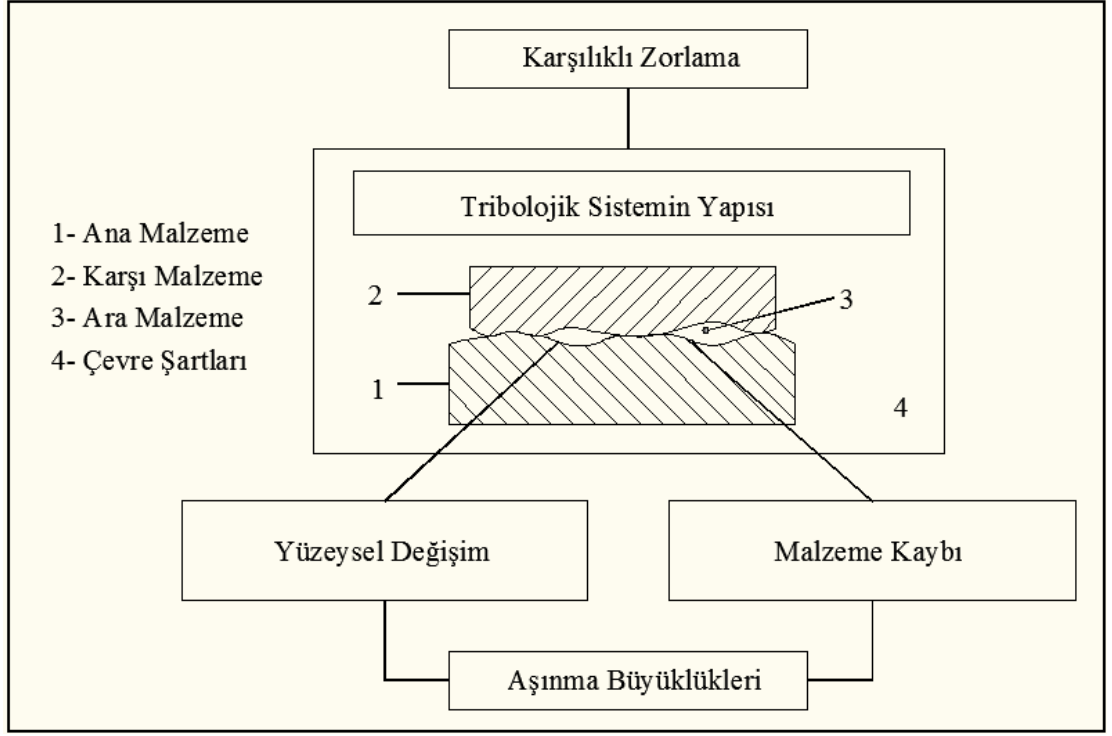
Birbirleriyle temas halinde bulunan makina parçaları arasında oluşan sürtünmeler sonucunda meydana gelen aşınma istenmeyen bir durum olduğu gibi, büyük ekonomik kayıplara da yol açmaktadır [13]. Mühendislik malzemelerinin aşınma davranışlarının belirlenmesi için yapılan akademik çalışmalar, çalışma koşullarına uygun malzeme seçimine ve parça ömrünün belirlenmesine katkıda bulunarak yaşanabilecek ekonomik kayıpların enaza indirilmesine büyük katkı sağlamaktadır.

Aşınma DIN 50320 standardında, malzeme yüzeyinden mekanik sebeplerle ufak parçaların ayrılmasıyla meydana gelen bozulma olarak tanımlanmaktadır. Bir başka aşınma tanımı ise, bir yüzeyden diğer bir yüzeye malzeme transferi veya aşınma tanelerinin oluşumu neticesinde meydana gelen malzeme kaybı olarak ifade edilmektedir [15].

Bir aşınma sisteminde ;

- Ana malzeme (aşınan),
- Karşı malzeme (aşındıran),
- Ara malzeme,
- Yük,
- Hareket.


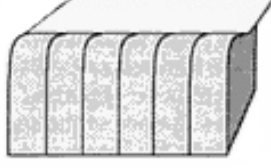
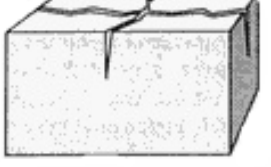


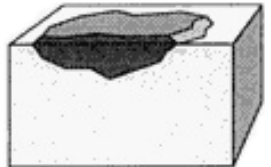
aşınmanın temel unsurlarıdır. Bütün bu unsurların oluşturduğu sistem tribolojik sistem olarak adlandırılmaktadır [15]. Tribolojik sistem Şekil 4.1'de şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 4.1. Tribolojik sistemin şematik olarak gösterilişi [15].

Aşınma, çok kez önceden bilinen bir hasar türüdür. Temas halinde olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri veya yağlayıcılarla korunsalarda, maruz kaldıkları yükler koruyucu tabakaların bozularak, iki yüzeyin doğrudan temasına neden olmaktadır. Bu temas sonucunda oluşan sürtünme, malzemenin çalışma koşullarındaki ömrünü ve performansını olumsuz etkilemektedir. Aşınma hasarları, uygun yağlama, filtreleme, malzeme seçimi ve tasarım gibi faktörlerle de azaltılabilir, fakat asla tamamen önlenemez [15].

Gerçekte bir yüzey hasarı olan aşınma, yüzeyden malzeme kaybı, kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşmektedir [16]. Yüzeyde meydana gelen aşınma hasarları Şekil 4.2’de gösterilmektedir. Aşınmada meydana gelmesi mümkün olan hasarı değerlendirmek, alınacak önlemin doğru yöntem olması açısından önemlidir.

<p>Yüzeyin yapısında meydana gelen faz dönüşümü ve yeniden kristalleşme gibi değişiklikler yüzeyin mekanik özelliklerini değiştirir.</p>	
<p>Yüzey tabakasında meydana gelecek lokal ya da büyük çaplı plastik deformasyon çatlak oluşumuna neden olabilir.</p>	
<p>Artan mekanik temasın meydana getirdiği ısıyla birlikte meydana gelebilecek çatlaklar bir ağ oluşturursa meydana gelecek hasar büyük olabilir.</p>	
<p>Aşınma, yüzeyden malzeme kaybına ve kopmalara sebebiyet verir.</p>	
<p>Aşınmada aşınan yüzeyden ayrılan parçaların karşı yüzeye transferi görülebilir.</p>	
<p>Korozyon aşınmayı hızlandırıcı bir etki yapar.</p>	

Şekil 4.2. Aşınmanın sınıflandırılması [16].

4.2. AŞINMAYI ETKİLEYEN FAKTÖRLER

Aşınmada çalışma koşullarında kabul edilebilir boyutta olan aşınmalar hafif aşınma olarak ifade edilmektedir (aşınma parçacıkları 0,01-0,02 μm). Aşınma parçacıkları daha büyük boyutta olan aşınmalar şiddetli aşınma olarak tanımlanmaktadır [17].

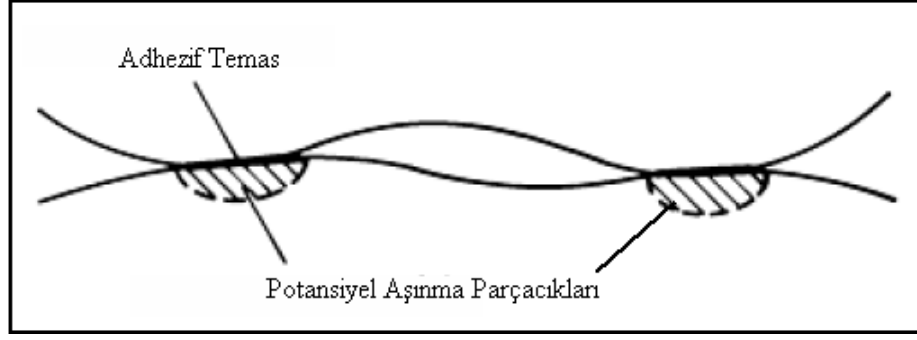
Aşınmayı etkileyen faktörler başlıca dört ana grupta sınıflandırılmaktadır [17].

- Ana malzemeye bağlı faktörler
 1. Kristal yapısı
 2. Sertlik
 3. Elastikiyet modülü
 4. Deformasyon davranışı
 5. Yüzey pürüzlülüğü
 6. Malzemenin boyutu
- Karşı malzemeye bağlı faktörler
- Ortamın etkisi
 1. Sıcaklık
 2. Nem
 3. Atmosfer
- Servis koşulları
 1. Basınç
 2. Hız
 3. Kayma yolu

4.3. AŞINMA MEKANİZMALARI

4.3.1. Adhezif Aşınma

Adhezif aşınma, temas halinde bulunan ve birbirlerine göre göreceli hareket eden iki yüzeyin birinden kopan parçacıkların, diğer yüzeye yapışması olarak tanımlanmaktadır [16]. Adhezif aşınmada temas halinde bulunan yüzeyler uygulamada hiçbir zaman pürüzsüz olamadıkları için, yüzeylerde temas halinde bulunan çıkıntılarda, yüzeye etkiyen kuvvetin ve kayma sürtünmesinin oluşturduğu ısının etkisiyle soğuk kaynaklanma meydana gelir (Şekil 4.3). Meydana gelen kaynaklanmalardaki gerilmeler akma sınırını aştığında kopmalar olur ve aşınma meydana gelir.



Şekil 4.3. Adhezif aşınmanın şematik gösterimi [16].

Adhezif aşınma, uygun yağlama, birbiriyle bağ oluşturmeyen malzeme seçimi, pürüzlülüğün enaza indirilmesi ve metal-metal temasının ortadan kaldırılmasıyla minimum seviyeye çekilebilmektedir.

4.3.2. Abrazif Aşınma

Abrazif aşınma, malzeme yüzeylerinin kendisinden daha sert olan parçacıklarla basınç altında etkileşmesi ve bu sert parçacıkların malzeme yüzeyinden parçalar koparması şeklinde tanımlanmaktadır. Çizilme aşınması da denen bu aşınma türü sistemlere hızlı hasar verebilmektedir.

Abrazif aşınma iki ve üç elemanlı olarak iki şekilde meydana gelmektedir. İki elemanlı abrazif aşınma sürtünen yüzeylerin doğrudan birbiriyle etkileşmesi sonucu meydana gelmektedir. Üç elemanlı abrazif aşınma ise, ana ve karşı malzeme arasına girebilecek toz, mineral taneleri, çizilme sonucu oluşan mikro boyutlu talaş parçaları, üçüncü eleman olarak fonksiyon göstermektedir [15].

Abrazif aşınmaya karşı, yüzey sertliğinin artırılması, üçüncü parçacıkların sistemden uzaklaştırılması, dışardan sisteme girebilecek parçalara karşı filtrasyonun sağlanması gibi önlemler sayesinde en aza indirilmektedir.

4.3.3. Yorulma Aşınması

Sürekli ve değişken yüklerle maruz kalan parçalarda görülen yorulma aşınması, yorulmanın malzeme yüzeyinde oluşturduğu çatlaklardan parçaların kopması, çukur ve oyukların meydana gelmesiyle kendini göstermektedir [15]. Bu tür aşınmalar, genellikle dişli çarklar, rulmanlı yataklar ve dönerek çalışan silindirik millerde görülmektedir.

4.3.4. Eroziyon Aşınma

Sıvı taşınan sistemlerde taşınan sıvı içerisindeki sert parçacıkların, yüksek hızlarda kayma ve yuvarlanma şeklindeki hareketleri sonucunda sistem elemanlarına verdiği hasara eroziyon aşınma denmektedir [15]. Bu aşınma pompa, pervane, fan, nozul, boru iç yüzeyleri ve boru bağlantı elemanlarında görülmektedir.

Akışın meydana getirdiği sıcaklık artışı ve akış hızı aşınma hasarını artırmaktadır. Sıvı içerisinde taşınan hava kabarcıklarında hızla çarptıkları yüzeye aşınma hasarı meydana getirebilir ve bu türden aşınmalar kavitasyon aşınması olarak adlandırılmaktadır. Eroziyon aşınma, sert olmayan malzeme yüzeylerinde kopmalara, keskin hatlı unsurlarda uç aşınmalarına, yüzeylerde kanal ve yiv geometrili hasarların oluşumuna sebebiyet vermektedir. Sisteme uygulanacak filtrasyon hasarı azaltmaya yardımcı olmaktadır.

4.3.5. Oymalı Aşınma

Oymalı aşınma, yüksek gerilim altında bulunan bir yüzeye çarpma sonucu oluşan parça kesilmesi veya oyularak kopması olarak tanımlanmaktadır. Bu tip aşınma, sondaj ekipmanlarında, madencilik ve inşaat makinelerinde sıkça görülmektedir. Oymalı aşınmanın meydana getirdiği hasar genellikle aşınmaya uğrayan parçanın değişimiyle giderilebilmektedir [15].

4.3.6. Kazımalı Aşınma

Kazımalı aşınma direkt bir hareketin olmadığı fakat titreşim altında çalışan sistemlerin bağlantı elemanları ve yataklarında görülen aşınma türüdür. Titreşimler zamanla mikro kaynaklanmaları meydana getirerek hasar oluşturmaktadır. Bu aşınma türünün vereceği hasarları azaltmak için, titreşimin mümkün olan enaz seviyeye indirilmesi, temas yüzeylerindeki kaymaların azaltılması, bağlantı noktalarına titreşim sönümleyici kullanımı ve yağlama etkin çözüm yöntemleridir [17].

BÖLÜM 5

MALZEME VE METOT

5.1. GİRİŞ

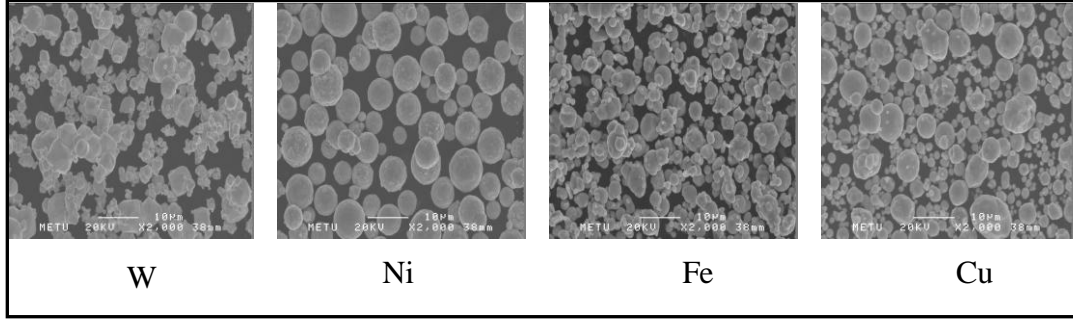
Bu çalışmada, sabit alaşım elementi oranına sahip TAA, T/M'nin sıvı faz sinterleme yöntemi ile üretilmiştir. Üretilen alaşımların kimyasal bileşimleri ve anma kodları Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5.1. Kimyasal bileşimler ve anma kodları.

Kimyasal Bileşim	Anma Kodu
90W-7Ni-3Fe	A1
93W-4,9Ni-2,1Fe	A2
97W-2,1Ni-0,9Fe	A3
90W-7Ni-3Cu	B1
93W-4,9Ni-2,1Cu	B2
97W-2,1Ni-0,9Cu	B3

5.2. TOZLARIN HAZIRLANMASI

Deney numunelerinin hazırlanmasında kullanılan Ni, Cu, Fe ve W metal tozlarının özellikleri Çizelge 5.2'de verilmiştir. Şekil 5.1'de ise, deneysel çalışmalarda kullanılan W, Ni, Fe ve Cu tozlarının SEM görüntüleri verilmektedir. Altı farklı bileşim için herbir bileşimin toplam ağırlığı 200 g olacak şekilde tozlar hassas terazide tartılarak hazırlanmış ve 250 cm³ hacimli poliamid kaplara konmuştur. Daha sonra bu kaplar Şekil 5.2'de görülen Turbula® Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) karıştırıcıda 67 dv/dak ile 45 dakika karıştırılmıştır.



Şekil 5.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan elementel tozların SEM görüntüleri.



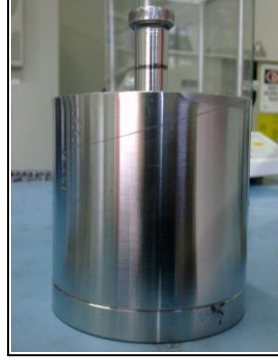
Şekil 5.2. Elementel tozların karıştırılmasında kullanılan Turbula® Shaker Mixer (Model T2F Glenn Mills) tipi karıştırıcı.

Çizelge 5.2 Deneysel çalışmalarda kullanılan tozların özellikleri (%).

