



**TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN
BOR VE NİKEL KATKILI A356 ALAŞIMININ
MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN
İNCELENMESİ**

Berat TAŞAR

**2021
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Tansel TUNÇAY**

**TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN BOR VE NİKEL
KATKILI A356 ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Berat TAŞAR

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Doç. Dr. Tansel TUNÇAY**

**KARABÜK
Ocak 2021**

Berat TAŞAR tarafından hazırlanan “TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN BOR VE NİKEL KATKILI A356 ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Tansel TUNÇAY

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 16/01/2021

Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Yakup KAYA (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Tansel TUNÇAY (KBÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Bekir YAVUZER (Beykent Üni.)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü

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

Berat TAŞAR

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE ÜRETİLEN BOR VE NİKEL KATKILI A356 ALAŞIMININ MİKROYAPI VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

Berat TAŞAR

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Doç. Dr. Tansel TUNÇAY

Ocak 2021, 76 sayfa

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile A356 alaşımına ağırlıkça %0,25, 0,5, 1, 2 oranlarında Bor (B) ve Nikel (Ni) elementleri ilave edilerek alaşımlandırılmıştır. Mekanik alaşımlama işleminde, toz-bilye oranı 1:10 ve alaşımlama süresi 4 saat olarak uygulanmıştır. Mekanik alaşımlama işleminden sonra, üretilen toz A356/B ve Ni alaşımları 350 MPa basınç altında (tek yönlü) ön şekillendirilmiştir. Ön şekillendirilen A356/B ve Ni alaşımları, vakumlu (10^{-6} mbar) sinterleme fırınında 600°C sıcaklıkta sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası, A356/B ve Ni alaşımları mikro yapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. A356/B ve Ni alaşımları mikroyapısal özellikleri; optik mikroskop (OM), tarama elektron mikroskobu (SEM+EDX), yoğunluk ve XRD analizi ile mekanik özellikleri ise mikro-makro sertlik testi ve aşınma testi ile değerlendirilmiştir. Sonuç olarak, optik mikroskop incelemelerinde A356 alaşımındaki B miktarının artması ile tane boyutunun azaldığı,

tane sınırlarının ve gözenekliliğinin arttığı belirlenmiştir. Buna karşın, A356 alaşımındaki Ni miktarının artması ile tane boyutunun arttığı, tane sınırlarının azaldığı ve gözenekliliğinin arttığı belirlenmiştir. A356 alaşımına B ve Ni ilavesi sonrasında bağıl yoğunlukların azaldığı belirlenmiştir. SEM+EDX ve XRD incelemelerinde, Al, Si, Al₃Si ötektik ve Al₃FeSi intermetalik fazlarının yanında B ve Ni miktarlarına bağlı olarak A356 alaşımında AlB, AlBFe ve AlNi, AlNiFe intermetalik bileşikler bulunmuştur. Bor miktarının artması ile A356 alaşımının mikro sertlik değerlerinin arttığı, makro sertlik değerlerinde ise %1 ve 2 B ilavesi dışında makro sertlik değerlerinin azaldığı belirlenmiştir. A356 alaşımına ilave edilen Nikel elementi de mikro ve makro sertlik değerlerinde aynı özellikleri sergilemiştir. Aşınma test sonuçlarına göre, B ilave edilen A356 alaşımında 10N ve 20N yük altında en iyi aşınma direnci %1 B ilave edilen A356 alaşımında yakalanmıştır. Ni ilave edilen A356 alaşımında 10N yük altında en iyi aşınma direnci %2Ni ilave edilen A356 alaşımında, 20N yük altında en iyi aşınma direnci %0,25Ni ilave edilen A356 alaşımında yakalanmıştır.

Anahtar Sözcükler : A356, toz metalürjisi, alaşımlama, sinterleme, alüminyum, nikel, bor.

Bilim Kodu : 91528

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF BORON AND NICKEL ADDED A356 ALLOY PRODUCED BY POWDER METALLURGY METHOD

Berat TAŞAR

Karabuk University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Assoc. Prof. Dr. Tansel TUNÇAY

January 2021, 76 pages

In this study, A356 alloy was alloyed using powder metallurgy method by adding Boron (B) and Nickel (Ni) element in proportions of 0,25%, 0,5, 1, 2 by weight to its alloy. For mechanical milling process, 4 hours of milling time and 1:10 of powder/ ball ratio were applied. After mechanical milling, A356/B and Ni powders were pre-formed (unidirectional) under 350 MPa pressure. A356/B and Ni powders which were pre-formed, were sintered in the vacuum sintering furnace at the temperature of 600°C. After sintering, microstructural and mechanical properties of A356/B/Ni alloys were characterized. Microstructural properties of A356/B/Ni alloys were evaluated by optical microscope (OM), scanning electron microscope (SEM+EDX), density and XRD analysis, and also mechanical properties were evaluated by micro-macro hardness test and wear test. As a result of optical microscope investigations, it was determined that while the amount of B increased, the grain size decreased, the

grain boundaries and porosity increased. Whereas, It was determined that while the amount of Ni in the A356 alloy increased, the grain size and porosity increased and the grain boundaries decreased. The relative densities decreased after the addition of B and Ni in to the A356 alloy. In SEM+EDX and XRD examinations, in addition to Al, Si, Al₉Si eutectic and Al₅FeSi intermetallic phases, AlB, AlBFe and AlNi, AlNiFe intermetallic compounds were found in the A356 alloy depending on the amount of B and Ni. Micro-hardness values of A356 alloy were increased with the increase of Boron amount. As for the macro hardness values, it was determined that macro hardness values decreased except 1% and 2 B addition. Nickel element which is added into the A356 alloy showed the same properties in terms of micro and macro-hardness values. According to the wear test results for A356 alloys with B added, the best wear resistance under load of 10N and 20 N was achieved in A356 alloy with %1 B. In A356 alloys with Ni added, the best wear resistance under load of 10N was achieved in A356 alloy with %2Ni, the best wear resistance under load of 20N was achieved in A356 alloy with %0,25 Ni.

Key Word : A356, powder methods, alloying, sintering, aluminum, nickel, boron.
Science Code : 91528

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yűrűtűlmesinde ve oluőumunda ilgi ve desteęini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrűbelerinden yararlandığım, yűnlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ıőıęında őekillendiren sayın hocam Doç. Dr. Tansel TUNÇAY'a ve bu çalıőmanın her aőamasında yanımda olan ve beni destekleyen aileme sonsuz teőekkűrlerimi sunarım.

Bu alıőma, Karabűk Ŭniversitesi Bilimsel Araőtırma Proje Birimi tarafından FYL-2019-2070 numaralı proje kapsamında gerçekleőtirilmiőtir. Karabűk Ŭniversitesi Bilimsel Araőtırma Proje Birimine desteklerinden dolayı teőekkűr ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xv
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xvi
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
ALÜMİNYUM	3
2.1. ALÜMİNYUM ÜRETİMİ	3
2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	4
2.2.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi	6
2.2.2. Al-Si-Mg Alaşımları.....	12
BÖLÜM 3	14
TOZ METALÜRJİSİ (T/M) YÖNTEMİ.....	14
3.1. TOZ METALÜRJİSİ TARİHÇESİ.....	14
3.2. TOZ METALLER.....	16
3.3. MEKANİK ALAŞIMLAMA/ÖĞÜTME İŞLEMİ	17
3.4. TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE PARÇA ÜRETİMİ.....	19
3.4.1. Tozların Öğütülmesi	20
3.4.2. Ön Şekillendirme	20
3.4.3. Sinterleme	22

	<u>Sayfa</u>
3.4.3.1. Katı Faz Sinterlemesi	24
3.4.3.2. Sıvı Faz Sinterlemesi	24
BÖLÜM 4	26
MALZEME VE METOT	26
4.1. BAŞLANGIÇ TOZLARI	26
4.2. MEKANİK ALAŞIMLAMA	28
4.3. ÖN ŞEKİLLENDİRME	29
4.4. SİNTERLEME	30
4.5. BOR VE NİKEL KATKILI A356 ALAŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU	30
4.5.1. Metalografik İşlemler ve Optik Mikroskop	31
4.5.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM+EDX) İncelemeleri	32
4.5.3. Yoğunluk Ölçümleri	32
4.5.4. Sertlik Testleri	33
4.5.5. XRD Testleri.....	34
4.5.6. Aşınma Testleri.....	34
BÖLÜM 5	36
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR	36
5.1. M.A. ÖNCESİ TOZ PARTİKÜLLERİN KARAKTERİZASYONU.....	36
5.2. M.A. SONRASI TOZ PARTİKÜLLERİN KARAKTERİZASYONU	36
5.3. OPTİK MİKROSKOP (OM) GÖRÜNTÜLERİ	43
5.4. TARAMA ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ VE TARTIŞMALAR	45
5.5. YOĞUNLUK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	52
5.6. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	57
5.7. XRD İNCELEMELERİ	60
5.8. AŞINMA TESTİ VE SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	61
BÖLÜM 6	70
SONUÇLAR	70

	<u>Sayfa</u>
KAYNAKLAR	72
ÖZGEÇMİŞ	76

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Şekil 2.1. Cevherden alüminyum üretimi	4
Şekil 2.2. Al-B faz diyagramı	7
Şekil 2.3. Al-Ni faz diyagramı.....	10
Şekil 2.4. Al-Si faz diyagramı	11
Şekil 3.1. Toz metalürjisi ile üretilmiş malzemeler	15
Şekil 3.2. Toz metal şekilleri a-) küresel, b-) yuvarlak, c-) silindirik, d-) düzensiz, e-) kübik, f-) süngerimsi	16
Şekil 3.3. Mekanik alaşımlama işlemi	18
Şekil 3.4. Toz metalürjisi ile parça üretim süreci	19
Şekil 3.5. Sıkıştırma basıncı ve yoğunluk arasındaki ilişki	21
Şekil 3.6. Sıkıştırma basıncının bağıl yoğunluğa etkisi.....	21
Şekil 3.7. Kalıcı gözenek oranının mukavemet özelliklerine etkisi	22
Şekil 3.8. Sinterleme aşamaları esnasında parçacıklar arasında oluşan bağ oluşumu ve buna bağlı olan şekil değişimi	23
Şekil 3.9. Sinterleme süresinin yoğunluğa etkisi.....	23
Şekil 3.10. Katı hal sinterlemesinin aşamaları; A) Yapışma B) Başlangıç safhası C) Ara aşama D) Son aşama.....	24
Şekil 3.11. Sıvı faz sinterlemesi aşamaları.....	25
Şekil 4.1. Mekanik alaşımlama öncesi tozlara ait SEM görüntüleri ve boyut analizleri a) A356, b) Bor, c) Nikel	27
Şekil 4.2. a) Precisa XB200h marka terazi ve b) Fritsch Pulverisette marka planeter tip mekanik alaşımlama cihazı	28
Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan a) pres ve b) tek yönlü pres kalıbı	29
Şekil 4.4. Sinterleme fırını.....	30
Şekil 4.5. Zımparalama ve polisaj cihazı.....	31
Şekil 4.6. Optik mikroskop	31
Şekil 4.7. SEM + EDX incelemelerinin yapıldığı tarama elektron mikroskobu	32
Şekil 4.8. Yoğunluk ölçüm cihazı	32
Şekil 4.9. Mikro sertlik cihazı	33
Şekil 4.10. Makro sertlik cihazı.....	33
Şekil 4.11. XRD cihazı	34