Toz	Fe	Cu	Ni	W
Üretici	W. Rowland Ltd.	AEE	AEE	Eurotungstene
Saflık	99.5+	99.9+	99.9+	99.9+
Tozun şekli	Küresel	Küresel	Küresel	Poligonal
D10 (µm)	3.6	3.1	5.2	1.7
D50 (µm)	7.8	6.5	9.1	4.2
D90 (µm)	27.3	12.3	16.1	10.3

5.3. TOZLARIN ŞEKİLLENDİRİLMESİ

Deneysel çalışmalarda Ø12x6-7 mm boyutunda numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan sıkıştırılmış ham parçaların sinterleme sonrasında %16 hacimsel küçülme göstereceği göz önüne alınmıştır [18]. Karıştırılan tozların şekillendirilmesinde Şekil 5.3'te görüntüsü verilen kalıp kullanılmıştır.



Şekil 5.3. Numelerin şekillendirilmesinde kullanılan metal kalıp.

Saf Tungsten tozundan gramaj belirleme amacıyla Ø12mm kalıp yardımıyla baskı denemeleri yapılarak numunelerin 10 g tozdan elde edilebildiği hesaplanmıştır. Numuneler ARI marka AHP-K 150.e model 50 ton baskı kapasiteli hidrolik preste 600 MPa basınç uygulanarak yapılmıştır (Şekil 5.4). Ø12 mm'lik kalıba göre baskı kuvveti hesabı yapılmıştır (Eşitlik 5.1).

Baskı kuvveti :

$$F = P \times A \quad (5.1)$$

$$F = 600 \text{ MPa} \times 113 \text{ mm}^2 / 9,81 \text{ N/kg} = 6900 \text{ kg} \text{ olarak bulunmuştur.}$$



Şekil 5.4. Deney numunelerinin preslendiği ARI marka pres.

5.4. SİNERLEME

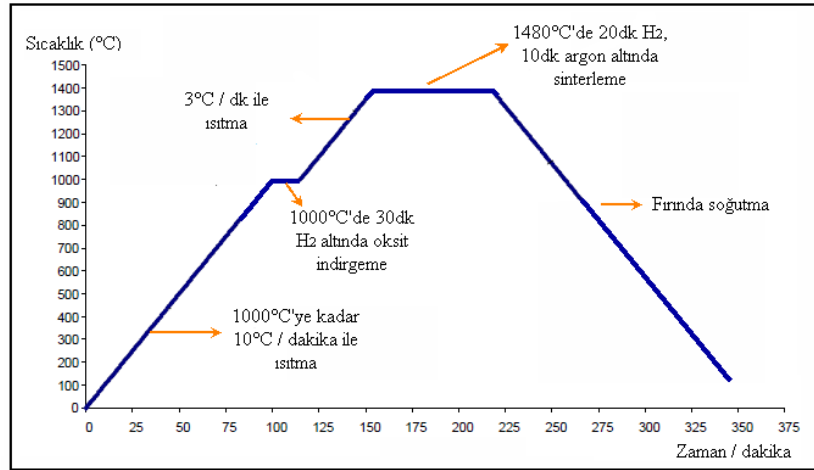
Numunelerin sinterlenmesi Fe alaşımlı bileşimler ve Cu alaşımlı bileşimler olmak üzere iki farklı aşamada gerçekleştirilmiştir. İki aşamada da sıvı faz sinterleme tekniği kullanılarak numuneler sinterlenmiştir.

Fe alaşımlı bileşimler için sinterleme çalışmaları, yüksek saflıkta hidrojen gazı altında (çiğlenme noktası = -60°C), 1480°C 'de Şekil 5.5'da görülen LINN marka HT-1800-M-Vac model atmosfer kontrollü fırında gerçekleştirilmiştir.

Fe ilave edilen W-Ni alaşımının sinterleme işleminde numuneler $10^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$ ısıtma hızı ile 1000°C 'ye ısıtılmış, ardından saf H_2 altında 1000°C 'de 30 dakika oksit indirgeme yapıldıktan sonra, $3^{\circ}\text{C}/\text{dakika}$ ısıtma hızı ile 1480°C 'ye ısıtılmıştır. Numuneler 1480°C 'de 20 dakika H_2 altında ve 10 dakika süre ile argon ortamındaki sinterlemenin ardından fırında soğutulmuştur. Deneysel çalışmalarda uygulanan sinterleme döngüsü Şekil 5.6'da verilmiştir.



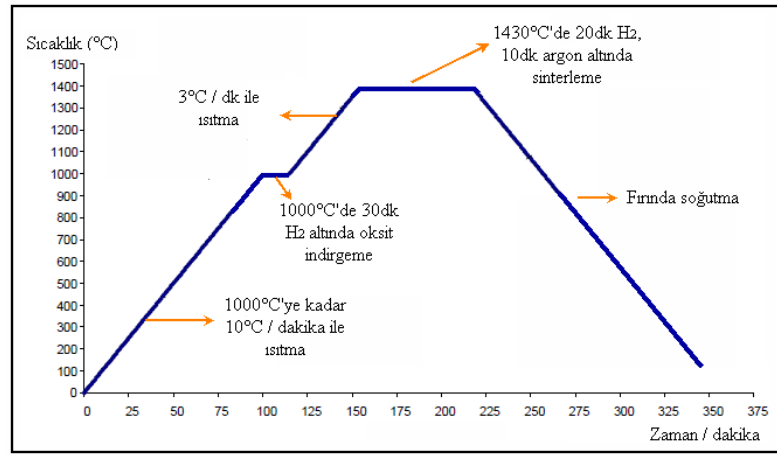
Şekil 5.5. Sinterlemelerin yapıldığı LINN marka HT-1800-M-Vac model fırın.



Şekil 5.6. W-Ni-Fe alaşımları için sinterleme döngüsü.

Cu alaşımlı bileşimler için sinterleme çalışmaları, yüksek saflıkta hidrojen gazı altında (çiğlenme noktası = -60 °C), 1430 °C'de Şekil 5.5'te görülen LINN marka HT-1800-M-Vac model atmosfer kontrollü fırında kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Fe ilave edilen W-Ni alaşımının sinterleme işleminde numuneler 10 °C/dakika ısıtma hızı ile 1000 °C'ye ısıtılmış, ardından saf H₂ altında 1000 °C'de 30 dakika oksit indirgeme yapıldıktan sonra, 3 °C/dakika ısıtma hızı ile 1430 °C'ye ısıtılmıştır. Numuneler 1430 °C'de 20 dakika süre ile H₂ altında ve 10 dakika süre ile argon ortamında sinterlemenin ardından fırında soğutulmuştur. Deneysel çalışmalarda uygulanan sinterleme döngüsü Şekil 5.7'de verilmiştir.



Şekil 5.7. W-Ni-Cu alaşımları için sinterleme döngüsü.

5.5. METALOGRAFİK NUMUNE HAZIRLAMA

Sinterlenen numuneler, mikroyapı incelemesi için hazırlanmıştır. Zımparalama işlemi Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan PRESİ marka MECAPOL P 262 model polisaj cihazı kullanılarak yapılmıştır. Zımparalama işleminin sonrasından sonra numuneler 3 µm elmas pasta ile parlatıldıktan sonra 2 ml (HF), 90 ml saf su, 5 ml (HNO₃), 3 ml (HCL) ile 30-45 saniye dağlanmıştır.

5.6. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİ

Sinterlenen numunelerin yoğunluk lmleri PRECISA XB200 h marka 220 g (min) 0.01g 1/10000 hassasiyetli yoğunluk ölçüm cihazı kullanılarak Arşimet prensibine göre yapılmıştır. Bulunan yoğunluk değerleri, ASTM B777-07 standardına göre

alaşım elementi olarak Ni-Fe ve Ni-Cu kullanılan bileşiklerin yoğunluk değerlerinin verildiği izelge 5.3'le karşılaştırılmıştır.

Çizelge 5.3 ASTM B777-07 satandardı Tungsten Ağır Alaşımları yoğunluk ve sertlik değerleri izelgesi [17].

Sınıf	Tungsten Oranı (%)	Yoğunluk (g/cm ³)
1	90	16,85 – 17,25
2	92,5	17,15 – 17,85
3	95	17,75 – 18,35
4	97	18,25 – 18,85

5.7. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Yoğunluk ölçümleri yapılan numunelerin sertlikleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan AFFRI SYSTEM marka VRSD-251 model üniversal makro sertlik cihazında (HRC) ölçülmüştür. Herbir numune üzerinden üç adet sertlik ölçümü yapılarak ortalaması alınmıştır.

5.8. AŞINMA TESTLERİ

5.8.1. Aşınma Deney Cihazı

Aşınma deneylerinde kullanılan pin-on-disk tipi standart deney aparatının görüntüsü şematik olarak Şekil 5.9'da verilmiştir. Bu cihaz her türlü yük, kayma hızı ve farklı devirlerde çalışabilmektedir. Aşınma testlerinde herbir numune için aynı kayma hızında ve 600 m, 1200m, 1800m, 2400m ve 3000 m kayma mesafeleri kullanılmıştır.

5.8.2. Karşılık Diski ve Malzemesi

Aşınma testlerinde diskin ve numune yüzeylerinin temiz olması gerekmektedir. Bu nedenle testen önce her numune ve disk yüzeyi aseton ile temizlenmiştir. Her numune farklı bir iz oluşturacak şekilde yerleştirilerek her test için aynı yüzey kalitesi sağlanmıştır. Tüm izler kullanıldıktan sonra disk taşlanarak tekrar teste hazır hale getirilmektedir.

Tungsten alaşımları numuneleriyle çalışılacak dönel disk için AISI 4140 malzemeden yapılmış Ø230 mm çapında, 20 mm kalınlığında ve 60-64 HRC sertliğinde çelik disk kullanılmıştır.

5.8.3. Aşınma Deneyleri

Deney cihazı devrinin ölçülmesi için COMPACT marka takometre (0-1000 dv/dk, 0.5 V çıkışlı) kullanılmıştır. Aşındırılan numuneler 1/10000 hassasiyetli PRESICA marka terazide tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir. Aşınma deneylerinde yük parametrik olarak 20 N uygulanmıştır. Aşınma mesafesi olarak 600 m, 1200 m, 1800 m, 2400 m ve 3000 m olarak beş farklı mesafe test edilmiştir. Kayma hızı olarak da 1 ms^{-1} 'lik hız seçilmiştir.

Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} g hassasiyetinde bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram (g) veya miligram (mg) olarak ifade edilirse, metre (m) veya kilometre (km) olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km) veya (mg/m) olarak ifade edilebilir.

Ağırlık kaybının ölçümü yönteminde en çok kullanılan bağıntı Eşitlik 5.2'de verilmiştir [13].

$$W_a = \frac{\Delta G \text{ (mg)}}{d \cdot P \cdot S \text{ (g/cm}^3 \cdot \text{N} \cdot \text{m)}} \quad (5.2)$$

Burada;

Wa	: Aşınma oranı (mm ³ /Nm)
ΔG	: Ağırlık kaybı (mg)
P	: Yükleme ağırlığı (N)
S	: Kayma yolu (m)
D	: Yoğunluk (g/cm ³) olarak verilmiştir.

5.9. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMESİ

Standart metalografik işlemlerle hazırlanan numunelerin mikroyapı incelemelerinde ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan JEOL marka JSM-6400 model tarama elektron mikroskop (SEM) kullanılmıştır. Ayrıca aşınma testleri yapılan numunelerin, aşınma yüzeyleri ve aşınma tozları da SEM ile incelenmiştir.

5.10. ENERJİ DAĞILIMLI X-IŞINI SPEKTROSKOPİSİ (EDS) İNCELEMESİ

Metalografik numunelerin ana malzeme ve bağlayıcı faz ve aşınma tozlarının elementel olarak incelenmesi için yapılan EDS analizleri ODTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Laboratuvarı'nda bulunan JEOL marka JSM-6400 model cihazda yapılmıştır.

5.11. TANE BOYUTU ÖLÇÜMLERİ

Numunelerin ortalama tanecik boyutları ASTM E 112-96 standardında yer alan "Jeffries" metoduna göre ölçülmüştür [19].

$$N_A = f(N_{iç} + N_{kesişim}/2) \quad (5.3)$$

$$G = (3,321928 \log_{10} N_A) - 2,954 \quad (5.4)$$

Eşitlik 5.3'te verilen N_A değeri mm^2 başına düşen tanecik adedini verir. $N_{iç}$ 100x100 mm ölçüsündeki SEM görüntüsü üzerine çizilen 5000 mm^2 'lik daire ($\phi 79.8 \text{ mm}$) içinde kalan tanecik sayısı, $N_{kesişim}$ ise bu dairenin kestiği taneciklerin sayısıdır. Bulunan fonksiyon standartta verilen resmin büyüklük ölçeğindeki katsayıyla çarpılır ve Eşitlik 5.4'den G değeri bulunur. Bulunan değer standartta verilen çizelgedeki en yakın değere yuvarlanarak tablodan ortalama tanecik boyutu bulunur.

5.12 X-IŞINI KIRINIMI (XRD) İNCELEMELERİ

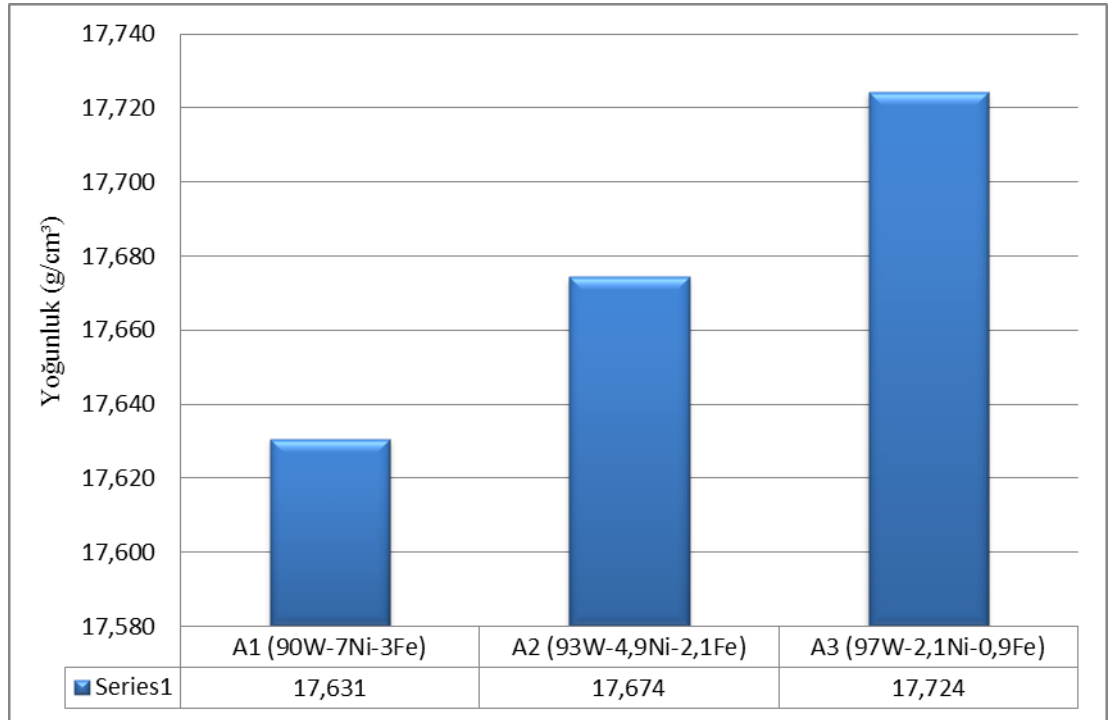
Yüzey görüntülerine ait fazları belirlemek amacıyla, Atılım Üniversitesi Metal Şekillendirme Mükemmeliyet Merkezi bünyesindeki “GE Seifert XRD-3003-PTS” marka cihazla XRD analizi yapılmıştır. Ölçümlerde bakır (Cu) $K\alpha$ ışınımı, 40 kV gerilim ve 45 mA akım, $1^\circ/102 \text{ sn}$ ölçüm hızı ve $35^\circ - 120^\circ$ aralığı kullanılmıştır.

BÖLÜM 6

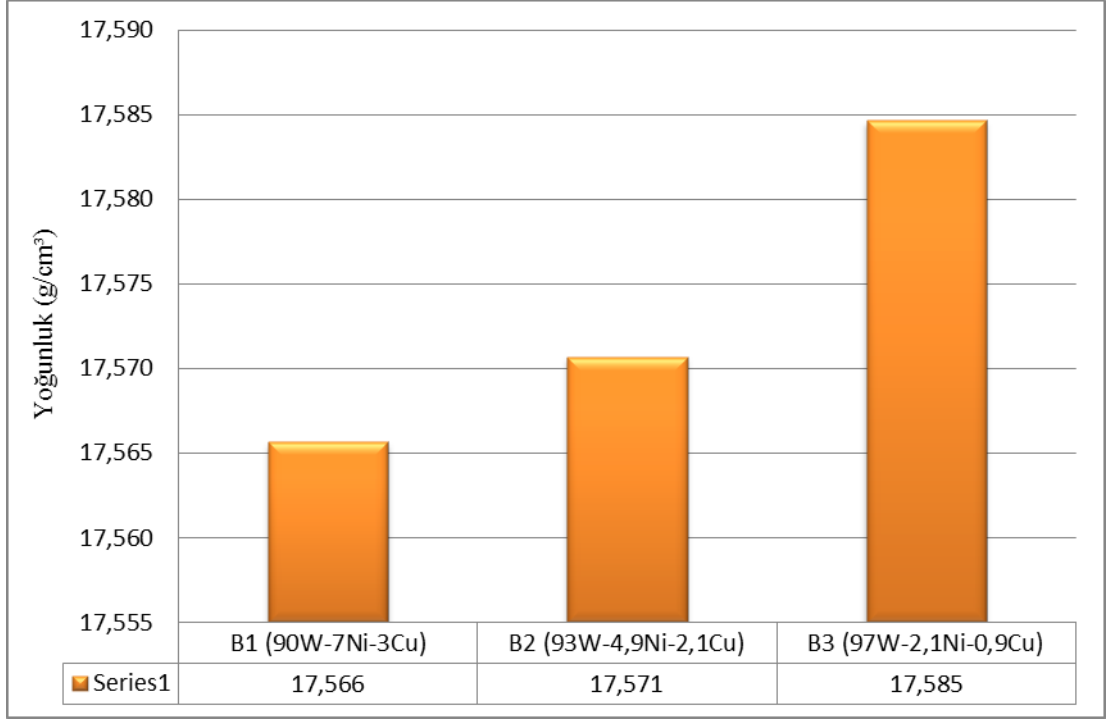
DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ VE TARTIŞMA

6.1. YOĞUNLUK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ

İçerisine farklı oranlarda Fe ve Cu ilave edilen TAA malzemelerin 1430°C-1480°C sıcaklık aralıklarında atmosfer kontrollü (Hidrojen+Argon) ortamda sıvı faz sinterlemesi uygulanarak sinterlenen numunelerin yoğunlukları ölçülmüştür. Arşimet prensibine göre yapılan yoğunluk ölçümlerinde 7 adet numunenin ortalaması alınmıştır. Deney numunelerinin yoğunluk ölçümleri, bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılanlar için (A1-A2-A3) Şekil 6.1 ve Ni-Cu kullanılanlar için (B1-B2-B3) Şekil 6.2’de verilmiştir.



Şekil 6.1. A1-A2-A3 için yoğunluk (g/cm³) değişimi.



Şekil 6.2. B1-B2-B3 için yoğunluk (g/cm^3) değişimi.

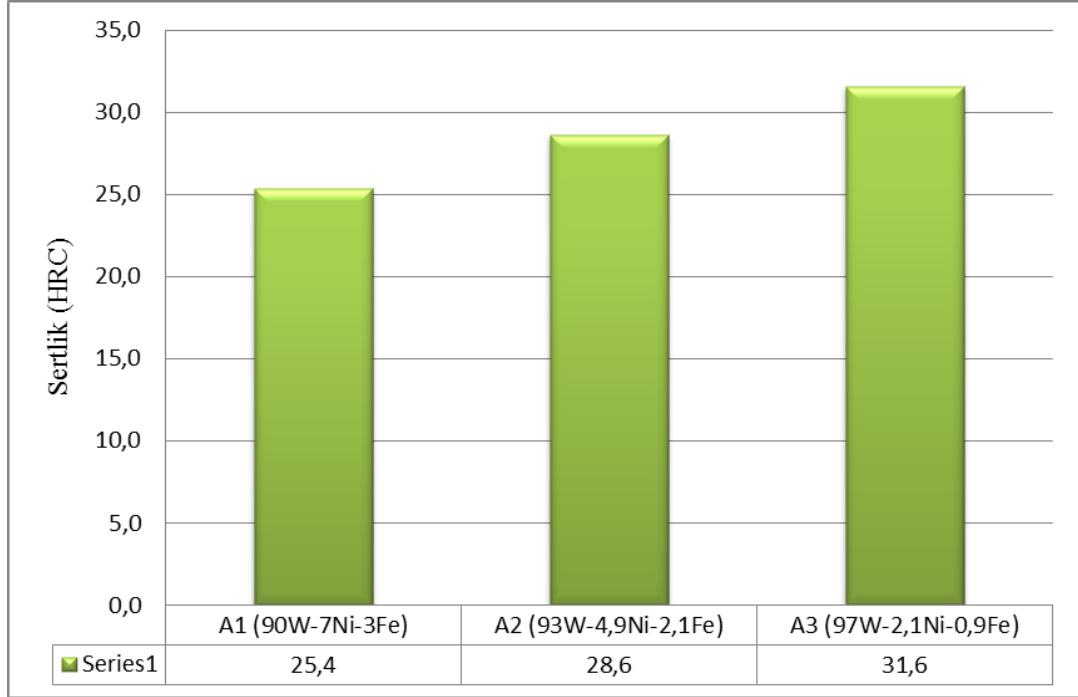
Şekil 6.1 ve Şekil 6.2’de verilen yoğunluk ölçüm sonuçlarına göre, W miktarı yüksek olan numunelerin yoğunluklarının da fazla olduğu belirlenmiştir. Bunun nedeni ise, tüm alaşım elementleri içinde yoğunluğu en yüksek alaşım elementinin ($19,3 \text{ g/cm}^3$) tungsten olmasıdır. Buna bağlı olarak numune yoğunlukları artmaktadır.

Numunelere yapılan yoğunluk ölçümleri, Çizelge 5.3’te verilen ASTM B 777-07 [20] standardında verilen yoğunluk değerleriyle karşılaştırıldığında, A1 ve B3’ün standart değer aralığının %99’una karşılık geldiği belirlenmiştir. A3 ve B1 numunelerinin ise, değer aralığında olduğu görülmektedir. Standartta karşılığı olmayan A2 ve B2 numuneleri ise, İslam S. Humail ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada aynı bileşime sahip numunelerde belirledikleri $17,52 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk değerinin üzerinde olduğu belirlenmiştir [21].

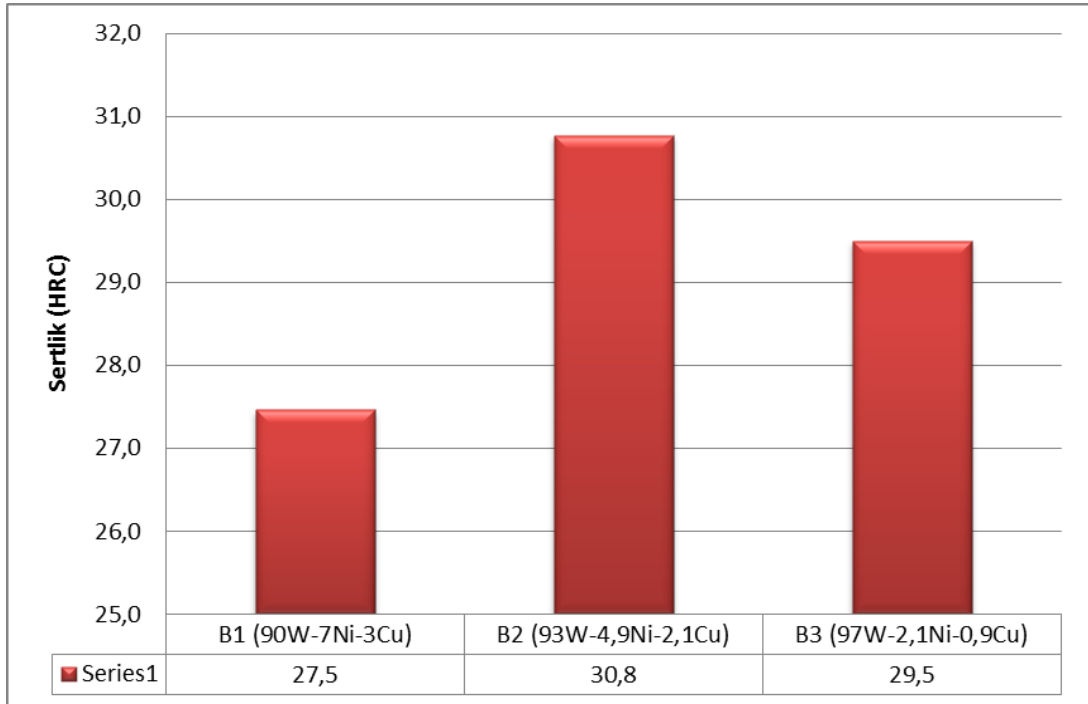
6.2. SERTLİK ÖLÇÜMLERİNİN İNCELENMESİ

Yoğunluk ölçümleri tamamlanan numunelerden en yüksek yoğunluğa sahip 3 adet numune üzerinde sertlik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Herbir numuneden 5 adet ölçüm yapılarak ortalama sertlik değerleri belirlenmiştir. Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe

kullanılan numuneler (A1-A2-A3) için sertlik sonuçları Şekil 6.3 ve Ni-Cu kullanılan numuneler (B1-B2-B3) için sertlik sonuçları Şekil 6.4’de verilmiştir.



Şekil 6.3. A1-A2-A3 için sertlik (HRC) değişim grafiği.



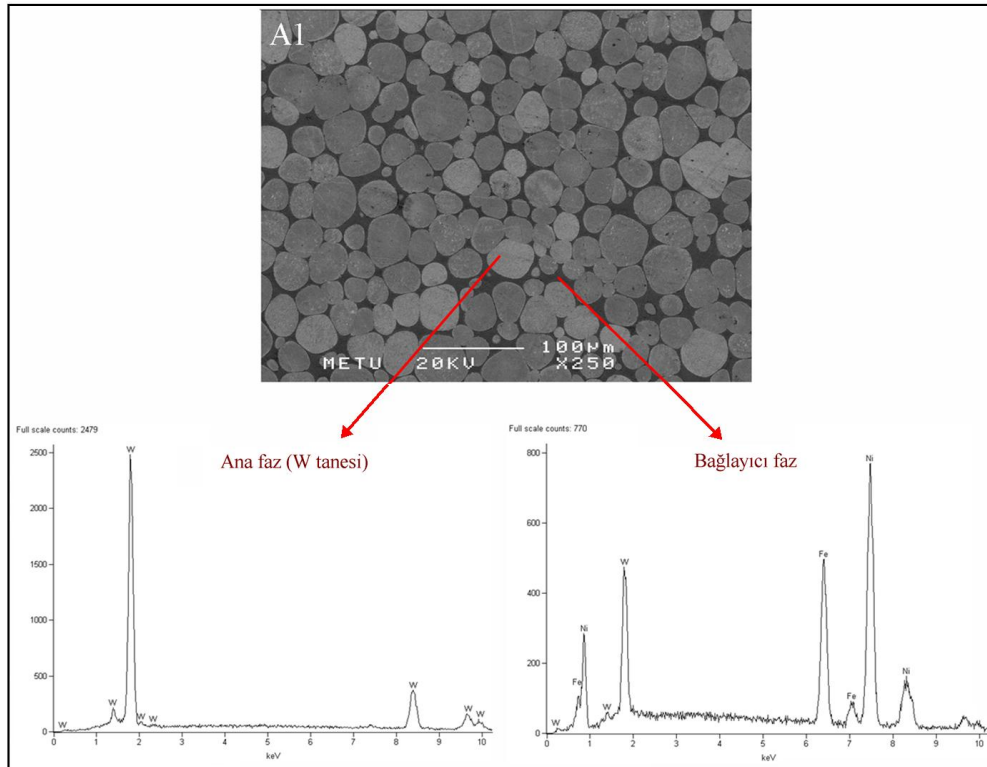
Şekil 6.4. B1-B2-B3 için sertlik (HRC) değişim grafiği.

Yapılan sertlik ölçümü sonuçlarına göre bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan alaşımlarda tungsten miktarı arttıkça sertliğin arttığı gözlenmiştir. Bağlayıcı faz olarak Ni-Cu kullanılan alaşımlarda ise, tungsten miktarının artışıyla sertlik artışının paralel olarak gerçekleşmediği görülmüştür. Bu duruma B3 alaşımlarında oluşması muhtemel olan gözenekli yapının sebebiyet verdiği düşünüldüğünden, mikroyapı incelemeleri sırasında bu durum tekrar değerlendirilecektir.

6.3. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

6.3.1. SEM ve EDS Analizleri

Metalografik olarak hazırlanmış numunelere ait tarama elektron mikroskobu (SEM) görüntüleri ve EDS analizleri yapılarak incelenmiştir. SEM görüntüleri, numunelerin hepsinde matris faz ve bağlayıcı fazın homojen bir dağılım sergilediği ve matris faz taneleri arasında boyunlaşmaların meydana geldiğini göstermektedir. A1 numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 6.5'te verilmiştir.



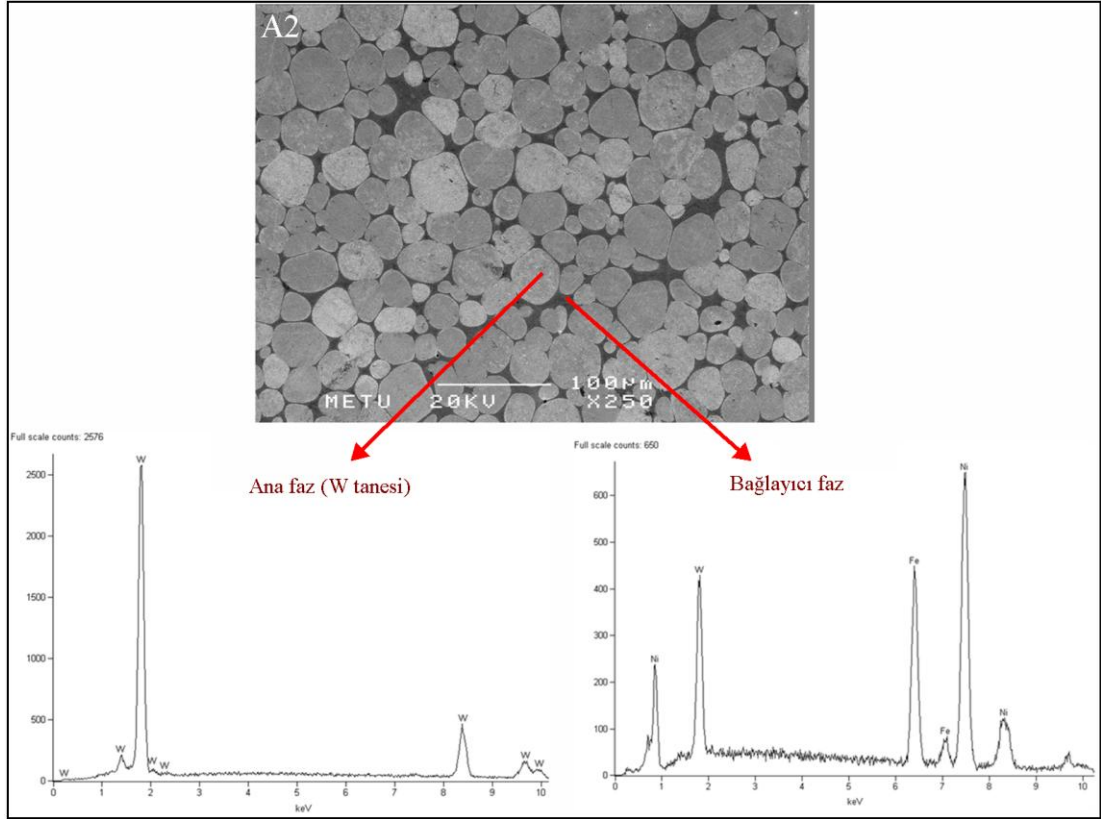
Şekil 6.5. 90W-7Ni-3Fe (A1) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.

A1 numunesine ait EDS analizi sonuçlarına göre, matris fazın %100 tungsten olduğu belirlenmiştir. A1 için yapılan bağlayıcı faz EDS analizi sonuçları Çizelge 6.1’de verilmiştir. Bağlayıcı fazın % 28.22 oranında ana faz olarak kullanılan tungsten erittiği belirlenmiştir.

Çizelge 6.1. A1 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Fe	21.14	27.14
Ni	50.64	61.85
W	28.22	11.01

A2 numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 6.6’da verilmiştir.