Şekil 4.12. Aşınma test cihazı şematik görünümü	35
Şekil 5.1. A356/xB alaşımı toz tanecikleri, mekanik alaşımlama sonrası SEM görüntüleri ve boyut analizleri.....	38
Şekil 5.2. A356/xB alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz bölgeleri.....	39
Şekil 5.3. A356/xNi alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası SEM görüntüleri ve boyut analizleri.....	41
Şekil 5.4. A356/xNi alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz bölgeleri	42
Şekil 5.5. A356/xB alaşımlarının sinterleme sonrası OM görüntüsü	44
Şekil 5.6. A356/xNi alaşımlarının sinterleme sonrası OM görüntüsü.....	45
Şekil 5.7. Sinterleme sonrası A356 alaşımı SEM görüntüleri.....	46
Şekil 5.8. A356 alaşımı SEM haritalama görüntüleri.....	46
Şekil 5.9. A356/xB alaşımlarının SEM görüntüleri.....	48
Şekil 5.10. A356/xB alaşımlarının SEM haritalama görüntüleri	49
Şekil 5.11. A356/xNi alaşımlarının SEM görüntüleri.....	50
Şekil 5.12. A356/xNi alaşımlarının SEM haritalama görüntüleri.....	51
Şekil 5.13. A356/xB alaşımlarında, B oranının bağıl yoğunluk ve gözenek miktarına etkisi	52
Şekil 5.14. A356/xB alaşımlarında, B oranının bağıl yoğunluk ve deneysel yoğunluğa etkisi	53
Şekil 5.15. A356/xB alaşımlarında, B oranının tane ve tane sınır alanlarına etkisi... 54	
Şekil 5.16. A356/xNi alaşımlarında, Ni oranının bağıl yoğunluk ve gözenek miktarına etkisi	55
Şekil 5.17. A356/xNi alaşımlarında, Ni oranının bağıl yoğunluk ve deneysel yoğunluğa etkisi	56
Şekil 5.18. A356/xNi alaşımlarında, Ni oranının tane ve tane sınır alanlarına etkisi 57	
Şekil 5.19. A356/xB alaşımlarının mikro sertlikleri	57
Şekil 5.20. A356/xB alaşımlarının makro sertlikleri	58
Şekil 5.21. A356/xNi alaşımlarının mikro sertlikleri.....	59
Şekil 5.22. A356/xNi alaşımlarının makro sertlikleri	59
Şekil 5.23. A356/xB alaşımlarının XRD analizleri.....	60
Şekil 5.24. A356/xNi alaşımlarının XRD analizleri	61
Şekil 5.25. A356/xB alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (10N).....	62
Şekil 5.26. A356/xB alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (10N)	63
Şekil 5.27. A356/xB alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (20N).....	63

Sayfa

Şekil 5.28. A356/xB alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (20N)	64
Şekil 5.29. A356/xB alaşımlarının 20 N kuvvet altında ve 2000 metre kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri	65
Şekil 5.30. A356/xNi alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (10N)	66
Şekil 5.31. A356/xNi alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (10N).....	67
Şekil 5.32. A356/xNi alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (20N)	68
Şekil 5.33. A356/xNi alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (20N).....	68
Şekil 5.34. A356/xNi alaşımlarının alaşımların 20 N kuvvet altında ve 2000 metre kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri	69

ÇİZELGELER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
Çizelge 2.1. Ülkelere göre 2010 yılı mevcut boksit rezervleri	3
Çizelge 2.2. Alüminyum özellikleri	5
Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve ısıtılma uygunlukları	5
Çizelge 2.4. Çeşitli varyasyondaki A356 alaşımları	5
Çizelge 2.5. Al-Ni fazları	11
Çizelge 3.1. Toz metalürjisinin tarihçesi.....	15
Çizelge 3.2. Toz metal özellikleri	17
Çizelge 4.1. A356 alüminyum tozu kimyasal bileşimi	26
Çizelge 4.2. Başlangıç tozlarına ait EDX analiz sonuçları	28
Çizelge 5.1. A356/xB alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz sonuçları	40
Çizelge 5.2. A356/xNi alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz sonuçları	43
Çizelge 5.3. A356 EDX analiz sonuçları	46
Çizelge 5.4. Bor ilave edilen A356 alaşımlarının EDX sonuçları	49
Çizelge 5.5. A356/xNi alaşımlarının EDX sonuçları.....	51

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: alüminyum
Si	: silisyum
Mg	: magnezyum
Fe	: demir
B	: bor
Ni	: nikel
Zn	: çinko
Cu	: bakır
Sn	: kalay
Sb	: antimon
Bi	: bizmut
Cd	: kadmiyum
Ca	: kalsiyum
Cr	: krom

KISALTMALAR

T/M	: Toz metalurjisi
M.A.	: Mekanik alaşımlama
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
EDX	: Enerji Yayınım X-ışınımı
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
HB	: Brinell Sertlik
HV	: Vickers Sertlik
KBÜ	: Karabük Üniversitesi
MTA	: Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Alüminyum metali, ağırlık olarak yer kabuğunun %8'ini oluşturur. Oksijenle ve diğer elementlerle kolaylıkla bağ yapabilir, silikatları ve oksitleri oluşturur. Bu nedenden dolayı saf halde doğada bulunmamaktadır.

İzgi (2011) yaptığı bir çalışmada alüminyumun endüstride kullanımı 1886 yılında elektrolizle ayrıştırma yönteminin keşfinden sonra gerçekleştiğini belirtmiştir. Tamer (2016) yaptığı bir çalışmada mühendislik yapılarında alüminyumun, çelikten sonra en çok kullanılan metal olduğunu ve teknolojinin gelişmesiyle birlikte ileride çeliğin yerini alabilecek potansiyele sahip bir metal olduğunu belirtmiştir. Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunluk, yüksek şekil alma kabiliyetleri, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, sünek olmaları ve yüksek korozyon dayanımları gibi birçok avantajı vardır. Bu avantajlarından dolayı otomotiv, havacılık, enerji ve savunma sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tüm bu avantajlarının yanında, alüminyum alaşımlarının düşük mekanik dayanım ve düşük aşınma direnci gibi dezavantajları vardır. Bu özellikleri iyileştirmek amacıyla Si, Cu, Mg, Fe, Zn gibi elementlerle alaşımlandırılarak endüstride yaygın olarak kullanılır. Alüminyum alaşımlarında en yaygın kullanılan alaşım elementi silisyumdur (ASM, 1990). Ana alaşım elementi silisyum olan alaşımlar, üstün döküm kabiliyetlerinden dolayı ticari olarak en önemli alaşımlardır. Al-Si alaşımlarının yüksek korozyon direnci, iyi kaynaklanabilirlik ve düşük yoğunluk gibi avantajları vardır. Ticari alaşımlar, %30 silisyuma kadar hipoötektik ve hiperötektik aralıkları kapsamaktadır. Magnezyum takviyesi ise ısı işlem sonrasında Al-Si alaşımlarında akma ve kopma dayanımlarını iyileştirir. A356 alaşımları döküm Al-Si-Mg alaşımlarıdır. Döküm metodunun çok fazla parametreye sahip olmasından dolayı farklı döküm hataları (segregasyon, çekme hataları, boşluk oluşumu vb.) parçanın üretilebilirliği üzerine olumsuz etki etmektedir. Bunun yanı sıra alaşımlama ve tane inceltme işlemlerinin uygulamaları

karmaşık ve zordur. Toz metalürjisi (T/M) yönteminde, parametrelerinin daha kontrol edilebilir ve son ürün niteliğine (boyutsal) yakın ürün elde edilmesi nedeniyle döküm yöntemine alternatif üretim yöntemi olarak ön plana çıkmaktadır. Toz metalürjisi, metal ve metal alaşımlardan, kimyasal ve fiziksel işlemler sonucu elde edilen tozların önce presleme ve daha sonra toz tanecikleri arasında kuvvetli bağ oluşturmak amacıyla sinterleme işlemi ile son bulmaktadır. Döküm veya diğer klasik üretim metotlarıyla elde edilmesi mümkün olmayan parçaların üretimi, toz metalürjisi yöntemiyle yapılabilmektedir. Başta otomotiv sektörü olmak üzere, elektrik ve elektronik, tıbbi teçhizat gibi birçok sektör için parça üretimi bu yöntemle mümkün olmaktadır. Otomotiv sektöründe, fren balataları, kapı kilitleri, motor starterleri gibi birçok parçanın üretiminde kullanılmaktadır. Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen parçalar üretildikten sonra doğrudan kullanılabilir veya kaplama ve yüzey sertleştirme gibi ikincil işlemlerde yapılabilir.

Bu çalışma, mekanik alaşımlama metodu ile toz A356 alaşımına ağırlıkça %0,25, 0,5, 1 ve 2 oranlarında Bor ve Nikel elementi tozu ilave edilmiştir. Toz-bilye oranı 1:10 olarak, işlem kontrol kimyasalı stearik asit (%1 oranında) ilavesi ile alaşımlama işlemi planetary tip değirmende 4 saat uygulanmıştır. Mekanik alaşımlama işlemi sonrasında üretilen toz A356/B ve Ni alaşımları tek yönlü hidrolik pres ile 350 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Şekillendirilen A356/B ve Ni alaşımları, vakumlu (10^{-6} mbar) sinterleme fırınında 600°C sıcaklıkta altında sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası, A356/B ve Ni alaşımları mikro yapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. A356/B ve Ni alaşımları; mikro yapısal özellikleri, yoğunluk, optik ve tarama elektron mikroskobu, XRD analizi sonuçları ile değerlendirilmiştir. Mekanik özellikleri, mikro-makro sertlik testi ve aşınma dayanım testi yapılmıştır.