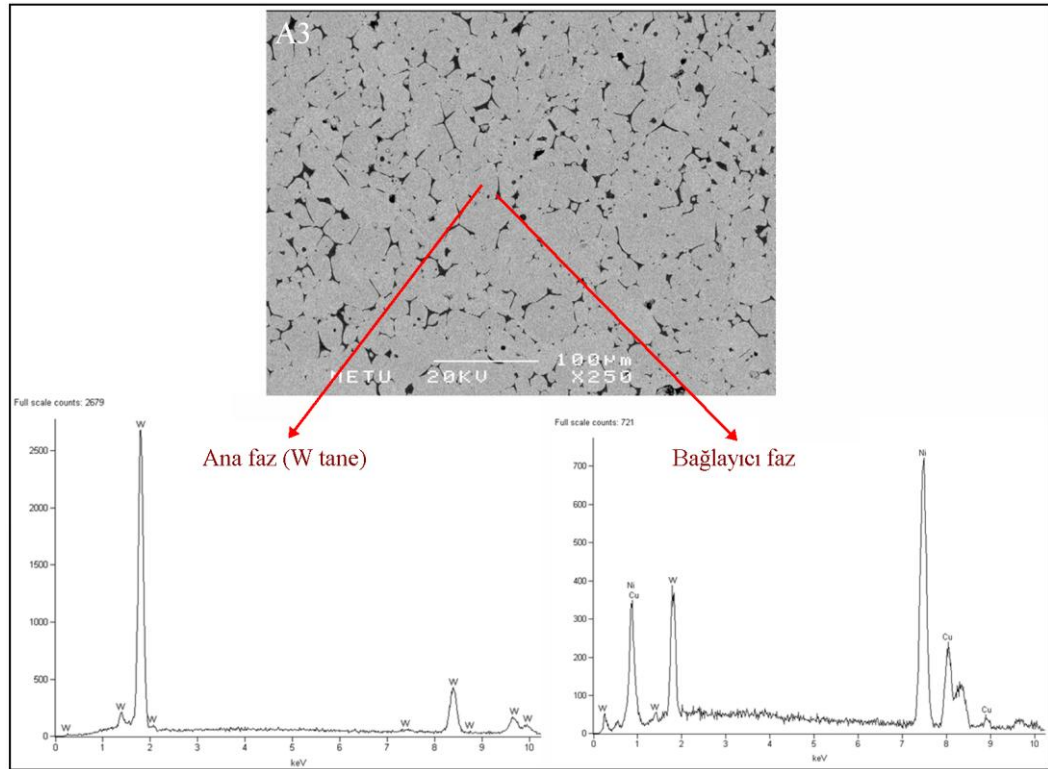
Şekil 6.6. 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.

A2 için yapılan bağlayıcı faz EDS analizinde tespit edilen element yüzdeleri Çizelge 6.2’de verilmiştir. Bağlayıcı fazın % 25.23 oranında ana faz olarak kullanılan tungsten eritebildiği belirlenmiştir.

Çizelge 6.2. A2 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Fe	22.31	27.93
Ni	52.46	62.48
W	25.23	9.59

A3 numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 6.7’de verilmiştir.



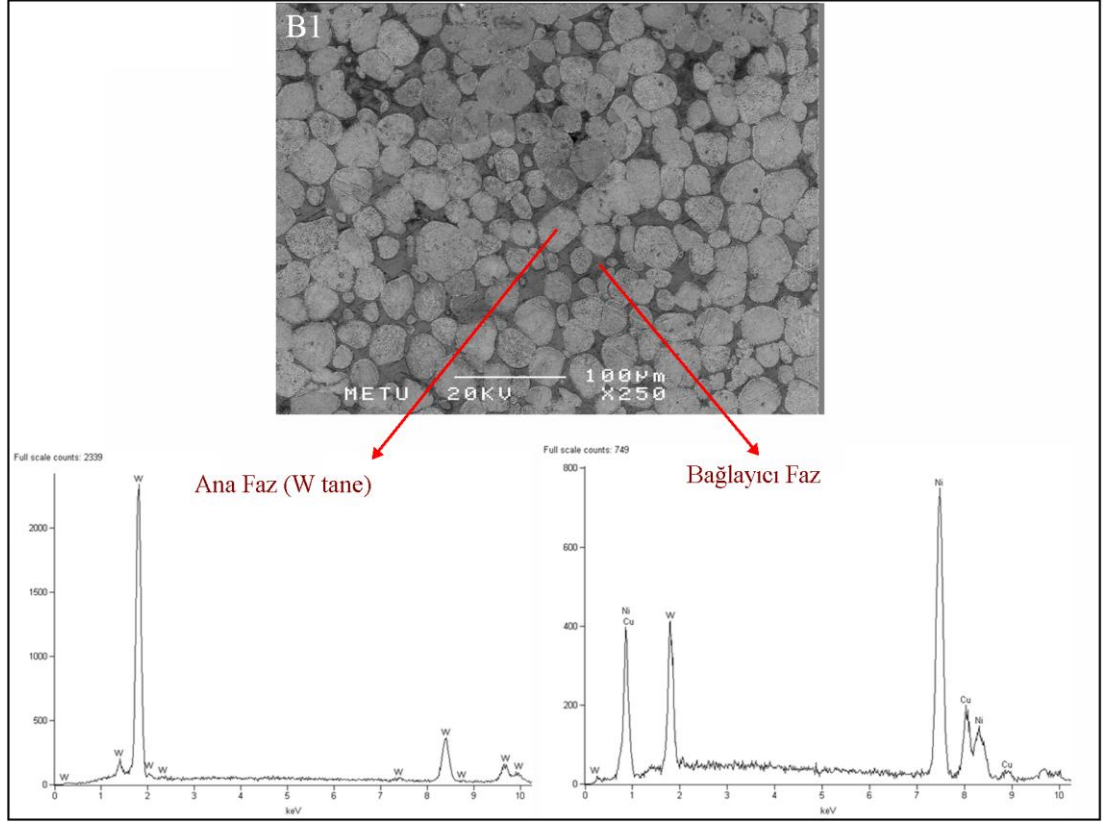
Şekil 6.7. 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.

A3 için yapılan bağlayıcı faz EDS analizinde tespit edilen element yüzdeleri Çizelge 6.3’de verilmiştir. Bağlayıcı fazın % 27.87 oranında ana faz olarak kullanılan tungsten eritebildiği anlaşılmaktadır.

Çizelge 6.3. A3 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Fe	19.59	25.10
Ni	52.54	64.05
W	27.23	10.85

B1 numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 6.8’de verilmiştir.



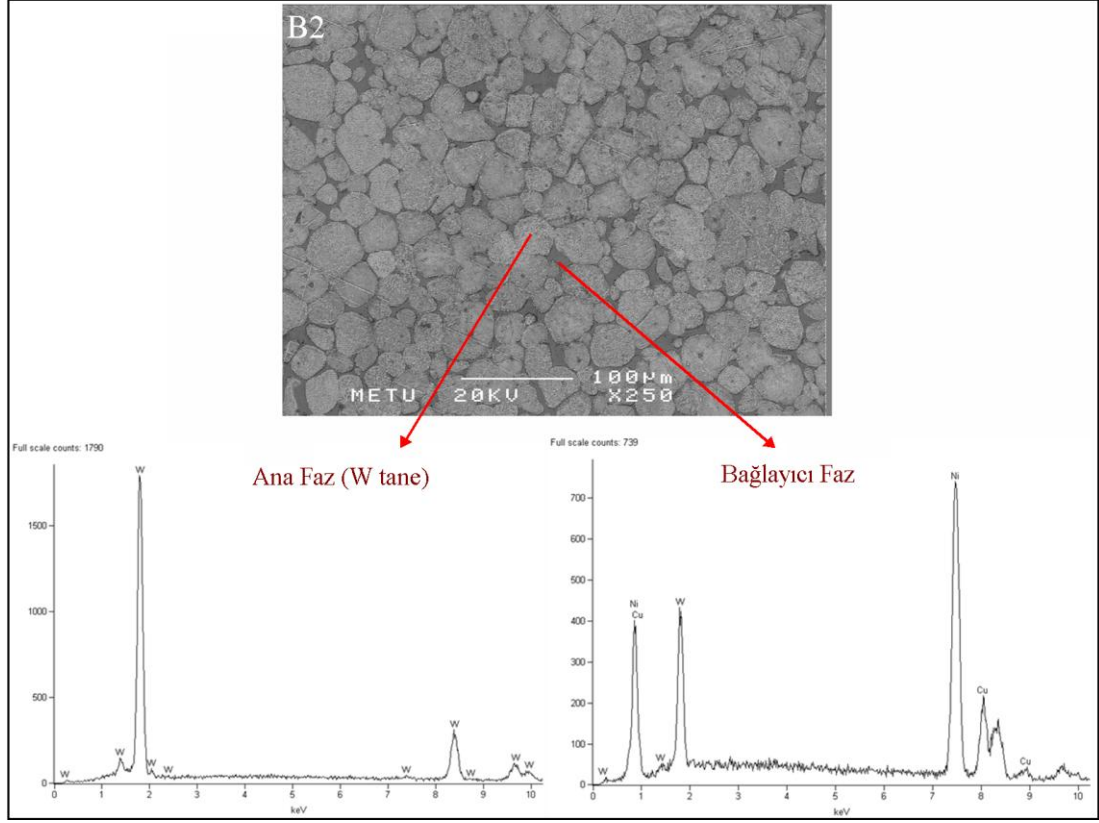
Şekil 6.8. 90W-7Ni-3Cu (B1) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.

B1 numunesine ait EDS analizi sonuçlarına göre, matris fazın %100 tungsten olduğu belirlenmiştir. B1 için yapılan bağlayıcı faz EDS analizi sonuçları Çizelge 6.4’te verilmiştir. Bağlayıcı fazın % 26.20 oranında ana faz olarak kullanılan tungsten erittiği belirlenmiştir.

Çizelge 6.4. B1 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Ni	57.18	70.68
Cu	16.62	18.98
W	26.20	10.34

B2 numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 6.9’da verilmiştir.



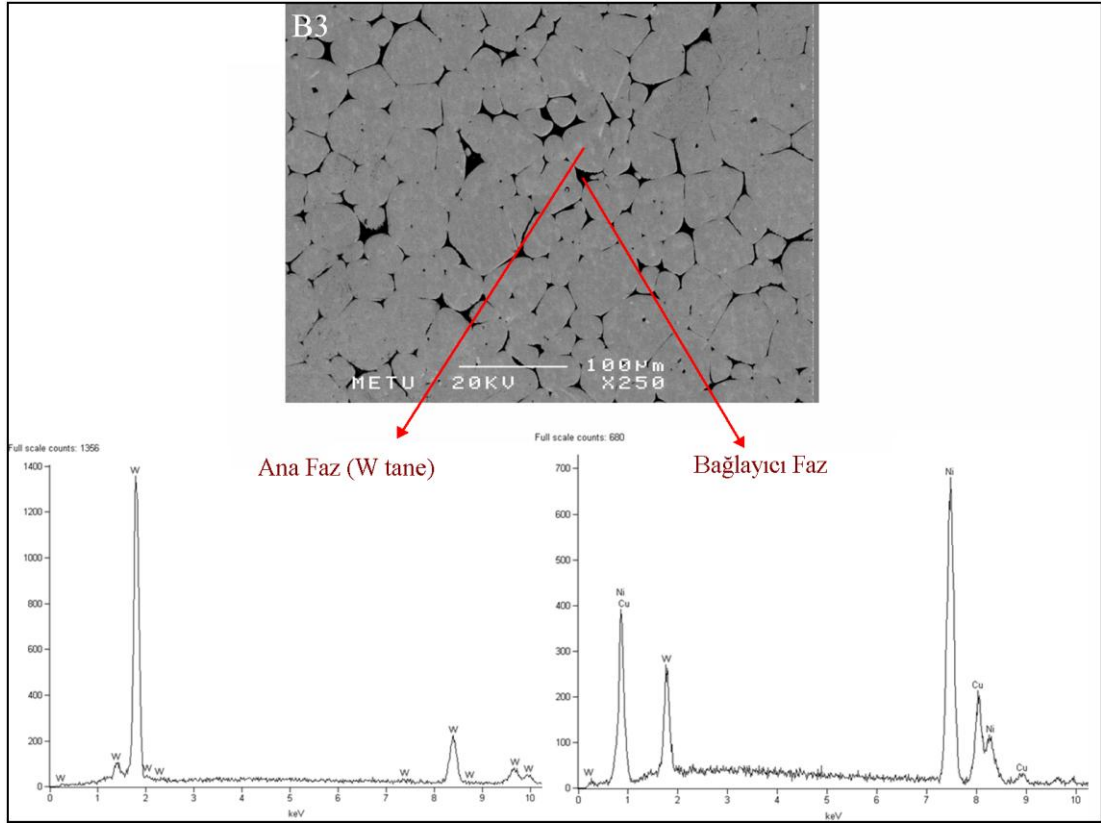
Şekil 6.9. 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.

B2 numunesine ait EDS analizi sonuçlarına göre, matris fazın %100 tungsten olduğu belirlenmiştir. B2 için yapılan bağlayıcı faz EDS analizi sonuçları Çizelge 6.5’te verilmiştir. Bağlayıcı fazın % 28.79 oranında ana faz olarak kullanılan tungsten erittiği belirlenmiştir.

Çizelge 6.5. B2 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Ni	54.69	69.10
Cu	16.52	19.28
W	28.79	11.62

B3 numunesi SEM görüntüsü ve EDS analizi sonuçları Şekil 6.10’da verilmiştir.



Şekil 6.10. 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) bileşimli numuneye ait SEM görüntüsü, ana faz ve bağlayıcı faz EDS analizleri.

B3 numunesine ait EDS analizi sonuçlarına göre, matris fazın %100 tungsten olduğu belirlenmiştir. B3 için yapılan bağlayıcı faz EDS analizi sonuçları Çizelge 6.6’da verilmiştir. Bağlayıcı fazın % 12.04 oranında ana faz olarak kullanılan tungsten erittiği belirlenmiştir. B3 numunesine ait yoğunluk ve sertlik değerlerinin standart değerlerin altında olması Çizelge 6.6’da görüldüğü gibi bağlayıcı fazın tungsten eritebilirliğinin düşük olmuş olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir.

Çizelge 6.6. B3 bağlayıcı faz yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Ni	66.96	74.23
Cu	21.00	21.51
W	12.04	4.26

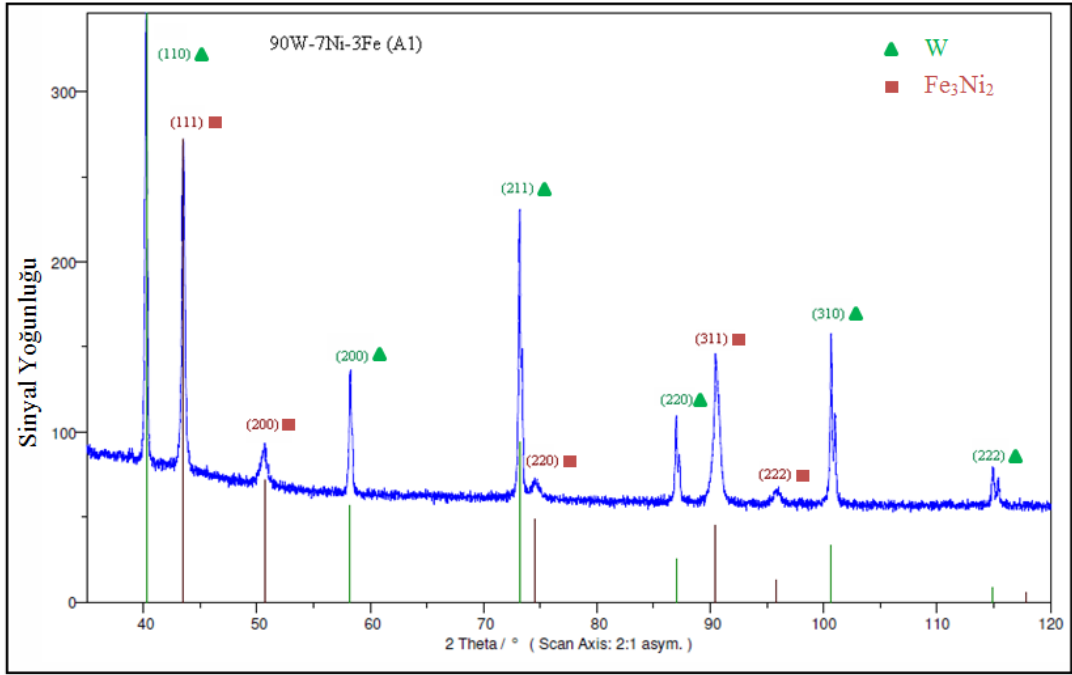
6.3.2. Tane Boyutu Ölçümlerinin Değerlendirilmesi

Bölüm 5.11’de anlatılan “Jeffries” metoduna göre Eşitlik 6.1 ve Eşitlik 6.2 kullanılarak yapılan hesaplamalarda A1, A2, B1 ve B2 kodlu numunelerin ortalama tanecik boyutları 26.7 μm olarak belirlenmiştir. Avijit Mondal ve arkadaşları 90W–7Ni–3Fe bileşimli numuneler üzerine yaptıkları çalışmada tane boyutunu 26 μm olarak belirlemişlerdir [22]. Bu sonuç aynı bileşime sahip A1 numunesi için belirlenen 26.7 μm değeriyle örtüşmektedir. A3 kodlu numunenin ortalama tanecik boyutu 22.5 μm , B3 kodlu numune 31.8 μm olarak belirlenmiştir. A3 için bağlayıcı faz miktarının azalmasıyla birlikte tanecik boyutunda küçülme meydana gelirken, B3’te bağlayıcı fazın azalmasıyla tanecik boyutunda büyüme meydana geldiği belirlenmiştir. B3 numunesinin, setlik değerinin B2’ye göre düşük olmasının nedeninin, meydana gelen tane irileşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. B3 numunesine 1430 °C’de uygulanan sinterleme sonrası, istenen yoğunluk ve sertlik değerlerine ulaşamaması nedeniyle, sinter sıcaklığı 1480 °C’ye artırılarak tekrar numune üretimi yapılmıştır. Bu üretimden elde edilen numunelerin yoğunluklarında bir miktar iyileşme tespit edilsede sertlikte istenilen değere ulaşamamıştır. Belhadjhamida ve German, TAA’da tungsten tane boyutunun ve dağılımının, sinterleme süresi ve sıcaklığından etkilendiğini belirlemişlerdir [23].