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM

2.1. ALÜMİNYUM ÜRETİMİ

Alüminyum doğada boksit cevheri olarak bulunmaktadır. Demirci (2011) yaptığı bir çalışmada bilinen dünya boksit rezervlerinin 2010 yılı itibarı ile yaklaşık 38 milyar ton olduğunu söylemiştir. Cevher olarak hemen hemen dünyanın birçok bölgesinde boksit bulunuyor olsa da yüzeye yakınlığı ve yoğunluğu açısından bakıldığında, dünyada on ülke dünya boksit rezervlerinin %87'sine sahiptir. Çizelge 2.1'de ülkelere göre boksit rezervleri verilmiştir.

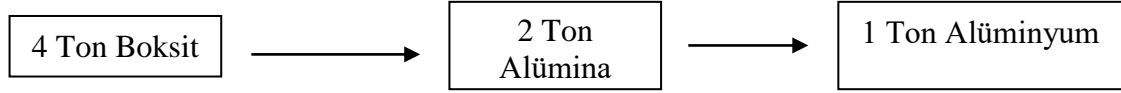
Türkiye'de bilinen boksit rezervleri Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğünün (MTA) verilerine göre 68.910.000 tondur. Bu rakam dünya rezervlerinin %1,8'i gibi küçük bir kısmını oluşturur (Demirci, 2011). Dünyada çıkarılan boksitin %90'ı alüminyum üretiminde kullanılır ve boksit üretimi, alüminyum talebine paralel olarak artış gösterir. Dünya boksit üretimi 2010 yılı itibarı ile yılda 214 milyon tona ulaşmıştır.

Çizelge 2.1. Ünelere göre 2010 yılı mevcut boksit rezervleri (Demirci 2011).

Ülke	Boksit Rezervi (Ton)	Boksit Rezervi (%)
Gine	8,6 Milyar	23
Avustralya	7,9 Milyar	21
Vietnam	5,4 Milyar	14
Brezilya	2,5 Milyar	7
Jamaika	2,5 Milyar	7
Çin	2,3 Milyar	6
Hindistan	1,4 Milyar	4

Boksit minerali, alüminyum üretiminin en önemli hammaddesidir ve %30-60 oranında alüminyum oksit içerir. Bayer Prosesine göre elde edilen alüminanın

elektrolizi ile sıvı alüminyum üretilmektedir (birincil alüminyum). Boksitin işlenerek alüminyum haline gelme aşaması Şekil 2.1’de verilmiştir.



Şekil 2.1. Cevherden alüminyum üretimi.

Yaklaşık 4 ton boksitten 2 ton alümina elde edilmekte, bundan da 1 ton alüminyum üretilmektedir. Alüminyum metalinin endüstri alanına girmesi; bakır, çinko, kurşun gibi metallere göre daha yeni sayılır. İlk defa Davy tarafından 1805 yılında keşfedilen alüminyum elementi, alüminyum klorürün, potasyum-cıva amalgamı ile indirgenmesi sonucu, Oersted tarafından 1825 yılında metalik olarak elde edilmiştir. 1854 yılında Henri Sainte-Claire Deville, sodyum ve alüminyum klorür karışımını metalik sodyum ile ısıtarak endüstriyel anlamda alüminyum üretimini başarmıştır.

Modern alüminyum endüstrisinin temelleri, 1886 yılında Fransız Paul Heroult ve Amerikalı Charles Martin Hall tarafından atılmıştır. Hall-Heroult, elektrolitik metodunun uygulanmaya başlaması ile endüstriyel bakımdan ekonomik olarak alüminyum üretimi gerçekleşmiştir. Boksitten ve diğer alüminyum içeren minerallerden alümina veya alüminyum üretimi için pek çok metot denenmiştir. Bunlardan yalnız birkaç tanesi endüstriyel uygulamalarda kendini kabul ettirecek kadar pratik ve ekonomik olabilmıştır. Özellikle, Carl Bayer tarafından ortaya konan Bayer metodu, pratik olarak yüksek tenörlü cevherlerin işlenmesinde dünya çapında kullanılan yegâne metot olmuştur.

2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum alaşımlarının düşük yoğunlukları, yüksek şekil alma kabiliyetleri, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, sünek olmaları, yüksek korozyon dayanımları gibi birçok avantajı vardır. Bu avantajlarından dolayı özellikle otomotiv, havacılık, enerji ve savunma sanayi sektörlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat alüminyum alaşımlarının mekanik dayanım ve aşınma direnci gibi özellikleri ise düşüktür.

Çizelge 2.2. Alüminyum özellikleri (ASM, 1990).

Alüminyum Özellikleri	
Yoğunluk (g/cm ³)	2,7
Ergime derecesi (°C)	660
Kaynama derecesi (°C)	2430
Kristal yapısı	YMK
800 °C'de yüzey gerilimi (N/m)	0,865
Oksijen içeriği (%)	0,1-1,0

Alüminyum döküm alaşımlarının alaşım elementlerine göre kodlandırılması Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması ve ısıl işleme uygunlukları (ASM, 1990).

Malzeme Kodu	Alaşım Elementleri	Isıl İşlem
1xx.x	Saf Alüminyum	Uygun değil
2xx.x	Al-Cu alaşımları	Uygun
3xx.x	Al-Si-Mg/Cu alaşımları	Uygun
4xx.x	Al-Si alaşımları	Uygun
5xx.x	Al-Mg alaşımları	Uygun değil
6xx.x	Kullanılmamaktadır	Uygun
7xx.x	Al-Zn alaşımları	Uygun
8xx.x	Al-Sn alaşımları	Uygun değil

Alaşım kodlarının önündeki harfler, döküm alaşımların saflıkları ve ana alaşım elementleri harici diğer element oranlarındaki ufak değişiklikleri belirtir. Örneğin endüstride en çok kullanılan 356 döküm alaşımının A356, B356, C356, F356 gibi varyasyonları bulunmaktadır. Çizelge 2.4'de çeşitli varyasyondaki 356 alaşımının kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Çizelge 2.4. Çeşitli varyasyondaki A356 alaşımları (ASM, 1990).

Alaşım	Kimyasal kompozisyon						
	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti
356	6,5-7,5	0,6	0,25	0,35	0,2-0,45	0,35	0,25
A356	6,5-7,5	0,2	0,2	0,1	0,25-0,45	0,1	0,2
B356	6,5-7,5	0,09	0,05	0,05	0,25-0,45	0,05	0,04-0,2
C356	6,5-7,5	0,07	0,05	0,05	0,24-0,45	0,05	0,04-0,2
F356	6,5-7,5	0,12	0,1	0,05	0,17-0,25	0,05	0,04-0,2

2.2.1. Alaşım Elementlerinin Alüminyuma Etkisi

Antimon (Sb): Lamel yapıdaki silisyumun modifikasyonu için %0,05 oranına kadar antimon ilavesi yapılabilir. Antimonun ötektik yapı modifikasyonu yapıdaki fosfor eksikliğine ve hızlı bir katılaşmaya bağlıdır (ASM, 1990). Antimon stibin gazı oluşturma ihtimali olan ağır bir metaldir. Fakat edinilen tecrübelerle göre alüminyum alaşımlarında %0,08 ile %0,15 oranlarındaki antimon kullanımının sağlık açısından herhangi bir olumsuzluk yaratmadığı görülmüştür (ASM, 1990).

Bakır (Cu): Bakır, döküm alaşımlarda ve ısıl işlem görmüş alaşımlarda dayanımı ve sertliği büyük ölçüde iyileştirir. En çok kullanılan Al-Cu alaşımlarında Cu oranı %4-%10 arasındadır. %4-%6 arasında Cu içeren alaşımlar ısıl işleme en duyarlı Al-Cu alaşımlarıdır. Bakırın, alüminyum içinde eriyebilirliği, oda sıcaklığında %0,5 iken, 548°C ötektik sıcaklıkta ise %5,65'tir (Eruslu, 1984). Alüminyum bakır alaşımlarında %5,5'e kadar Cu ilavesi ile dayanım artar ve süneklik azalır. Daha yüksek miktarlarda Cu ilavesinde ise mekanik özellikler azalmaktadır. En iyi döküm özelliğine sahip Al-Cu alaşımı, %8 bakır içermektedir (ASM, 1990).

Berilyum (Be): Mg içeren alüminyum alaşımlarında oksidasyonu azaltmak için çok küçük miktarlarda kullanılabilir. Demir içeren alüminyum alaşımlarda ise daha yüksek miktarda kullanılan berilyum, demir içeren intermetaliklerin şekillendirilmesinde rol oynar ve buna bağlı olarak mukavemet artar (ASM, 1990).

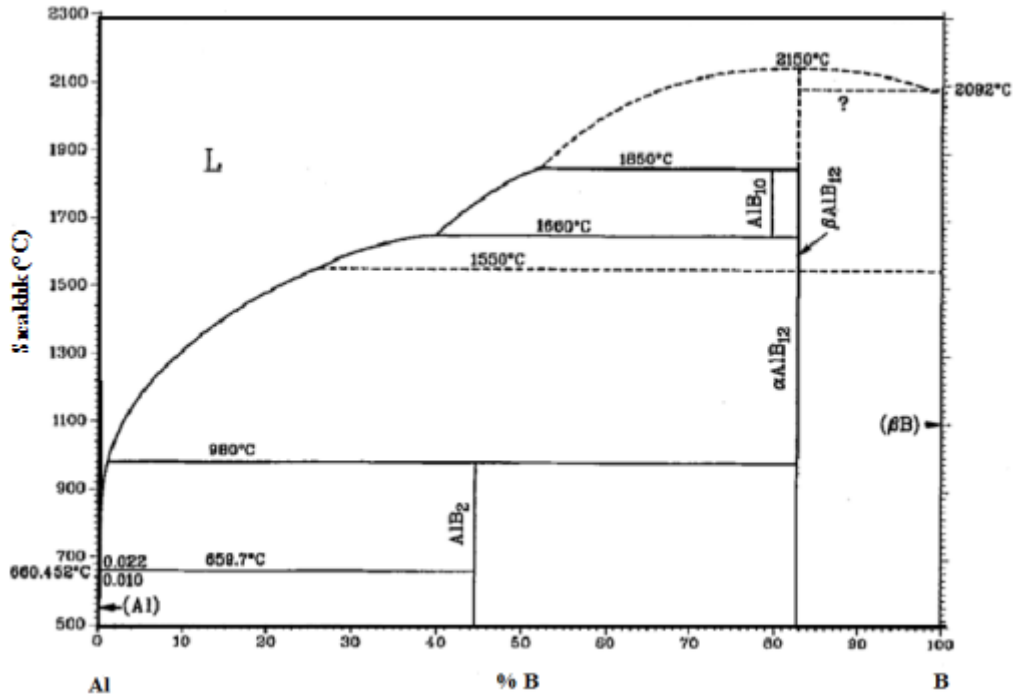
Bizmut (Bi): Dökme alüminyum alaşımlarında %0,1 oranında Bi ilavesi yapılarak işlenebilirlik arttırılabilir (ASM, 1990).

Bor (B): Bor periyodik cetvelin 3A grubunun ilk ve en hafif üyesidir. Atom numarası 5, atom ağırlığı 10,81 g/mol, yoğunluğu 2,84 g/cm³, ergime noktası 2092 °C olan, metalle ametal arası yarı iletken özelliklere sahip bir elementtir (Yılmaz, 2002). Knoop sertliği: 2100-2580 HK, Vickers sertliği: 5000 HV'dir (Yılmaz, 2002).

Bor, bileşik oluşturduğunda metal dışı bileşikler gibi davranır. Kristalize bor, görünüş olarak elmasa benzer ve neredeyse elmas kadar serttir (Sinha, 1991).

Doğada yaklaşık olarak 230 çeşit bor minerali bulunur ancak bunlardan sadece 15'i ekonomik değere sahiptir (Helvacı, 2003). Yeryüzünde bulunan bor yatakları birkaç yerde yoğunlaşır ve bunların yaklaşık %60'ı Türkiye'de bulunur (Kalafatoğlu vd. 2000).

Bor Al-Si alaşımlarında silisyum lamellerinin modifikasyonunu gerçekleştirerek mukavemet artışını sağlar. Bununla birlikte saflığı ve elektrik iletkenliği geliştirmek amacı ile alüminyum alaşımlarında bor kullanılabilir (ASM, 1990). Al alaşımlarında modifikasyon için bor ile titanyum beraber kullanılır. Bor alaşımdaki diğer metallerle birleşerek AlB_2 ve TiB_2 gibi borit içeren fazlar oluşturur. Tane inceltme işlemlerinde, bor ve titanyum oranı 1/5'tir (Davis, 2001).



Şekil 2.2. Al-B faz diyagramı (Yılmaz, 2002).

Çinko (Zn): Alüminyum döküm alaşımlarında çinko, sıcak yırtılmaya sebebiyet verdiği için nadiren kullanılır. Çinkonun en önemli etkisi, alaşımın mukavemetini ve işlenebilirlik kabiliyetini artırmasıdır. Doğal yaşlandırma özelliğinden dolayı tercih edilmektedir. Ayrıca kaynaklanabilirlik özelliğini arttırmaktadır.

Çinkonun, bakır ile birlikte kullanılması sonucu yeni alaşımlar geliştirilmiştir. %10-15 arasında Zn ilavesi %2-3 Cu içeren alüminyum alaşımlarında mukavemeti arttırmakta, Cu ise sıcak yırtılma ihtimalini azaltmaktadır. Silisyum ise akıcılığı arttırırken sünekliği ise azaltmaktadır (ASM, 1990).

Demir (Fe): Demir sıcak yırtılma direncini artırır ve metal kalıp kullanılan dökümlerde sıvı metalin kalıba yapışma eğilimini azaltır. Al-Cu-Ni alaşımlarına yüksek sıcaklıktaki mukavemeti artırmak amacıyla demir ilave edilebilir (Ateş, 1995). Al alaşımlarında %1,3'ün üzerindeki oranlarda bulunan demir sünekliği azaltmaktadır. Yüksek demir oranının diğer olumsuz bir etkisi ise alaşımın tane yapısının irileşmeye yol açmasıdır.

Demir, alüminyumda en çok bulunan impuritedir. Ergimiş alüminyumda, demirin çözünürlüğü çok yüksektir. Bundan dolayı ergitme, alaşımlandırma veya diğer işlemler sırasında kullanılan ekipmanlardan sıvıya geçebilmektedir (ASM, 1990).

Kadmiyum (Cd): Alüminyum alaşımlarına %0,1 oranında kadmiyum ilavesi işlenebilirliği arttırmaktadır. Kadmiyum kanserojen bir madde olduğu için buharlaşma noktası olan 767°C sıcaklıkta bu husus dikkate alınarak önlem alınmalıdır. (ASM, 1990).

Kalsiyum (Ca): Kalsiyum hidrojen çözünürlüğünü arttırdığı için gözeneklere neden olur. %0,005 ve daha yüksek oranlardaki kalsiyum Al-Mg alaşımlarında sünekliği olumsuz etkiler (ASM, 1990).

Krom (Cr): Al alaşımlarında krom sınırlı katı hal çözünürlüğü sergileyen ve bu nedenle tane büyümelerini engelleyen $CrAl_7$ bileşimini oluşturur. (ASM, 1990). Krom bazı Al alaşımlarında korozyon dayanımını artırır. Krom ergiyik metale Al %2 Cr master alaşımı ile ilave edilmektedir (Eruslu, 1984).

Kalay (Sn): Al alaşımlarında özellikle sürtünme sonucu aşınmayı azaltmasından dolayı rulman parçaları gibi sürtünmeye maruz kalan parçalarda kullanılır. (ASM,

1990). Fakat sıcak yırtılmaya ve korozyon direncinin azalmasına neden olur. Döküm Al alaşımlarında %25 oranında kalay kullanılabilir (ASM, 1990).

Magnezyum (Mg): Alüminyum alaşımlarında, ötektik sıcaklıkta %14,9 oranında çözünürken, oda sıcaklığında %2,9 oranında çözünmektedir. Daha yüksek Mg değerlerinde ise, kırılğan β fazı oluşmaktadır (Üçışık, 1978). Yaygın olarak kullanılan Al-Mg alaşımlarında Mg oranı %4-%10 arasındadır. %7'den fazla Mg içeren Al alaşımları yaşlandırılabilir (ASM, 1990).

Mg ilavesi alaşıma; yüksek dayanım, korozyon direnci ve yüksek kaynak kabiliyeti kazandırmaktadır. Özellikle denizcilik sektöründe kullanılan Al-Mg alaşımlarında yüksek mekanik özellikler ve ince taneli yapı tercih edilmektedir (Şenel, 2004).

Döküm Al-Mg alaşımları genellikle, kum döküm metodu ile üretilmektedir. Bu alaşımların ergitme sırasında oksitlenme eğilimi fazla olduğundan dolayı, ergitme kontrollü ortamlarda yapılmalıdır (ASM, 1990).

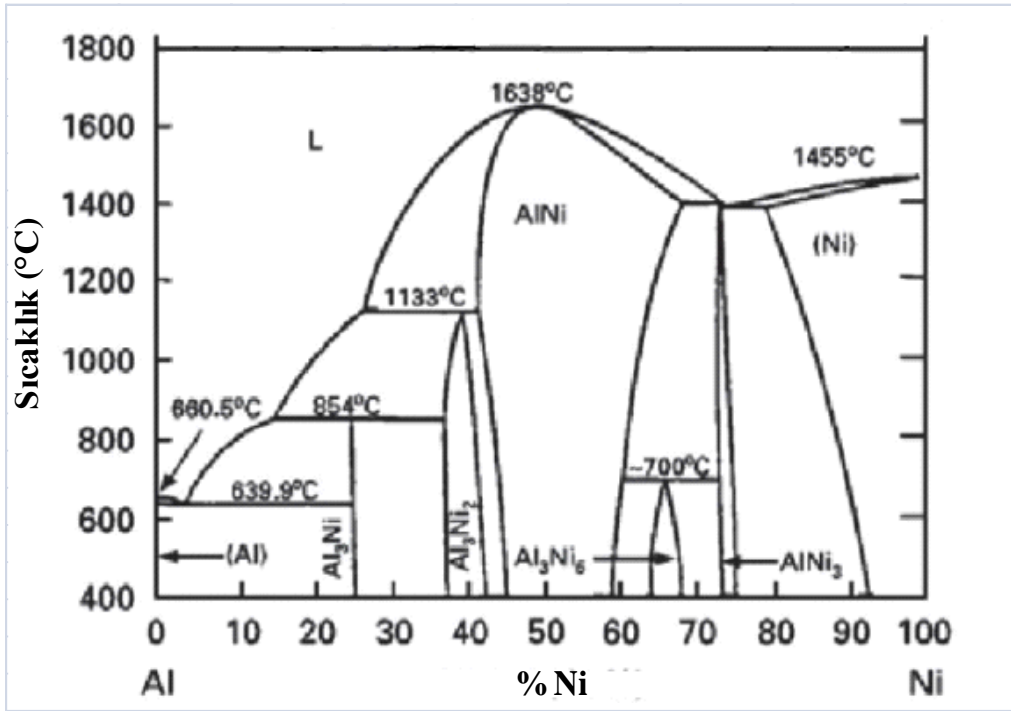
Al-Mg alaşımlarında bakır ve nikel kirliliği korozyon dayanımını düşürür. Demir ve mangan, mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemektedir. Al-Mg alaşımlarına, Si takviye edildiğinde, Mg_2Si metaller arası bileşiği oluşmakta ve alaşımların sertliği artmaktadır. İşlenebilme kabiliyeti yüksek olan bu alaşımların korozyon direnci de yüksektir (Eruslu, 1984). Al-Si alaşımlarında ise yüksek dayanım için %0,07-0,4 arasında magnezyum kullanılır (ASM, 1990).

Mangan (Mn): Alüminyum alaşımlarında %0,5 oranında Mn ilavesi ile oluşan $MnAl_6$ fazı sertliği ve sünekliği arttırmaktadır (ASM, 1990).

Nikel (Ni): Nikel $8,9 \text{ g/cm}^3$ yoğunluk ile doğadaki en yüksek yoğunluğa sahip elementler arasındadır. Atom numarası 28 olan Nikel, geçiş metallerinin ilk periyodunda, kobalt ve demir arasında bulunmaktadır. Atom ağırlığı $58,9634 \text{ g/mol}$ olan nikel, yüzey merkezli kübik yapıdadır (Reed, 2006).

Toz metalürjisi ile üretilen alüminyum alaşımlarına nikel ilavesi sonucunda alaşımın mekanik özelliklerinde iyileşmeler olduğu bilinmektedir (Beheraa, 2018). Nikel yüksek çalışma sıcaklığı altında çalışan alüminyum ile alaşımlandırılarak kullanılır.

Al-Ni faz diyagramı Şekil 2.3'te verilmiştir. Faz diyagramı incelendiğinde Al-Ni alaşımlarında oluşması muhtemel fazlar ve fazların ağırlıkça içerdikleri Ni oranları Çizelge 2.5'te verilmiştir. Al-Ni fazları arasında AlNi ve Al₃Ni en kararlı olan fazlardır. Oluşan bu intermetalik bileşikler, yüksek sıcaklıklarda oksitlenmeye karşı, yüksek ergime noktası, düşük yoğunluk ve yüksek direnç göstermektedirler (Karakulak 2014). Alüminyum sadece katı halde (600°C'de %0,028 ve 500°C'de %0,006 gibi) çok sınırlı miktarda nikel atomunu çözebilir (Karakulak 2014).