Sinterlenmiş numuneler için bulunan ortalama tanecik boyutları, Çizelge 4.2’de verilen ve ortalama 4.5 μm olan saf tungsten tozlarıyla karşılaştırıldığında sinterlemede tanecikler arası difüzyon meydana geldiği ve bu nedenle tanelerde irileşmenin olduğu anlaşılmaktadır.

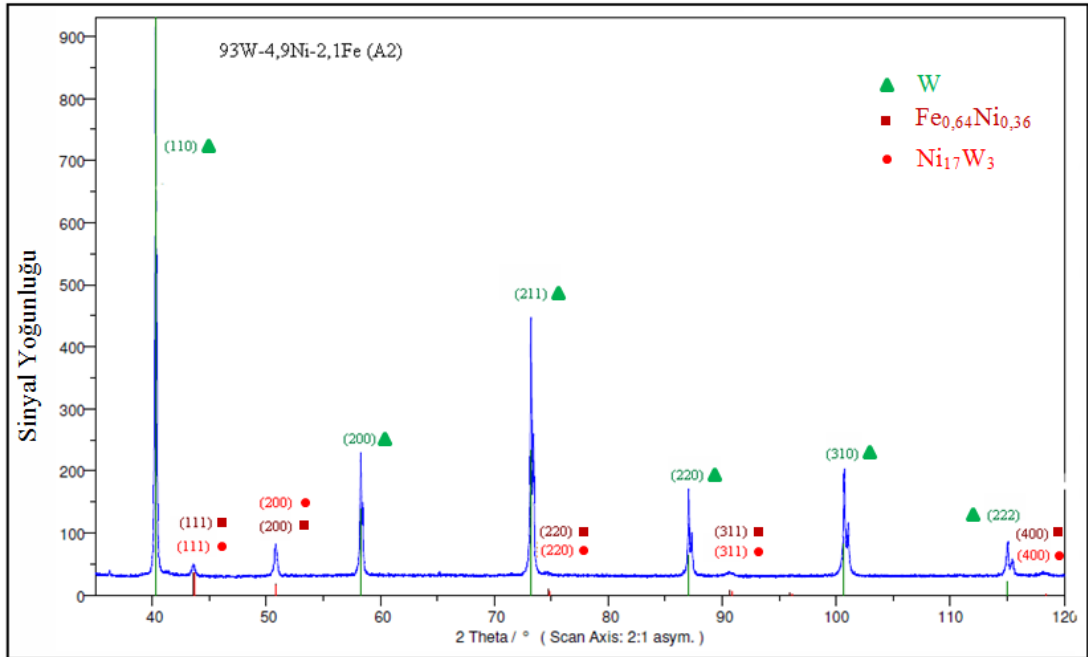
6.3.3. XRD Analizi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Sıvı faz sinterlemeyle üretilen 6 farklı kimyasal bileşime sahip deney numunelerinde, oluşan fazların ve kırınım düzlemlerinin belirlenmesi için XRD analizleri yapılmıştır. XRD analizi sonuçlarına göre, 90W-7Ni-3Fe (A1) numunesine ait sonuçlar Şekil 6.11’de verilmiştir.



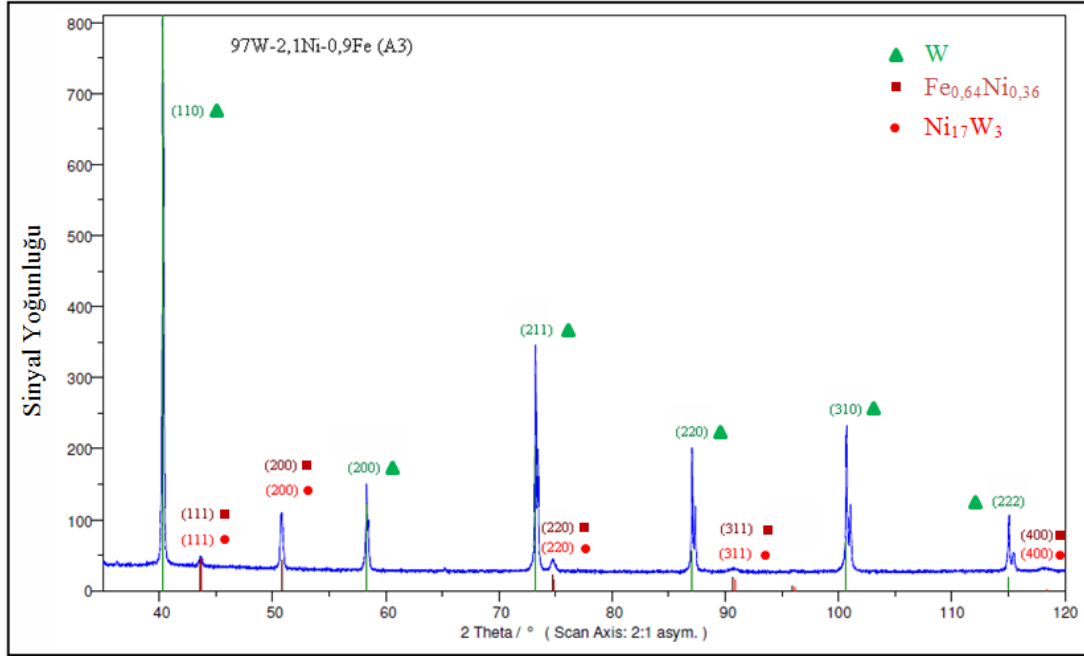
Şekil 6.11. 90W-7Ni-3Fe (A1) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.

A1 numunesine ait XRD analizi sonuçlarına göre, kırınım açısı (2θ) 40° , 58° , 73° , 101° ve 115° bulunan piklerde W fazı, 44° , 51° , 75° ve 90° piklerinde ise Fe₃Ni₂ fazı belirlenmiştir.



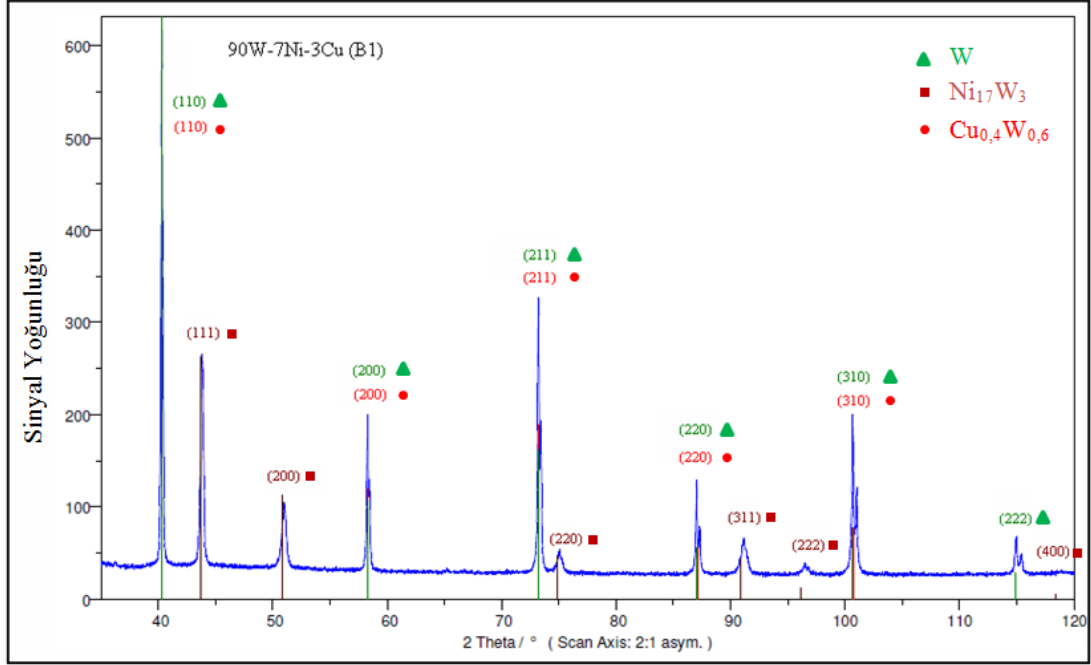
Şekil 6.12. 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.

93W-4,9Ni-2,1Fe (A2) kimyasal bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu Şekil 6.12’de verilmiştir. A2 numunesi XRD analiz sonucuna göre, kırınım açısı (2θ) 40°, 58°, 73°, 87°, 101° ve 115° piklerinde W fazı, 44°, 51°, 75°, 92° ve 118° piklerinde ise Fe_{0,64}Ni_{0,36} ve Ni₁₇W₃ fazları belirlenmiştir. 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3) kimyasal bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu Şekil 6.13’de verilmiştir.



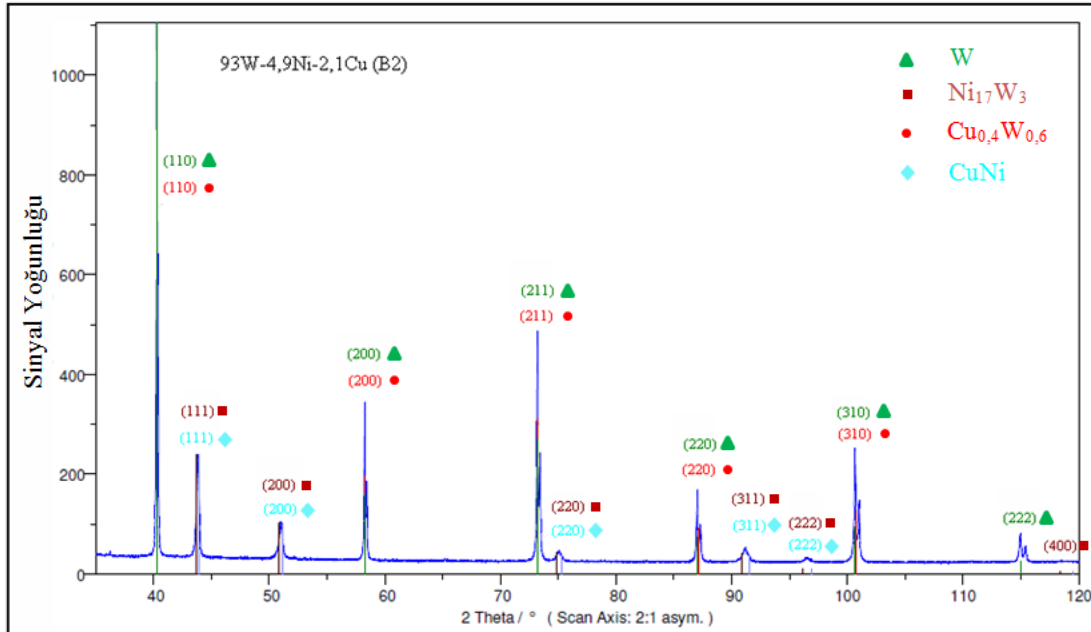
Şekil 6.13. 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.

A3 numunesi XRD analiz sonucuna göre, kırınım açısı (2θ) 40°, 58°, 73°, 87°, 101° ve 115° piklerinde W fazı, 44°, 51°, 75°, 92° ve 118° piklerinde ise Fe_{0,64}Ni_{0,36} ve Ni₁₇W₃ fazları belirlenmiştir. A2 ve A3 numuneleri XRD analizlerinde aynı sonuçlar elde edilmiştir. 90W-7Ni-3Cu (B1) kimyasal bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu Şekil 6.14’de verilmiştir.



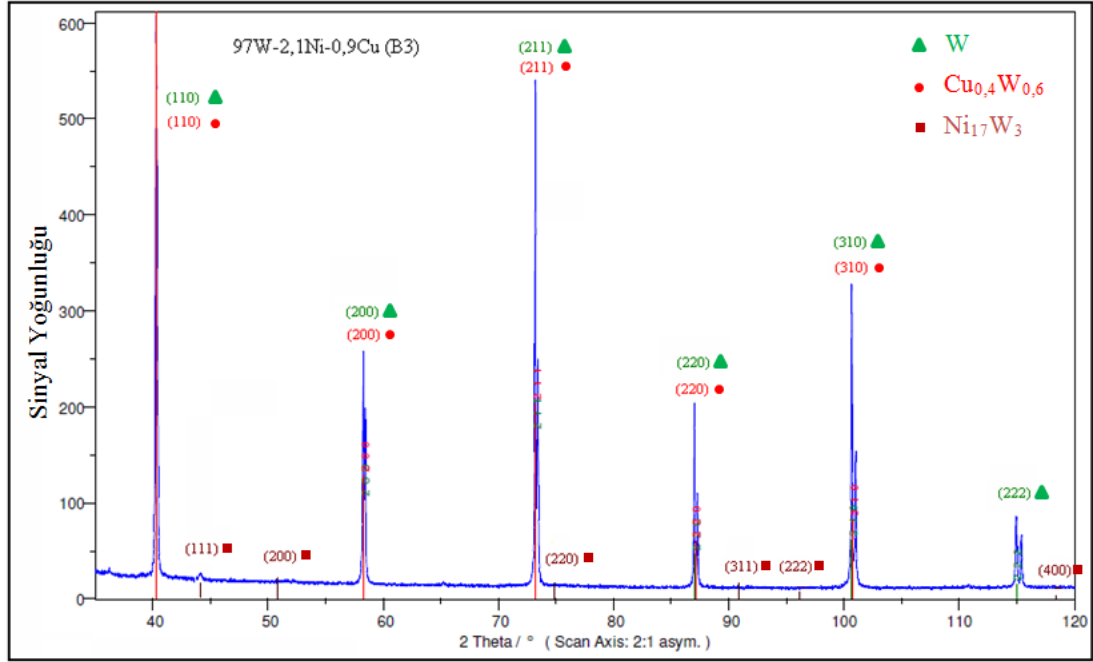
Şekil 6.14. 90W-7Ni-3Cu (B1) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.

B1 numunesi XRD analiz sonucuna göre, kırınım açısı (2θ) 41° , 58° , 73° , 87° ve 101° piklerinde W ve $\text{Cu}_{0,4}\text{W}_{0,6}$ fazları, 115° pikinde sadece W ve 44° , 51° , 75° , 91° , 96° ve 118° piklerinde ise Ni_{17}W_3 fazı belirlenmiştir. 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2) kimyasal bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu Şekil 6.15’de verilmiştir.



Şekil 6.15. 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.

B2 numunesi XRD analiz sonucuna göre, kırınım açısı (2θ) 41° , 58° , 73° ve 101° piklerinde W ve $\text{Cu}_{0,4}\text{W}_{0,6}$ fazları, 115° pikinde sadece W ve 44° , 51° , 75° , 91° ve 96° piklerinde ise Ni_{17}W_3 ve CuNi fazları belirlenmiştir. B2 numunesi B1'den farklı olarak CuNi fazı oluşturduğu görülmektedir. 93W-2,1Ni-0,9Cu (B3) kimyasal bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu Şekil 6.16'da verilmiştir.



Şekil 6.16. 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) bileşimli numuneye ait XRD analizi sonucu.