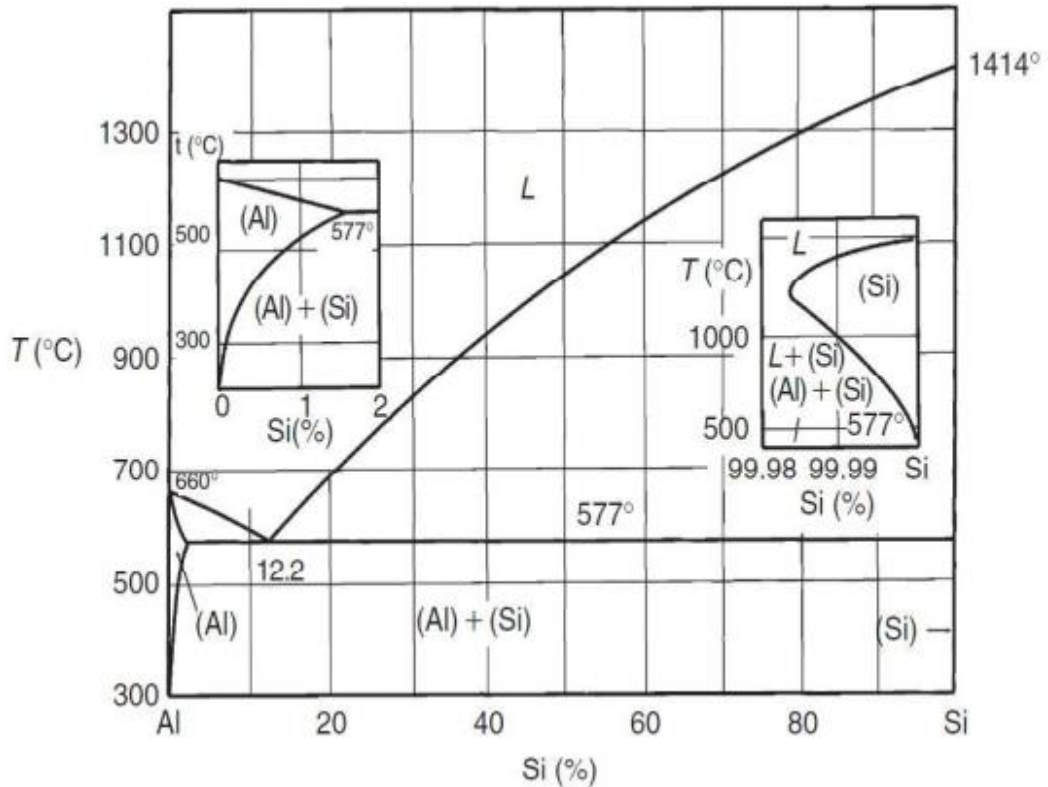
Şekil 2.3. Al-Ni faz diyagramı (ASM, 1992).

Çizelge 2.5'te Al-Ni fazları ve ağırlıkça içerdikleri Ni oranları yüzdesel olarak verilmiştir (ASM, 1992).

Çizelge 2.5. Al-Ni fazları (ASM, 1992).

Faz	Ağırlıkça Ni oranı (%)
Al	0- 0,24
Al ₃ Ni	42
Al ₃ Ni ₂	55,9- 60,7
AlNi	61- 83
Al ₃ Ni ₅	79- 82
AlNi ₃	85- 87
Ni	89-100

Silisyum (Si): Silisyumun saf alüminyuma ilavesi akışkanlığı, sıcak yırtılma direncini ve besleme özelliklerini önemli ölçüde geliştirir. Bu özelliklerinden dolayı endüstride en çok kullanılan alüminyum alaşımları Al-Si alaşımlarıdır. Oda sıcaklığında alüminyum içerisinde çok az miktarda çözünen silisyum, ötektik sıcaklıkta %1,59, 577°C de %12,7 oranında çözünmektedir (ASM, 1992). %7-12 aralığında silisyum içeren Al-Si alaşımları yüksek dayanım ve yüksek sıcaklıkta aşınma dayanımı istenen şartlarda kullanılmaktadır. Tane inceltme ve modifikasyon işlemleri ile işlenebilme, korozyon direnci ve mekanik özellikleri artmaktadır.



Şekil 2.4. Al-Si faz diyagramı (ASM, 1992).

Gümüş (Ag): Al-Cu alaşımlarında çökeltme sertleşmesi ve korozyon direnci için %0,5-1 oranında kullanılabilir (ASM, 1990).

Sodyum (Na): Al-Si ötektik alaşımlarında, silisyum modifikasyonu için kullanılır. Al-Mg alaşımlarında ise gevrekleşmeye neden olur (ASM, 1990).

Stronsiyum (Sr): Al-Si alaşımlarında silisyum modifikasyonu için %0,008-0,04 oranlarında kullanılır (ASM, 1990). Daha yüksek oranlarda kullanıldığında yavaş soğuyan işlemlerde veya kalın kesitli malzemelerin dökümünde gözeneklere neden olur (ASM, 1990).

Titanyum (Ti): Alüminyum alaşımlarında titanyum genel olarak, bor ile kullanıldığında tane inceltici rol oynar (ASM, 1990).

2.2.2. Al-Si-Mg Alaşımları

Al-Si alaşımları hafiflik, yüksek dayanım, yüksek ısı iletkenlik ve düşük ısı genleşme özelliklerinden dolayı savunma sanayi, havacılık ve otomotiv sektörlerinde kullanılmaktadır. Al-Si-Mg alaşımlarında; silisyum dökülebilme kabiliyetini arttırırken, magnezyum ise akma ve kopma dayanımlarını geliştirmektedir. %12'den az Si içeren Al alaşımları hipoötektik, %12 ve daha fazla Si içeren Al alaşımları ise hiperötektiktir. Al-Si alaşımlarının özellikle de yüksek oranda silisyum içeren alaşımlarda mukavemet ve süneklik artışı Al-Si ötektiğinin modifikasyonu ile gerçekleşir. Hipoötektik alaşımlarda silisyumun modifikasyonu sodyum ve stronsiyum ilavesi ile yapılır. Ayrıca modifikasyon için kalsiyum ve antimonda ilave edilebilir.

Yüksek mukavemet ve sertlik istenildiği durumlarda Al-Si alaşımlarına Mg ilavesi ile alaşıma istenilen özellikler kazandırılmış olur. Yaşlanma ile yapıda oluşturulan Mg_2Si , alaşımların dayanımını oldukça arttırmaktadır. Mg_2Si fazının Al dentritleri arasında çözünmesi için su verme ve yaşlandırma gibi işlemler uygulanmaktadır (Gruzleski, 1990). Al-Si-Mg alaşımlarının en önemlisi A356 alaşımıdır. A356 alaşımında %7 oranında Si bulunduğu için dökülebilirlik özellikleri yüksek bir

malzemedir. Bileşiminde bulunan yaklaşık %0,35 Mg bu alaşımın yaşlanma ile mukavemetlenmesini sağlar (Demir, 2012).

BÖLÜM 3

TOZ METALÜRJİSİ (T/M) YÖNTEMİ

Toz Metalürjisi (T/M) işlemi ilk olarak döküm, sıcak-soğuk presleme ve talaşlı imalat yöntemlerine alternatif olarak geliştirilmiştir. Bu yöntem; mekanik ve fiziko-kimyasal yöntemlerle metal, metal alaşımları, plastik ve seramik malzemeleri toz haline getirmek, toz haline getirilen bu malzemelerin basınç vasıtası ile şekillendirilmesi ve sıcaklık yardımıyla mukavemetlendirilmesi işlemidir (Hiçyılmaz, 1999). Önceleri demir ve diğer hafif metaller, refrakter, cermet, sert malzemeler ve sementit karbür gibi malzemelerin imalatında yaygın olarak kullanılırken, son yıllarda kompozit ve seramiklerin de imalatında bu teknoloji geniş kullanım olanakları sağlamaktadır. Toz, alaşım şeklindeyse sinterleme işlemi; en yüksek ergime noktasına sahip tozun ergime sıcaklığının altında yapılır (Anık vd, 1999).

3.1. TOZ METALÜRJİSİ TARİHÇESİ

İlk sinterlenmiş ürünler açık ocaklarda pişirilmiş ve mukavemet kazandırılmış tuğlalardır. Günümüzde bile sinterleme seramik malzemeler, refrakterler, aşındırıcılar, tuğlalar ve inşaat malzemelerinin üretiminde en yaygın kullanılan üretim yöntemidir.

M.Ö. 300 yıllarında, İnkalar ve Mısırlılar tarafından üretilen altın-platin takı ürünleri sinterlenerek üretilmiştir. Sinterlemenin modern çağı Edison'un tungsten tozlarından ürettiği lamba filamentleri ile başlamıştır. 1930'lu yıllarda kıvılcım kömürleri, karbürler, gözenekli bronz yataklar ve bakır-grafit elektrik kontaklarının imalatında kullanılmaya başlanılmıştır. 1940'lı yıllarda ise tungsten alaşımları, nükleer yakıt elemanları ve yapısal demir alaşımlarının imalatında kullanılmıştır. Günümüzde ise diş implantları, roket başlıkları, uçak kanadı ağırlıkları, ultrasonik dönüştürücüler ve

turbo değiştiriciler gibi malzemeler toz metalürjisi yöntemi ile rahatlıkla üretilebilmektedir. Görüldüğü gibi; tıp, savunma sanayi, enerji, havacılık ve otomotiv gibi birçok sektörde toz metalürjisi yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 3.1. Toz metalürjisi ile üretilmiş malzemeler.

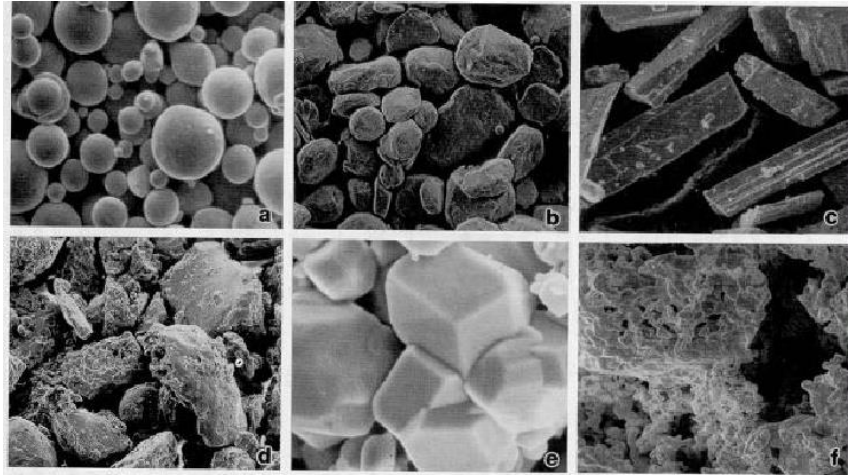
M.Ö. 3000 yıllarından günümüze kadar geçen zamanda toz metalürjisinin kısa tarihçesi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Toz metalürjisinin tarihçesi (ASM, 1998).