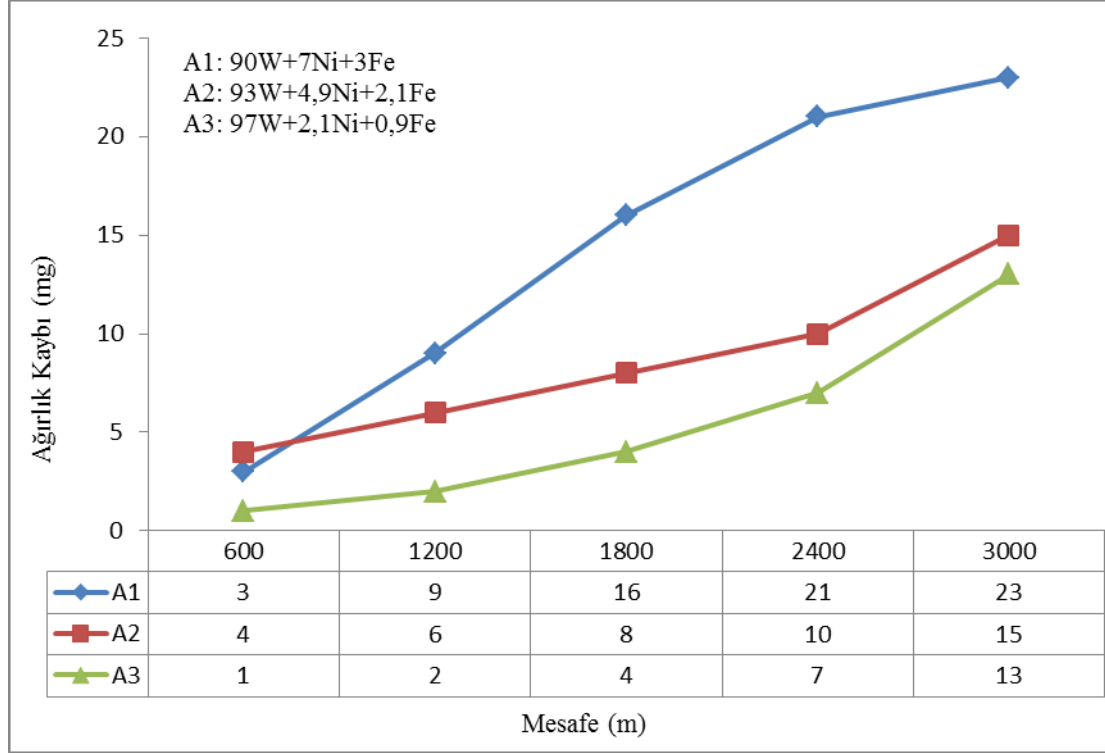
B3 numunesi XRD analiz sonucuna göre, kırınım açısı (2θ) 41° , 58° , 73° , 87° ve 101° piklerinde W ve $\text{Cu}_{0,4}\text{W}_{0,6}$ fazları, 115° pikinde sadece W ve 44° , 51° , 75° , 91° , 96° ve 118° piklerinde ise Ni_{17}W_3 fazı belirlenmiştir. Numunede belirlenen Ni_{17}W_3 fazı, B1 ve B2 numunesine oranla çok küçük piklerde belirlenmiştir. B3 numunesinin yoğunluğunun ve özellikle sertliğinin düşük olmasının, bu zayıf Ni_{17}W_3 fazından kaynaklandığı düşünülmektedir.

6.4. AŞINMA TESTİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Sıvı faz sinterlemeyle üretilen deney numuneleri kullanılarak yapılan aşınma testleri 20 N yük uygulanarak her bir numune için 600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m olmak üzere 5 farklı kayma mesafesinde gerçekleştirilmiştir.

6.4.1. Aşınma Testi Sonuçları

Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan numunelerin (A1-A2-A3) mesafeye göre ağırlık kayıpları Şekil 6.17’de verilmiştir.



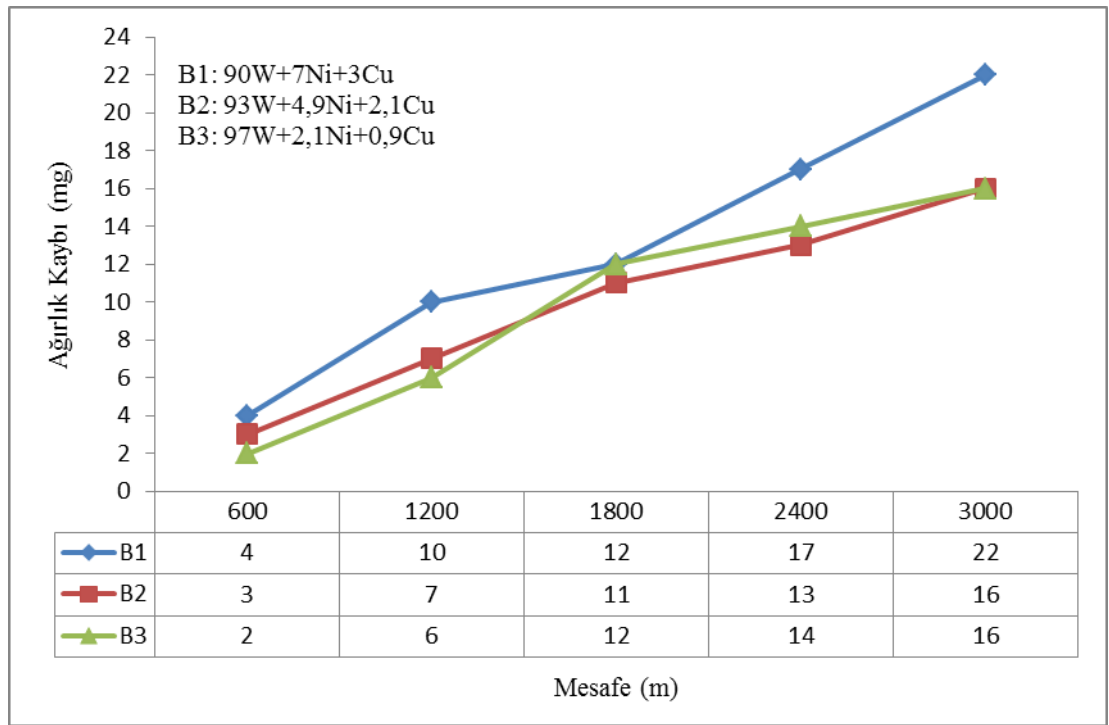
Şekil 6.17. 20N yük uygulanmış A1-A2-A3 kodlu numunelerde aşınma testi sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları.

Numunelerdeki ağırlık kayıplarına bakıldığında (Şekil 6.17), 600 m kayma mesafesinde en fazla ağırlık kaybı A2 numunesinde meydana gelmiştir. 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde ise en fazla aşınma A1, A2 ve A3 şeklinde sıralanmaktadır. 600 m’de A2’deki ağırlık kaybının fazla olması, numune yüzeyinden tabaka şeklindeki bir kopmadan veya A1 aşınma tozlarının adhezyonla numune üzerinde kalmış olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ağırlık kaybı sonuçları, numunelerde tungsten oranı arttıkça aşınma direncinin arttığını ve ağırlık kaybının azaldığını göstermektedir.

Ağırlık kaybı sonuçları (Şekil 6.17), numunelerin yoğunluk ve sertlik (Şekil 6.1 ve Şekil 6.2) ölçümleriyle karşılaştırıldığında, yoğunluk ve sertlik arttıkça ağırlık

kaybının azaldığı görülmektedir. Ağırlık kaybı sonuçları numunelerin mikroyapılarıyla (Şekil 6.5-6-7) değerlendirildiğinde ötektik fazın fazla olduğu A1 numunesinin en fazla ağırlık kaybına uğradığı görülmektedir. Başka bir ifadeyle, ötektik faz arttığında aşınma direncinin düştüğünü ve ağırlık kaybının arttığı söylenebilir.

Bağlayıcı faz olarak Ni-Cu kullanılan numunelerin (B1-B2-B3) mesafeye göre ağırlık kayıpları Şekil 6.18’de verilmiştir.

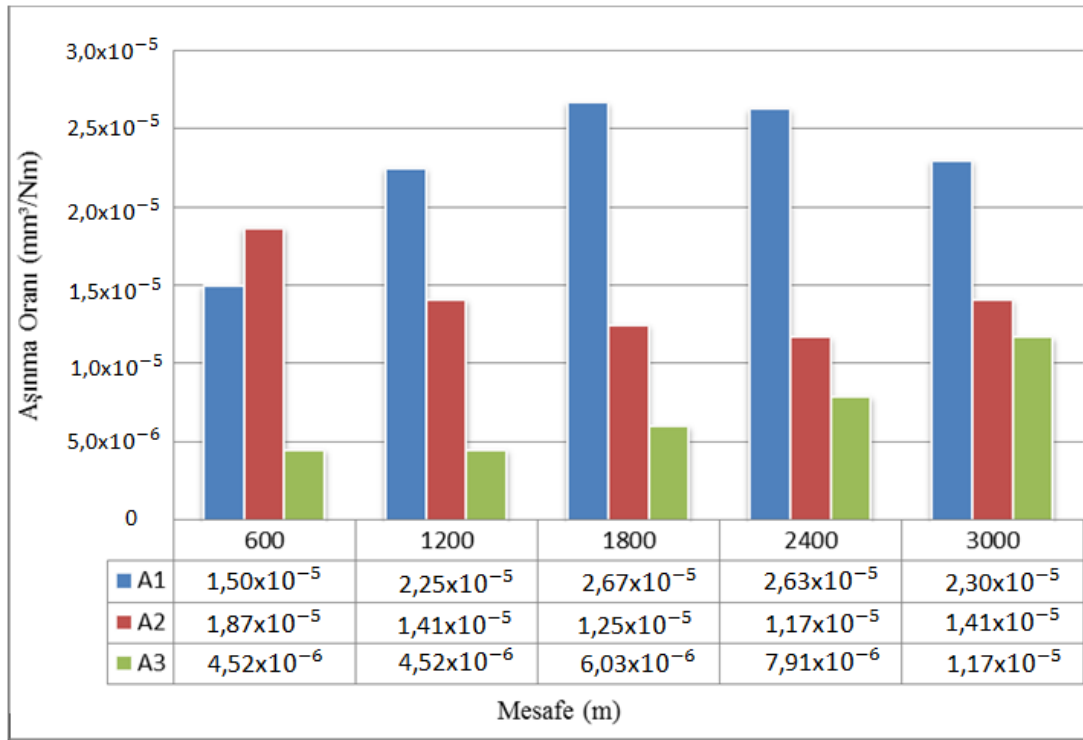


Şekil 6.18. 20N yük uygulanmış B1-B2-B3 kodlu numunelerde aşınma testi sonucu meydana gelen ağırlık kayıpları.

Bağlayıcı faz Ni-Cu olan numunelerin ağırlık kaybı sonuçlarına (Şekil 6.18) göre, 600 ve 1200 m kayma mesafelerinde en fazla ağırlık kaybı B1, B2 ve B3 şeklinde sıralanmaktadır. 1800 ve 2400 m kayma mesafelerinde ise B2 numunesi B3’ten daha fazla ağırlık kaybına uğrayarak bu düzğün sıralamayı bozmaktadır. B3 numunesi 3000 m kayma mesafesinde B2 ile aynı miktarda (16 mg) ağırlık kaybına uğramıştır. Bu duruma, B3 numunesinin sertlik değerinin B2’den daha az olmasının sebep olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, B3 numunesi için yapılan EDS analizinde (Çizelge 6.6), aynı bileşim oranına sahip olduğu A3 numunesine oranla, bağlayıcı

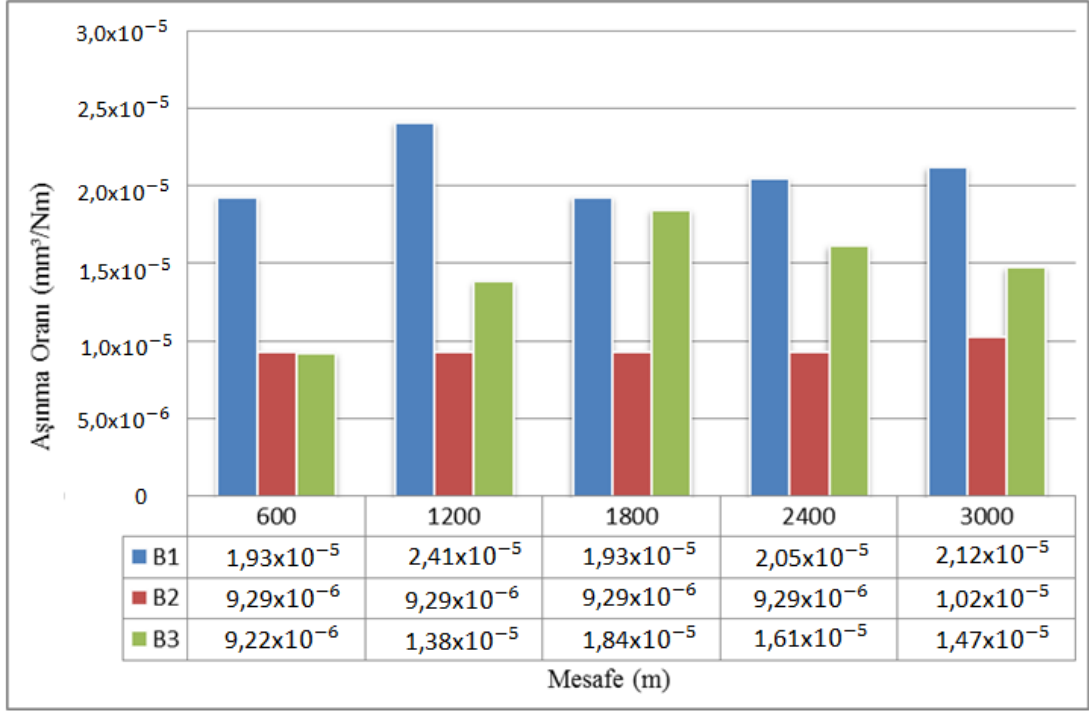
fazın tungsten eritebilirliğinin düşük olmasının sebep olduğu da düşünülmektedir. Bu durumda, ötektik faz içerisinde ergiyen matris faz miktarının aşınma direncini değiştirdiğini söylenebilir.

Aşınma testine tabi tutulan numunelere ait aşınma oranları (mm^3/Nm) Bölüm 5.8.3.'te verilen formül kullanılarak hesaplanmıştır. Hesaplamaların sonuçları bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan numuneler (A1-A2-A3) için Şekil 6.19'da, Ni-Cu kullanılan numuneler (B1-B2-B3) için Şekil 6.20'de verilmiştir.



Şekil 6.19. 20N yük uygulanmış A1-A2-A3 kodlu numunelerin aşınma oranları.

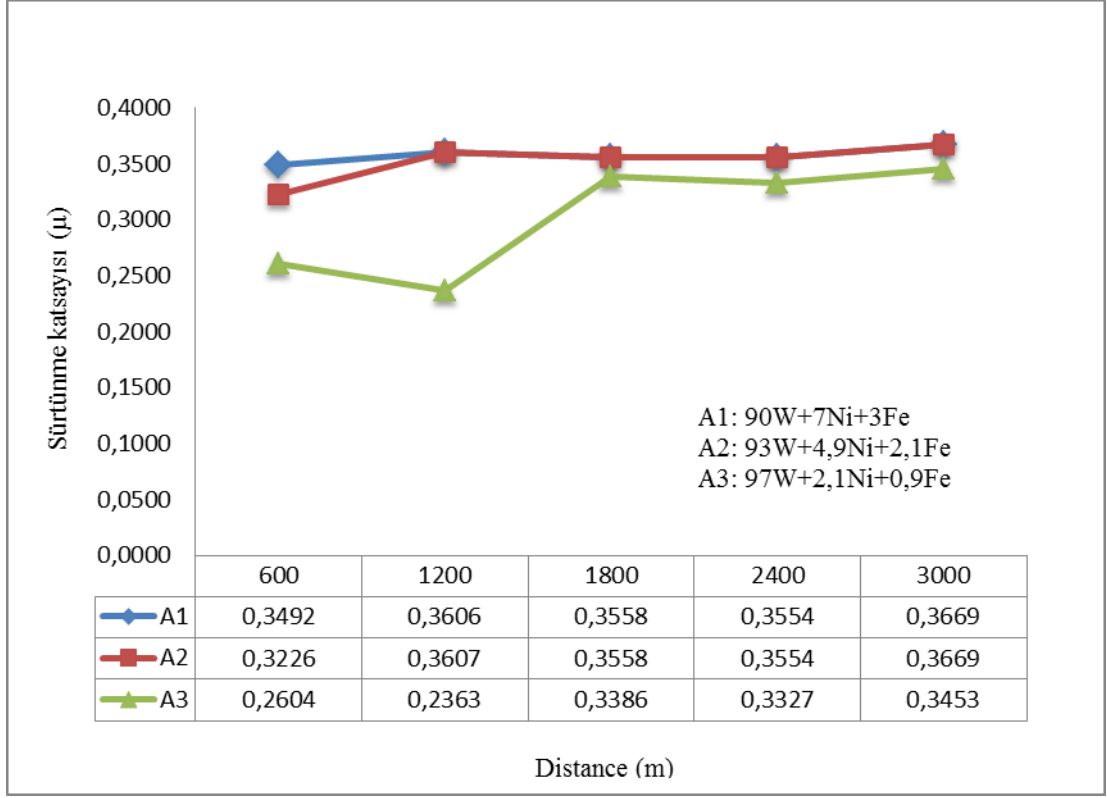
Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan numunelerin aşınma oranı sonuçlarına (Şekil 6.19) bakıldığında, 600 m kayma mesafesinde A2 numunesinin en yüksek aşınma oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, 600 m kayma mesafesinde en yüksek ağırlık kaybının A2 numunesinde görülmesini de desteklemektedir. 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde en yüksek aşınma oranı A1, A2 ve A3 şeklinde sıralanmaktadır. Bu duruma göre, artan matris fazla birlikte artan yoğunluk ve sertliğin aşınma oranını azalttığı görülmektedir.