Tarih	Gelişme	Yer
M.Ö. 3000	Alet yapımında kullanılan süngerimsi demir üretimi	Mısır, Afrika, Hindistan
1200	Semente platin üretimi	Amerika
1790	Ticari amaçlı platin-arsenik alaşımı ile alet yapımı	Fransa
1822	Platin tozlarının külçe haline getirilmesi	Fransa
1826	Sıkıştırılan platin tozlarının yüksek sıcaklıkta sinterlenmesi	Rusya
1829	Platin süngerinden Wollaston yöntemi ile kompakt platin üretimi (Modern toz metalürjisinin ilk aşamaları)	İngiltere
1830	Çeşitli metallerin sinterlenmesi	Avrupa
1878-1900	Lamba filamentlerinin üretimi	A.B.D.
1915-1930	Sementit karbür	Almanya
1940	Demir toz teknolojisi	Orta Avrupa
1970	Sıcak izostatik presleme, çelikler ve süper alaşımların T/M ile üretilmesi	A.B.D.
1990	Kompozit malzemeler	A.B.D.
	Gözenekli metaller ve metal filtrelerinin üretimi	A.B.D.

3.2. TOZ METALLER

Toz metalürjisi ürünlerinin ana hammaddesi tozlardır. Toz metallere; akışkan benzeri davranış gösteren, genellikle 1 mm'den küçük, üretim yöntemine göre küresel, yuvarlak, silindirik, süngerimsi, prizmatik, yassı ve taneli gibi düzenli veya düzensiz şekillere sahip saf veya alaşım halinde özel olarak hazırlanan malzemelerdir.



Şekil 3.2. Toz metal şekilleri a-) küresel, b-) yuvarlak, c-) silindirik, d-) düzensiz, e-) kübik, f-) süngerimsi.

Toz metal imalatı, fiziksel veya kimyasal işlemlerle enerji kullanılarak yeni serbest yüzeyler oluşturmak ve bunun neticesinde küçük boyuttaki malzemelerin üretilmesi işlemidir. Toz metal imalat yöntemleri; malzemenin sıvı veya katı fazda partiküllere ayrıştırılması esasına dayalı mekanik yöntemler, atomizasyon yöntemi, bileşik formdaki malzemelerin indirgenmesi prensibine dayalı kimyasal yöntemler ve yine bileşik formdaki malzemenin ayrıştırılması prensibine dayalı elektro-kimyasal yöntemler olmak üzere dört sınıfta değerlendirilmektedir. Atomizasyon yöntemleri çelik, pirinç, demir, alüminyum, çinko, kalay, kurşun gibi metal ve metal alaşımları tozların üretiminde yaygın olarak kullanılmakta ve oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Sarıtaş, 1994).

Alüminyum ve alaşımı tozlarının imalatında en yaygın ve en ucuz yöntem atomizasyon yöntemleridir. Malzemenin niteliklerine bağlı olarak ve maliyet unsurları göz önünde bulundurularak en uygun atomizasyon yöntemi belirlenmelidir.

Su atomizasyonu yöntemiyle üretilen tozların ortalama tane boyutu 30-1000 mikron arasındayken, gaz atomizasyonu ile tozların ortalama tane boyutu ise 20-300 mikron arasındadır. Toz metal özelliklerini teknolojik ve fiziksel özellikler olmak üzere iki ana grupta inceleyebiliriz.

Çizelge 3.2. Toz metal özellikleri.

Teknolojik Özellikler	Fiziksel Özellikler
Toz akıcılığı	Toz şekli
Yoğunluk	Toz boyutu
Sıkıştırılabilirlik	Spesifik yüzey alanı
	Safsızlık

3.3. MEKANİK ALAŞIMLAMA/ÖĞÜTME İŞLEMİ

Mekanik alaşımlama (M.A.) ergitme yoluyla alaşım haline getirilmesi mümkün olmayan malzemelerin homojen bir biçimde alaşımlandırılmasında kullanılmaktadır. Mekanik alaşımlama yönteminde temel prensip, enerji kullanmak suretiyle yeni serbest yüzeylerin oluşturulmasıdır. M.A. ile düşük ortam sıcaklıklarında homojen yapılu tozlar üretilmekte ve tozların ortalama tane boyutu, boyut dağılımı, şekli ve diğer nitelikleri işlem esnasında kontrol edilebilmektedir. Ayrıca M.A. kimyasal sentez ve homojen dağılımın olmadığı ingot metalürjisinde çok aktif element alaşımlarının üretimi için avantajdır (Sago vd, 1997).

Mekanik alaşımlama;

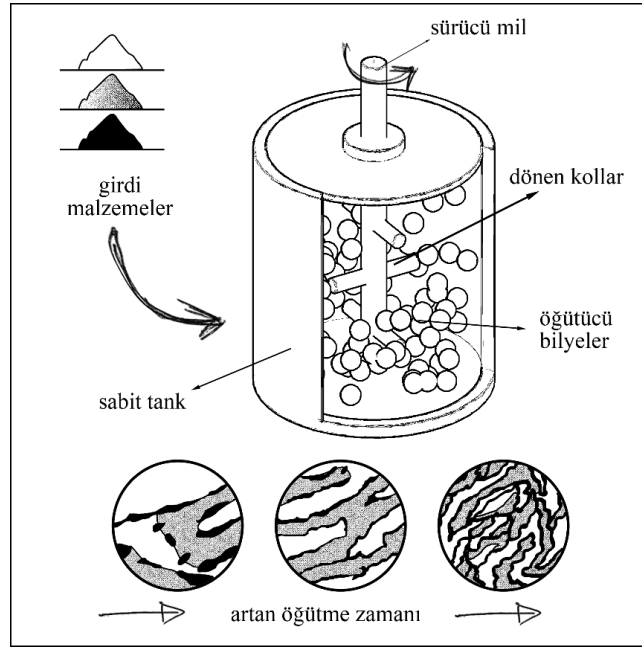
- Normal ergitme teknikleriyle üretilmesi güç veya imkânsız elementlerin alaşımlandırılmasında,
- Birbiri içerisinde sıvı fazda çözünmeyen elementlerin alaşımlandırılmasında,
- İkinci bir faz dağılımı sertleştirilmesi yapımında,
- Farklı ergitme noktalarına sahip malzemelerde intermeteliklerin oluşturulmasında kullanılmaktadır.

M.A. işlemi tüm bu avantajlarının yanı sıra özellikle yüksek maliyetli olması ve alaşım elementlerinin karakteristiğine bağlı olarak işlemin uzun süreler alması

dezavantajlarındandır. Fakat mekanik alaşımlama ile üretilen malzemelerin kullanım özellikleri ve mukavemetleri göz önünde bulundurulduğunda maliyetinin diğer yöntemlere göre kabul edilebilir seviyede olduğu görülür (Uygur, 1996).

M.A. işleminde asal atmosfer kullanılması, öğütücü ekipmanların dikkatli seçimi ve karıştırıcı ekipmanların öğütülecek malzemeyle kaplanması ile yabancı madde problemi giderilebilir.

Toz parçacıkların yüksek enerjili öğütülmesi sırasında sürekli ezilme, soğuk kaynak, kırılma ve yeniden kaynaklanma görülür. İki bilyenin çarpışması esnasında bilyeler arasında kalan tozlar ezilir.



Şekil 3.3. Mekanik alaşımlama işlemi (German, 2007).

Mekanik alaşımlama işleminde çok sayıda parametre, alaşımlanan tozun özelliklerine etki etmektedir. Bunlar;

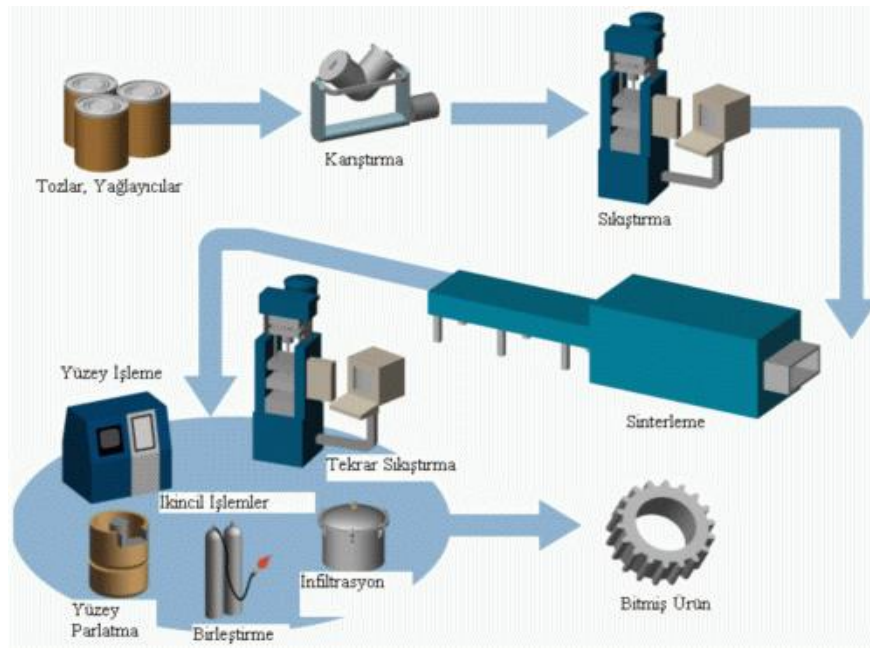
1. Değirmen tipi,
 - Speks Tipi Değirmenler
 - Planeter Tip Değirmenler
 - Atritör Tipi Değirmenler

2. Öğütücü hazne,
3. Öğütme hızı,
4. Öğütme süresi,
5. Öğütücü malzemelerin tipi ve şekli,
6. Toz-bilye oranı,
7. Hazne doluluk oranı,
8. Öğütme atmosferi,
9. İşlem kontrolü,
10. Öğütme sıcaklığıdır (German, 2007).

3.4. TOZ METALÜRJİSİ YÖNTEMİ İLE PARÇA ÜRETİMİ

T/M yöntemi ile parça üretimi dört aşamadan oluşur. Bu aşamalar;

- Tozların öğütülmesi
- Ön şekillendirme
- Sinterleme
- İkincil işlemler



Şekil 3.4. Toz metalürjisi ile parça üretim süreci.

3.4.1. Tozların Öğütülmesi

Öğütme; tane boyutlarını eşitlemek ve preslemeyi kolaylaştıracak yağlayıcıları ilave etmek amacı ile yapılır. Tozların tane boyutları ve şekilleri, katkı maddelerinin oranı malzeme kalitesini önemli seviyede etkilemektedir. Öğütme sonrası toz içerisindeki nem ve taşıma sırasındaki şartlara bağlı oluşan segregasyonu büyük oranda engellenmiş olur.

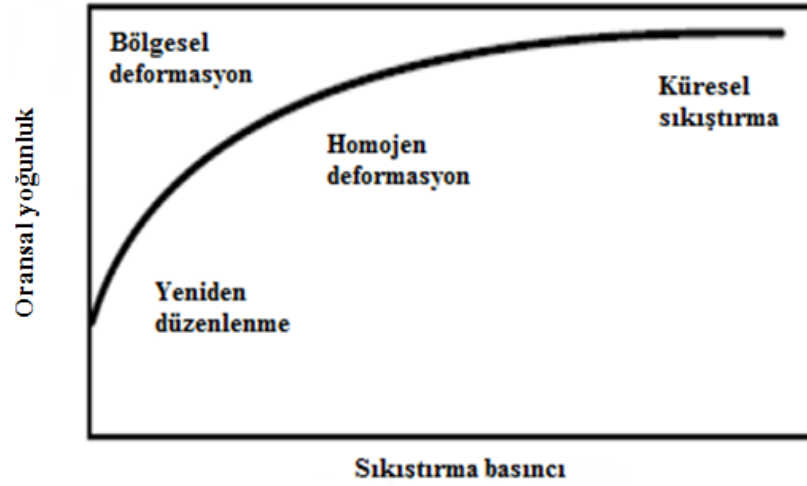
Öğütmenin ilk aşamasında tozlar birbirlerine soğuk kaynaklanır ve bunun sonucunda tozlarda irileşme görülür. Soğuk kaynaklanma aşamasından sonra öğütülen toz malzemelerde deformasyon meydana gelmektedir. Bir süre sonra ise pekleşme nedeniyle kırılmalar meydana gelmekte ve toz boyutunda küçülmeler görülmektedir.

Hacim başına düşen yüzey enerjisi toz parçacık çapıyla ters orantılı olduğundan, küçük toz parçacıkları daha kolay sinterlenmektedir (Boz, 2003).

Öğütme esnasında kullanılan yağlayıcının alaşıma çok küçük miktarda ilave edilmesi yeterli olmaktadır (Demir, 1992). Sıvı yağlayıcılar tozun akma özelliğini bozduğundan dolayı ilave edilen yağlayıcılar çoğunlukla kuru toz şeklindedir (Kayış, 2005).

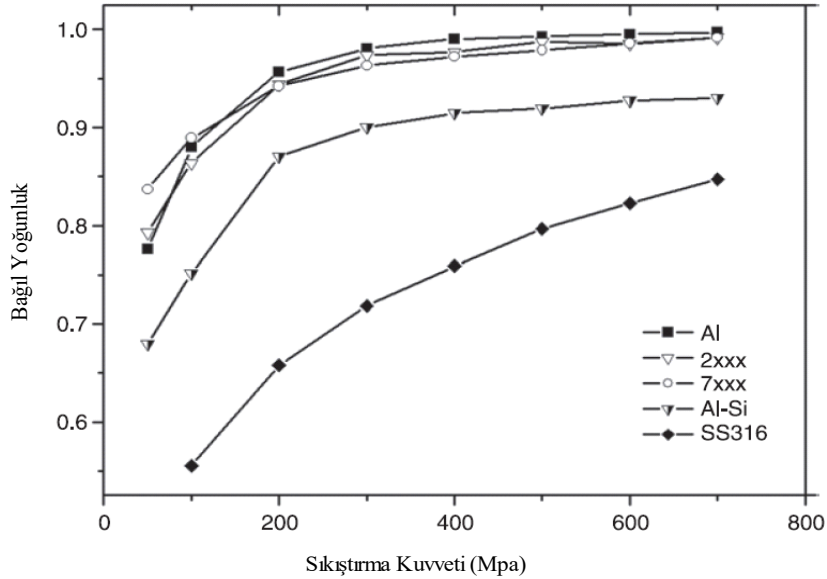
3.4.2. Ön Şekillendirme

Tozları şekillendirmenin en yaygın yöntemi kalıpta sıkıştırma"dır. Kalıpta sıkıştırma, bir tozu istenilen şekle getirmek için alt ve üst zımbalar yardımı ile basınç uygulanarak yapılan sıkıştırma işlemidir. Tozların şekillendirilmesi esnasında parçadaki gözenekler büyük miktarda giderilir ve sinterleme işlemine kadar şeklini koruması sağlanır (Upadhyaya, 2000). Şekillendirme esnasında kullanılan basınca göre gözenek miktarı değişmekte olup, basınç arttıkça gözenek oranı azalmaktadır. Şekil 3.5'te sıkıştırma basıncının yoğunluğa etkisi verilmiştir.



Şekil 3.5. Sıkıştırma basıncı ve yoğunluk arasındaki ilişki (Bradbury, 1986).

Artan sıkıştırma basıncına göre birbirine temas eden toz miktarı ve temas eden yüzey alanı artmaktadır. Parça, sıkıştırma işlemi ile elle tutulabilir bir dayanım kazanır fakat esas dayanım sinterleme işleminden sonra kazanılır (German, 2007). Al-Si alaşımlarında, 350 MPa üzerindeki sıkıştırma basınçlarının yoğunluk artışına etkisi az miktardadır (Dudas and Dean, 1969).



Şekil 3.6. Sıkıştırma basıncının bağıl yoğunluğa etkisi (Dudas and Dean, 1969).

German, sıkıştırmaya yardımcı olması için kalıbın toz yağlayıcılar ile kayganlaştırılabileceğini ve bu kayganlaştırıcı tozun 450°C de yanması gerektiğini

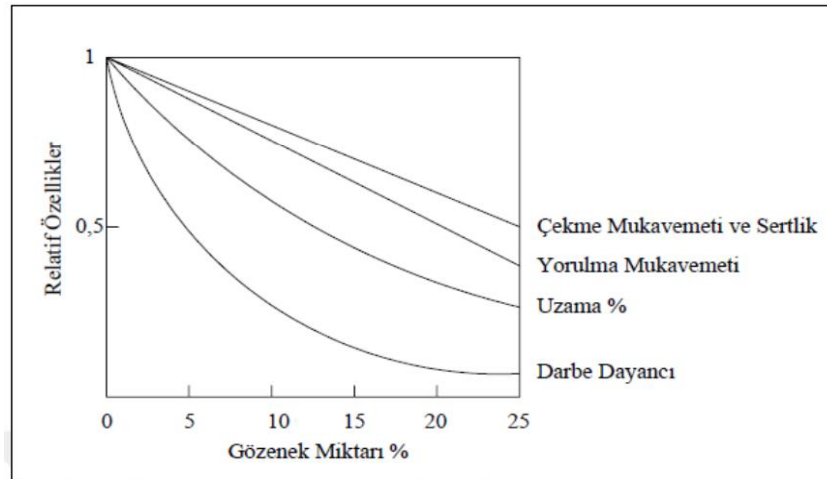
belirtmiştir (German, 1996). Sıkıştırma, genellikle oda sıcaklığında sementit karbür esaslı sertleştirilmiş takım çeliğinden yapılan kalıplarda yapılır (Turan, 2002).

3.4.3. Sinterleme

Metal parçacıkların dayanımını ve sertliğini arttırmak için tozlar arası bağ oluşturma ısıl işlemine sinterleme adı verilir. Modern sinterleme Edison'un tungsten tozlarından lamba filamentlerini yapmasıyla başlamıştır.

Bir ısıl işlem olan sinterleme, toz metalürjisinin en önemli üretim süreçlerinden birisidir. Sinterleme işleminde şekillendirilmiş tozlar belirli bir sıcaklıkta ve belirli bir sürede çeşitli atmosferler altında bekletilmesiyle bağların birbirine bağlanması ve koherent bir kütle dönüşmesi sağlanır.

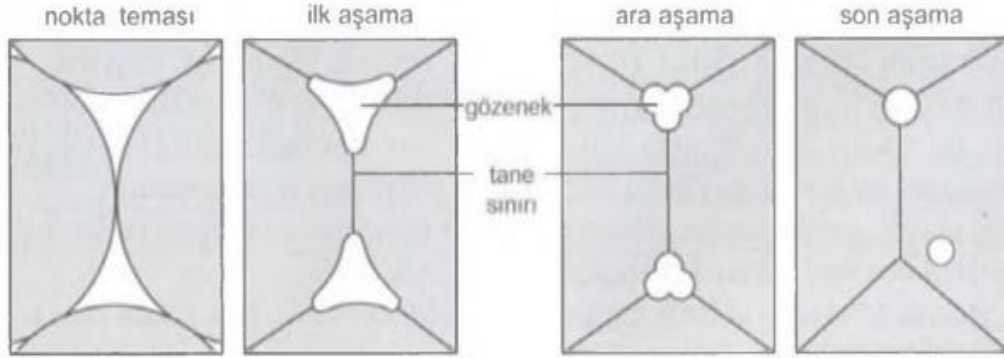
Parçacıklar arasındaki bağlanma mikroyapıda temas eden parçacıklar arasında boyun büyümesi şeklinde görülür. Bu tür boyun büyümesi ham mukavemete oranla mukavemetin artması, gözenek oranının azalması buna bağlı olarak yoğunluğun artması gibi parametrelerin gelişmesini sağlar. Şekil 3.7'de gözenek oranının mukavemet özelliklerine etkisi verilmiştir.



Şekil 3.7. Kalıcı gözenek oranının mukavemet özelliklerine etkisi (TTMD, 2003).