Şekil 6.20. 20N yük uygulanmış B1-B2-B3 kodlu numunelerin aşınma oranları.

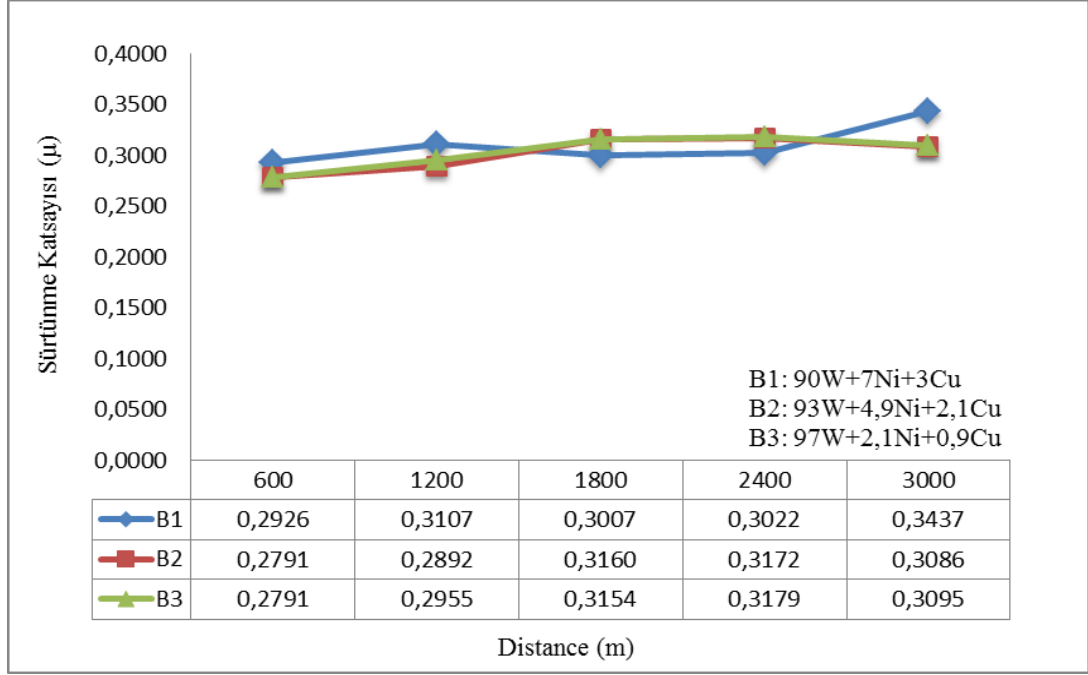
Bağlayıcı faz olarak Ni-Cu kullanılan numunelerin aşınma oranı sonuçlarına (Şekil 6.20) bakıldığında, 600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde B1 düzensiz olarak ve en fazla oranda aşınma oranına sahip numune olduğu belirlenmiştir. B2 numunesi beş farklı kayma mesafesinde de kararlı bir aşınma oranına sahipken, B3 numunesinde beklenenin aksine B2'den daha yüksek ve düzensiz bir aşınma oranı görülmektedir. Bu durumun, B3'ün sertliğinin B2'den daha düşük olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Ayrıca, B3 numunesi için yapılan EDS analizinde bağlayıcı fazın tungsten eritebilirliğinin düşük olmasının ve B3 numunesinde tane irileşmesinin diğer numunelerden fazla olmasının aşınma oranını olumsuz etkilediği anlaşılmaktadır. En az aşınmanın, tane boyutu en düşük olan A3 numunesinde gerçekleşmesi, bu anlayışı desteklemektedir.

Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan numunelerin (A1-A2-A3) sürtünme katsayıları Şekil 6.21'de, Ni-Cu kullanılan numunelerin (B1-B2-B3) Şekil 6.22'de verilmiştir.



Şekil 6.21. A1-A2-A3 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı sonuçları.

Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarına (Şekil 6.21) göre, 600 m kayma mesafesinde, sürtünme katsayısı artışı A3, A2 ve A1 şeklinde sıralanmaktadır. 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde ise, A1 ve A2'nin sürtünme katsayıları neredeyse birbirine eşitken, en az ağırlık tespit edilen A3'te azalma görülmektedir. 600 m kayma mesafesinde elde edilen sürtünme katsayısı sonuçları aynı kayma mesafesinde ağırlık kaybı ve aşınma oranlarıyla karşılaştırıldığında, A2'nin sürtünme katsayısının A1'den yüksek olması beklenirken A1>A2 sonucu elde edilmiştir. Bu durum, 600 m kayma mesafesinde A2'nin A1'den daha fazla ağırlık kaybına uğramasına ve aşınma oranının daha yüksek çıkmasının nedeninin, A1'de aşınmış tozların yapışma ile numuneye birleşmiş olması düşüncesini desteklemektedir.

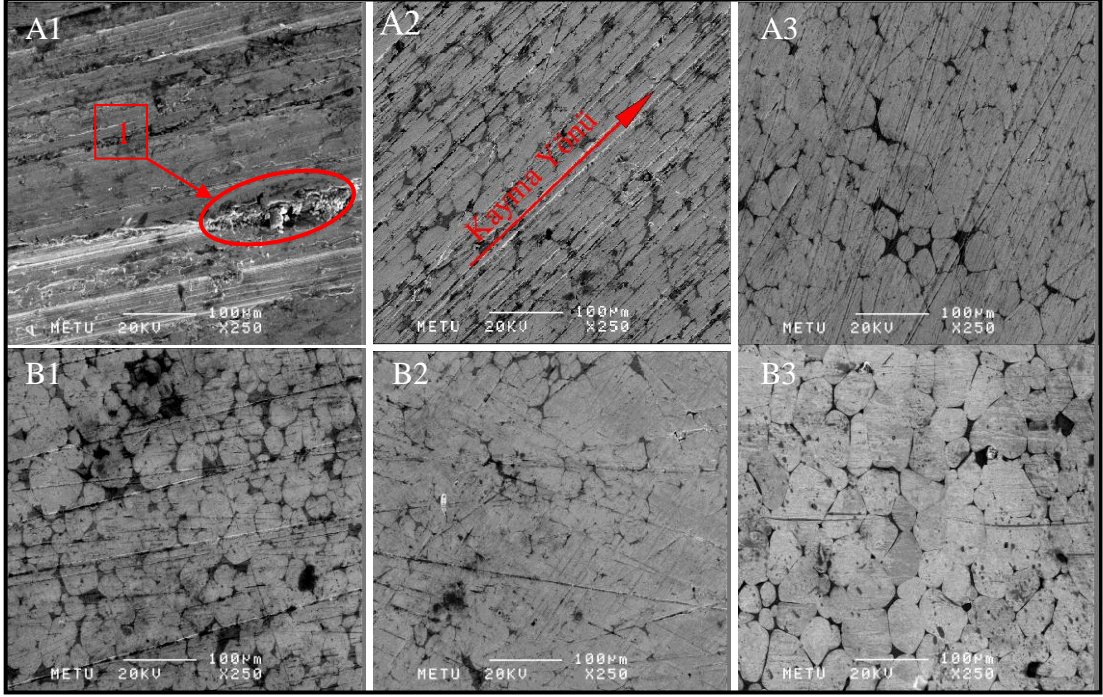


Şekil 6.22. B1-B2-B3 kodlu numunelerin sürtünme katsayısı sonuçları.

Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan numunelerin sürtünme katsayısı sonuçlarına (Şekil 6.22) göre, 600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde elde sürtünme katsayısı değerleri $B1 > B2 \approx B3$ şeklinde sıralanmaktadır. Bu durumun, numunelerin ağırlık kayıplarıyla karşılaştırıldığında, elde edilen sürtünme katsayısı değerleri ağırlık kayıplarını desteklemektedir.

6.4.2. Aşınma Yüzeylerinin İncelenmesi

Aşındırılmış numunelerin aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 6.23’de verilmiştir. İçerisinde 90W-7Ni-3Fe bulunan (A1) aşınma yüzeyi SEM görüntüsünde kayma yönü oldukça belirginleşmiş ve 1 nolu bölgede kısmi dökülmeler veya yapışmanın (adhezyon) olduğu görülmektedir. 93W-4,9Ni-2,1Fe bileşimli (A2) numunede de kayma yönü ve aşınma çizgileri oldukça belirginleşmiştir. 97W-2,1Ni-0,9Fe bileşimli (A3) numunede ise, aşınma izleri belirginleşmemiş aşınma numunede parlatma etkisi göstermiş ve neredeyse içyapı belirginleşmeye başlamıştır. Numunelere ait elde edilen ağırlık kayıplarına (Şekil 6.17) bakıldığında, en fazla ağırlık kaybının A1, A2 ve A3 şeklinde sıralanmasını aşınma yüzeyi SEM görüntüleri de desteklemektedir.

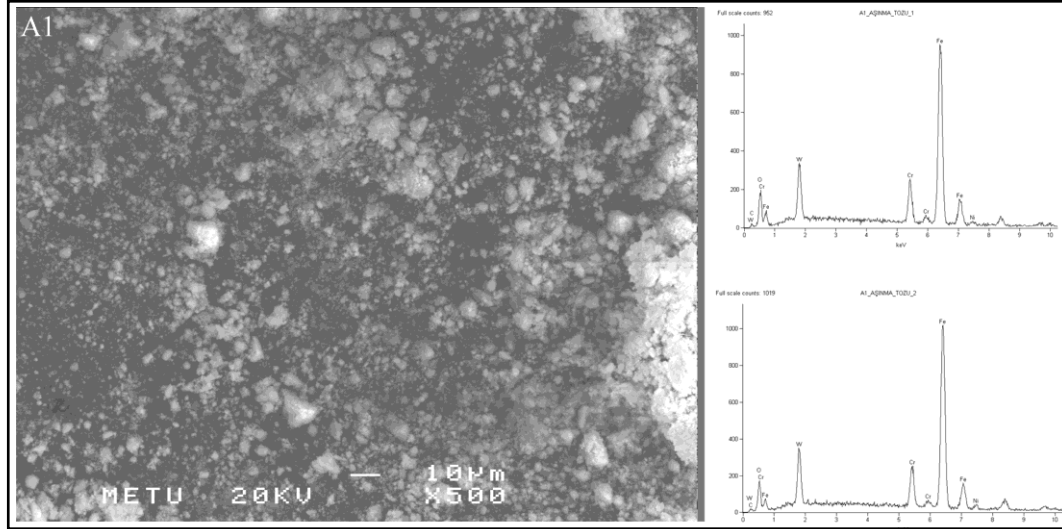


Şekil 6.23. 90W-7Ni-3Fe (A1), 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2), 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3), 90W-7Ni-3Cu (B1), 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2), 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) kompozisyonlu numunelerin aşınma yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri.

İçerisinde 90W-7Ni-3Cu bulunan (B1) aşınma yüzeyi SEM görüntüsünde aşınma çizgilerinde kısmen belirginleşme olmuştur. 93W-4,9Ni-2,1Cu bileşimli (B2) numunede kayma yönü belirgin olmayan, az miktarda aşınma çizgisi görülmektedir. 97W-2,1Ni-0,9Cu bileşimli (B3) numunede ise, kayma yönü ve aşınma izleri görülmemekle birlikte, aşınma numunede parlatma etkisi göstermiş ve neredeyse mikroyapıyı belirgin hale getirmiştir. Numunelere ait elde edilen ağırlık kayıplarına (Şekil 6.18) bakıldığında, en fazla ağırlık kaybının $B1 > B2 = B3$ şeklinde sıralanmasını aşınma yüzeyi SEM görüntüleride desteklemektedir.

Aşındırılan herbir numuneden elde edilen aşınma tozlarına ait SEM görüntüleri ve EDS analizleri çalışması da yapılmıştır. Herbir numuneye ait aşınma tozu için iki farklı bölgede EDS analizi yapılmıştır. Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan numunelerden A1'den elde edilen aşınma tozlarına ait SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 6.24 ve aşınma tozlarının element yüzdeleri Çizelge 6.7'de, A2'den elde edilen aşınma tozlarına ait SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 6.25 ve aşınma tozlarının element yüzdeleri Çizelge 6.8'de ve A3'den elde edilen aşınma

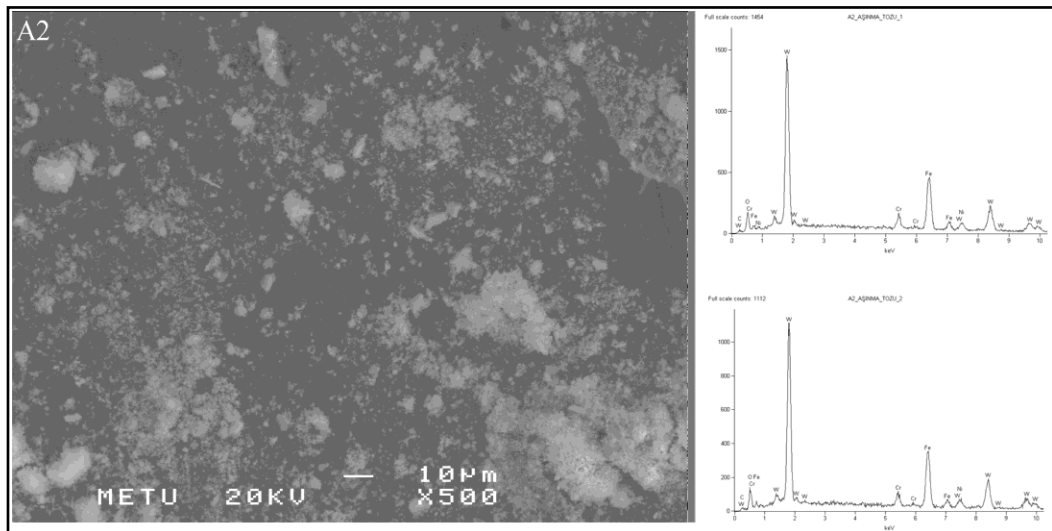
tozlarına ait SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 6.26 ve aşınma tozlarının element yüzdeleri Çizelge 6.9’da verilmiştir.



Şekil 6.24. 90W-7Ni-3Fe (A1) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 6.7. A1 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.

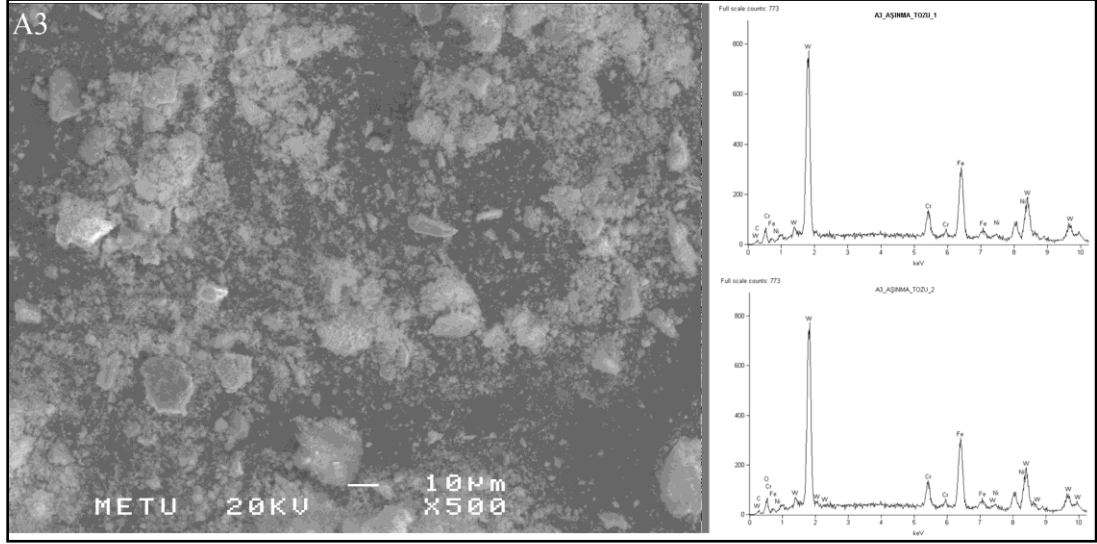
Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Cr	10.56	12.63
Fe	71.96	80.13
Ni	1.83	1.94
W	15.64	5.29



Şekil 6.25. 93W-4,9Ni-2,1Fe (A2) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 6.8. A2 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Cr	4.51	8.85
Fe	25.98	47.45
Ni	4.35	7.56
W	65.16	36.14

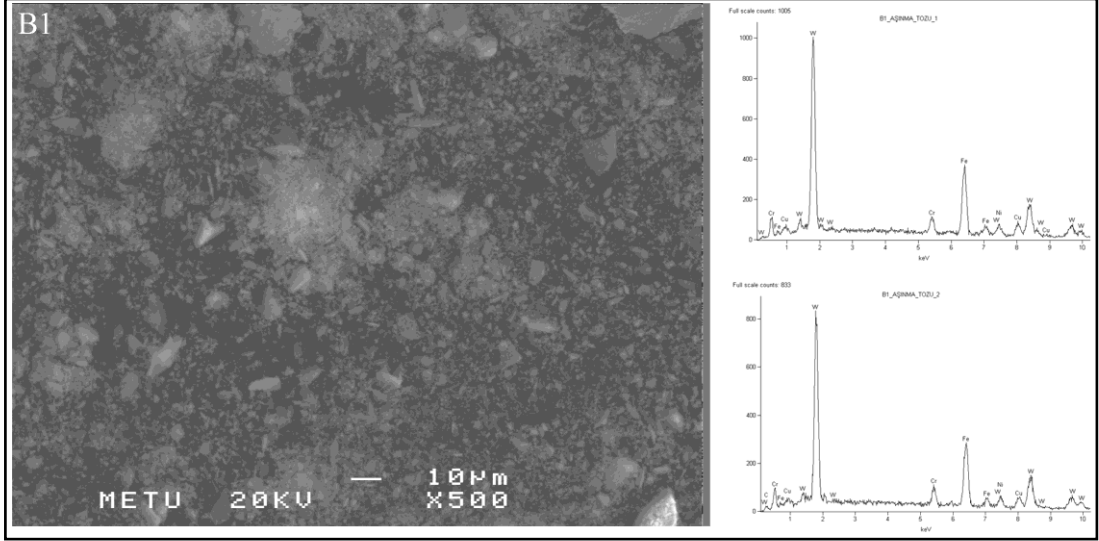


Şekil 6.26. 97W-2,1Ni-0,9Fe (A3) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 6.9. A3 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Cr	6.53	13.14
Fe	24.57	46.01
Ni	1.37	2.43
W	67.53	38.41

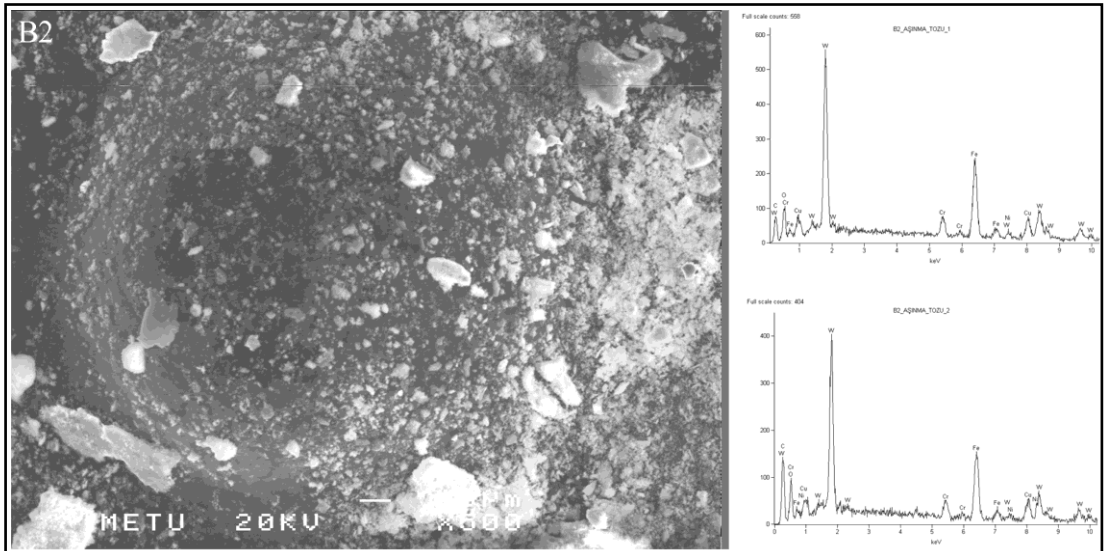
Bağlayıcı faz olarak Ni-Cu kullanılan numunelerden, B1'den elde edilen aşınma tozlarına ait SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 6.27 ve aşınma tozlarının element yüzdeleri Çizelge 6.10'da, B2'den elde edilen aşınma tozlarına ait SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 6.28 ve aşınma tozlarının element yüzdeleri Çizelge 6.11'de ve B3'den elde edilen tozlara ait SEM görüntüsü ve EDS analizleri Şekil 6.29 ve aşınma tozlarının element yüzdeleri Çizelge 6.12'de verilmiştir.



Şekil 6.27. 90W-7Ni-3Cu (B1) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 6.10. B1 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.

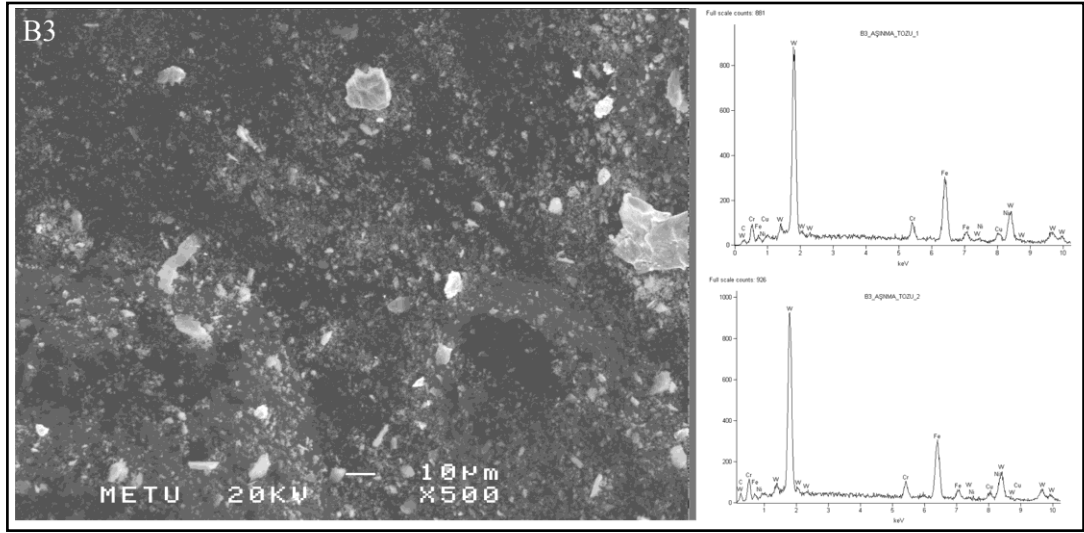
Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Cr	5.02	8.90
Fe	27.10	44.76
Ni	5.02	7.88
Cu	7.28	10.57
W	55.58	27.89



Şekil 6.28. 93W-4,9Ni-2,1Cu (B2) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 6.11. B2 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Cr	7.16	11.02
Fe	35.28	50.57
Ni	3.26	4.45
Cu	12.50	15.75
W	41.80	18.21



Şekil 6.29. 97W-2,1Ni-0,9Cu (B3) aşınma tozları SEM görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 6.12. B3 aşınma tozları yüzde element oranları çizelgesi.

Element	Ağırlık oranı (%)	Atom oranı (%)
Cr	4.29	8.25
Fe	25.62	45.89
Ni	0.90	1.53
Cu	6.49	10.22
W	62.70	34.12

BÖLÜM 7

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. SONUÇLAR

- Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe ve Ni-Cu kullanılan, 90, 93 ve 97 yüzde W oranına sahip numunelerde tungsten oranının artışıyla yoğunlukta artış belirlenmiştir.
- Bağlayıcı faz olarak Ni-Fe kullanılan, 90, 93 ve 97 yüzde W oranına sahip numunelerde tungsten oranının artışıyla sertlik değerinde artış belirlenmiştir. Bağlayıcı faz olarak Ni-Cu kullanılan, 90, 93 ve 97 yüzde W oranına sahip numunelerde tungsten oranının %90'dan %93'e artışında sertlik değeri artarken, %97'ye artışında %93 W oranlı numunelerin altında kaldığı belirlenmiştir.
- 90, 93 ve 97 yüzde tungsten oranlı A1, A2, A3 ve B1, B2, B3 numunelerinde, tungsten miktarının artmasıyla ötektik fazda azalma belirlenmiştir. Matris yapıda tanecikler tungsten oranının artışıyla dairesel yapıdan çok kenarlı bir yapıya değişim göstermiştir.
- Tane boyutu ölçümlerinde, A1, A2, B1 ve B2 kodlu numunelerin ortalama tanecik boyutları 26.7 μ m olarak belirlenmiştir. A3 kodlu numunenin ortalama tanecik boyutu 22.5 μ m, B3 kodlu numune 31.8 μ m olarak belirlenmiştir.

- Ağırlık kaybı sonuçlarına göre, 600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde, W-Ni-Fe bileşimli numunelerde (A1,A2,A3) en fazla ağırlık kaybının, 90 yüzde tungsten oranlı A1 numunesinde, en az ağırlık kaybının ise, 97 yüzde tungsten oranlı A3 numunesinde olduğu belirlenmiştir. W-Ni-Cu bileşimli numunelerde ise (B1-B2-B3), 90 yüzde tungsten oranlı B1 numunesi en fazla ağırlık kaybı görülürken, 93 ve 97 yüzde tungsten oranlı B2 ve B3 numunelerinde eşit miktarda ağırlık kaybı belirlenmiştir. W-Ni-Fe bileşimli numunelerin, W-Ni-Cu bileşimli numunelere göre daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir.
- W-Ni-Fe bileşimli numunelerin 600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde, tungsten oranının artışıyla birlikte aşınma oranının azaldığı belirlenmiştir. W-Ni-Cu bileşimli numunelerde ise, en az aşınma oranının B2 numunesinde olduğu belirlenmiştir.
- W-Ni-Fe bileşimli numunelerin 600, 1200, 1800, 2400 ve 3000 m kayma mesafelerinde, sürtünme katsayısı değerinin en düşük A3 numunesinde ve W-Ni-Cu bileşimli numunelerde ise B2 numunesinde olduğu belirlenmiştir.
- W-Ni-Fe bileşimli numunelerin aşınma yüzeyleri SEM görüntülerinde, aşınma çizgileri ve kayma yönleri özellikle A1 ve A2 numunelerinde oldukça belirginken, W-Ni-Cu bileşimli numunelerde aşınma izleri, ağırlık kaybı miktarının da W-Ni-Fe bileşimli numunelere oranla daha fazla olmasına rağmen belirginleşmemiştir.

7.2. ÖNERİLER

- Sıvı faz sinterleme kullanılarak üretilen numuneler için yoğunlukların teorik yoğunluğa yaklaşmaları için sinter sıcaklıklarının ve sürelerinin artırılarak üretilmeleri denenebilir.

- 97W-2,1Ni-0,9Cu bileşimli numunelerin sertlik değerinin artırılması için sinter sıcaklığının 1430°C'den 1480°C'ye artışı şeklinde yapılan sinterlemeyle yeterli sertlik elde edilemediğinden, sinter süresinin artırılması tekrar denenebilir.
- Numunelerin, izostatik preslemeyle üretilip daha yüksek yoğunluk ve sertlik elde edilebilirliği ve aşınma direncine etkileri incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Meriç, C., Atik, E. ve Türüdü, T., “Kaynakla birleştirilmiş demir esaslı toz metal parçaların kaynak bölgesinin incelenmesi”, *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 4: 1-11 (2005).
2. German, R. M., “Powder Metallurgy Science”, 2nd ed., *Metal Powder Industries Federation*, USA, 64-65, 74-78, 259-260 (1994).
3. Caldwell, S. G., “Tungsten Heavy Alloy Design Manual”, *Allegheny Technologies Compony*, USA, 6-7 (1990).
4. Demir, A. ve Sarıtaş, S., “Toz Metal Çeliklerin Mekanik Özellikleri”, Akdeniz Üniversitesi Isparta Mühendislik Fakültesi, *Makine Mühendisliği Bölümü Dergisi*, 7: 1-14 (1993).
5. İnternet: Toz Üretim Yöntemleri ve Sinterleme, Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Metalürji ve Malzeme Bölümü Ders Notları, <http://web.sakarya.edu.tr>, Sakarya (2012).
6. Dunkley, J. J., “Atomization”, Powder Metallurgy, Metal Handbook, *ASM International Publ.*, England, 7(9): 111-112 (1998).
7. Başaran, A., “Toz Metal Parçalara Isıl Ve Mekanik Yüzey İşlemlerin Birlikte Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, Doktora Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 25-27 (2007).
8. İnternet: Toz Metalürjisi. Türk Toz Metalürjisi Derneği, <http://www.turkishpm.org>, Ankara (2012).
9. Mandelbrot, B. B., “Partical Image Analyses”, Powder Metallurgy, Metal Handbook, *ASM International Publ.*, USA, 7(9): 617-618 (1998).
10. Handbook, “Quintus Isostatic Pressing”, *ASEA Metallurgy*, USA, 4-5 (1984).
11. German, R. M., “Consolidation Principles and Process Modeling”, Powder Metallurgy, Metal Handbook, *ASM International Publ.*, USA, 7(9): 1041-1044. (1998).
12. German, R. M., “Toz Metalürjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Çeviri, Sarıtaş S., Türker M., Durlu N., *Türk Toz Metalürjisi Derneği*, Ankara 264-265 (2007).

13. German, R.M., Farooq, S., C. Kipphut, M., “Kientics of Liquid Phase Sintering”, *Materials Science and Engineering A*, 105/106: 215-224 (1988).
14. DPT, VIII. Beş Yıllık Kalkınma Raporu, Madencilik Özel İhtisas Komisyonu Raporu, Metal Madenler Alt Komisyonu, *Diğer Metal Madenler Çalışma Raporu*, Ankara (2001).
15. Gümüş, A., Baydoğan, M., Çimenoğlu, H. ve Kayalı, E. S., “Yassı mamul üreten bir entegre demir-çelik fabrikasında aşınma”, Makine Mühendisleri Odası, *II. Demir-Çelik Sempozyumu*, 336: 60-66 (2003).
16. Hogmark, S., Jacobson, S., Vingsbo, O., “Surface Damage”, Friction, Lubrication and Wear Tecnology, Metal Handbook, *ASM International Publ.*, Sweden, 18: 322-323 (1992).
17. İnternet: İ. Ü. Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, Ders Notları, <http://www.istanbul.edu.tr>, İstanbul (2012).
18. German, R. M., “Sintering Theory and Practice”, *John Wiley and Sons, Inc.*, New York, 169-170 (1996).
19. ASTM E 112 – 96, *Standart Test Method for Determining Average Grain Size*, USA (2004).
20. ASTM B 777 – 07, *Standart Specipation for Tungsten Base*, Hige Density Metals, USA (2007).
21. Islam, S. H, Akhtar, F., Askari, S.J., Tufail, M., Qu, X., “Tensile behavior change depending on the varying tungsten content of W–Ni–Fe alloys”, *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 25: 380–385 (2007).
22. Mondal, A., Upadhyaya, A., Agrawal, D., “Effect of heating mode and sintering temperature on the consolidation of 90W–7Ni–3Fe alloys”, *Journal of Alloys and Compounds*, 509: 301–310 (2011).
23. Belhadjhamida, A., German, R. M., ”Tungsten and Tungsten Alloys”, *The Minerals, Metals & Materials Society PA*, 3-19 (1991).

ÖZGEÇMİŞ

Murat KILIÇ 1974'te Ankara'da doğdu. İlköğretimini Çağlar İlköğretim Okulu'nda tamamladıktan sonra liseyi Ankara Ulus Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nde tamamladı. 1996 yılında Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Talaşlı Üretim Öğretmenliği'ne başladı ve 2000 yılında mezun oldu. Mezuniyetin akabinde askerlik hizmetini tamamladı. 2001 yılından beri içinde olduğu iş hayatına, Atak Mühendislik'te üretim ve sevkiyat planlama sorumlusu olarak başladı. Daha sonra Moonlight Aydınlatma firmasının imalat müdürlüğü görevini 5 yıl yürüttü. Halen çalışma hayatını sürdürdüğü TÜBİTAK-SAGE'de 6 yılı aşkın süredir çalışmasının yanında 2011'de başladığı yüksek lisans eğitimini sürdürüyor.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : TÜBİTAK-SAGE
P.K. 16 06261 Mamak / ANKARA

Tel : 0090 312 590 93 49

Faks : 0090 312 590 91 48

E-posta : murat.kilic@tubitak.gov.tr