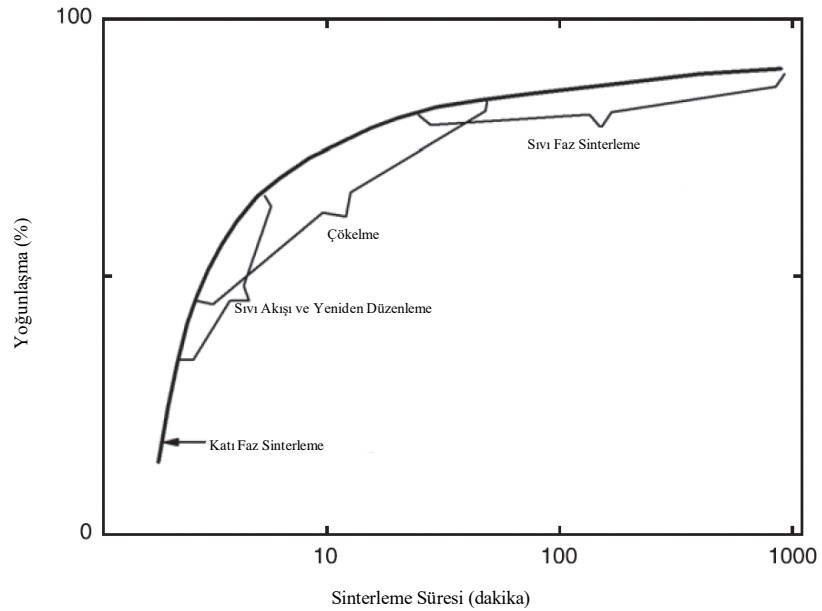
Sıcaklık, sinterleme için önemli bir parametredir (Mehl, 1948). Sinterleme işlemi esnasında bağ oluşumu, kristal kafes sistemi içerisindeki yüksek dayanımlı atomsal

bağlanmaya benzemektedir (Palacı, 2001). Şekil 3.8’de sinterleme aşamaları esnasında parçacıklar arasında oluşan bağ ve buna bağlı olan şekil değişimi verilmiştir.



Şekil 3.8. Sinterleme aşamaları esnasında parçacıklar arasında oluşan bağ oluşumu ve buna bağlı olan şekil değişimi (German, 1996).

Sinterleme süresi arttıkça belirli bir süreye kadar yoğunluk artmaktadır. (German, 1996). Şekil 3.9’da sinterleme süresinin yoğunluğa etkisi verilmiştir.



Şekil 3.9. Sinterleme süresinin yoğunluğa etkisi (German, 1996).

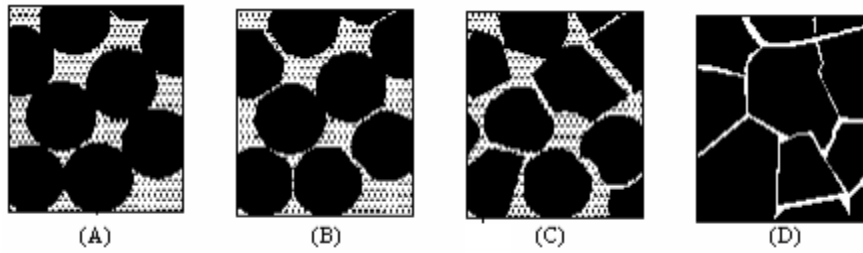
Sinterleme işlemi katı faz sinterleme ve sıvı faz sinterleme olarak iki şekilde yapılabilir.

3.4.3.1. Katı Faz Sinterlemesi

Katı faz sinterleme işlemi genellikle metalin ergime derecesinin %70'i ve % 90'ı arasında yapılır. Sinterleme esnasında hacim korunur ve yüzey enerjisi azalır. Yüzey enerjisinin azalması sonucu son aşamada taneciklerin çapında, yaklaşık 1,26 kat büyüme gerçekleşir. Katı hal sinterlemesinde, birçok aşama ve kütle taşınım mekanizması görülmektedir. Bu mekanizmalar; yüzey difüzyonu, tane sınırı difüzyonu, hacim difüzyonu, plastik akış, viskoz akış ve katı yüzeylerden buhar taşınımı şeklinde olur. Katı hal sinterlemesi dört aşamada meydana gelir;

- Yapışma
- Başlangıç safhası
- Ara aşama
- Son aşama

Şekil 3.10'da katı hal sinterlemesi esnasında gerçekleşen aşamalar görsel olarak verilmiştir.



Şekil 3.10. Katı hal sinterlemesinin aşamaları; a) Yapışma, b) Başlangıç safhası, c) Ara aşama, d) Son aşama (Palacı, 2001).

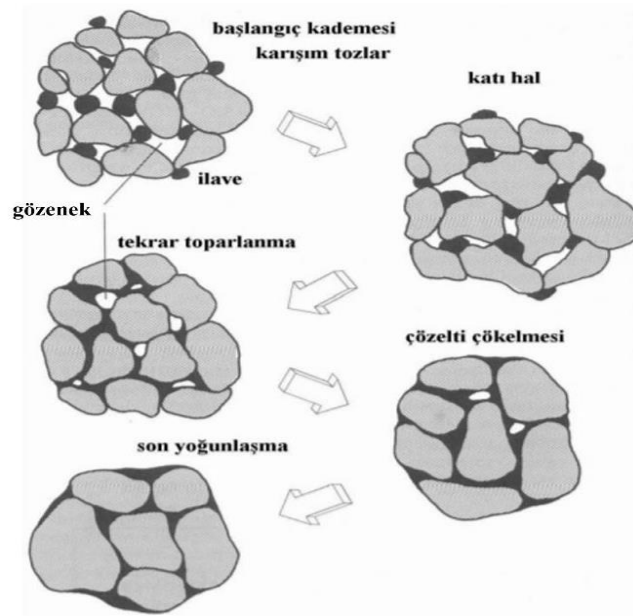
3.4.3.2. Sıvı Faz Sinterlemesi

Sinterleme sıcaklığı, bileşenlerden en az birinin ergime sıcaklığının üzerine olduğu takdirde sıvı faz sinterlemesi gerçekleşir. Bu sinterlemede asıl amaç yüksek yoğunluklar elde etmektir (Kumdalı, 2008). Sıvı faz sinterlemesinde yapıda katıdan

sıvıya dönüşen faz veya fazların olmasından dolayı sinterleme hızı artmaktadır. Sıvılardaki difüzyon hızı, katı hal mekanizmasına göre daha yüksek olduğu için bağlanma ve yoğunlaşma hızlı olmaktadır. Sıvı faz oluşumundan sonra yoğunlaşma, üç aşamada gerçekleşir.

Bunlar;

- Yeniden düzenleme,
- Çözelti-yeniden çökme,
- Son aşama sinterlemesidir.



Şekil 3.11. Sıvı faz sinterlemesi aşamaları (German, 2014).

BÖLÜM 4

MALZEME VE METOT

Bu çalışmada, toz A356 alaşımına ağırlıkça %0.25, %0,5, %1 ve %2 oranlarında Bor ve Nikel elementleri ilavesi yapılarak, toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiştir. Mekanik alaşımlama işleminde toz-bilye oranı 1:10 ve alaşımlama süresi ise 4 saat olarak uygulanmıştır. Mekanik alaşımlama işlemi sonrasında üretilen toz alaşımlar tek yönlü hidrolik pres ile 350 MPa basınç altında şekillendirilmiştir. Şekillendirilen A356/B ve Ni alaşımları, vakumlu (10^{-6} mbar) sinterleme fırınında 600°C sıcaklık altında 1 saat süre ile sinterlenmiştir. Sinterleme sonrası, A356/B ve Ni alaşımları mikro yapısal ve mekanik özellikleri karakterize edilmiştir. A356/B ve Ni alaşımları mikro yapısal özellikleri, yoğunluk, optik, SEM, EDX ve XRD analizi sonuçları ile değerlendirilmiştir. Mekanik özellikler için ise mikro-makro sertlik testi ve aşınma dayanım testi yapılmıştır.

4.1. BAŞLANGIÇ TOZLARI

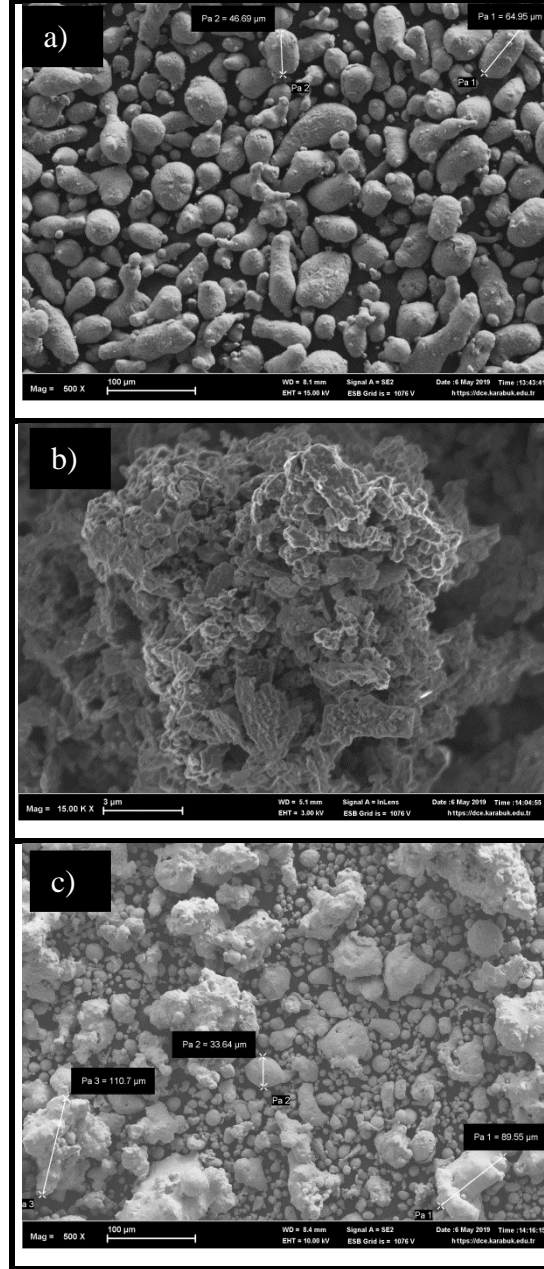
Çalışmada kullanılan A356 alaşımı tozu LPW Technology Ltd (İngiltere) firmasından, Bor tozu Molchem Technology Ltd (İngiltere) firmasından, Nikel tozu ise ME-TOZ (Türkiye) firmasından temin edilmiştir.

Kullanılan A356, Bor ve Nikel tozları MA öncesinde ve sonrasında Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarı'nda bulunan Zeiss marka Ultra/Plus (FEG) model (Şekil 4.12) tarama elektron mikroskopunda incelenmiş ve toz boyutları ölçülmüştür.

Çizelge 4.1. A356 alüminyum tozu kimyasal bileşimi.

Element	Si	Mg	Mn	Fe	Ti	Zn	Al
% Ağırlık	6,63	0,32	0,57	0,17	0,09	0,02	Kalan

Şekil 4.1’de mekanik alaşımlama öncesi tozlara ait SEM görüntüleri ve boyut analizleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde; A356 alaşımının hemen hemen küresel, Bor elementinin süngerimsi ve topaklanmış, Nikel elementinin ise süngerimsi şekilde olduğu görülmüştür.



Şekil 4.1. Mekanik alaşımlama öncesi tozlara ait SEM görüntüleri ve boyut analizleri
a) A356, b) Bor, c) Nikel.

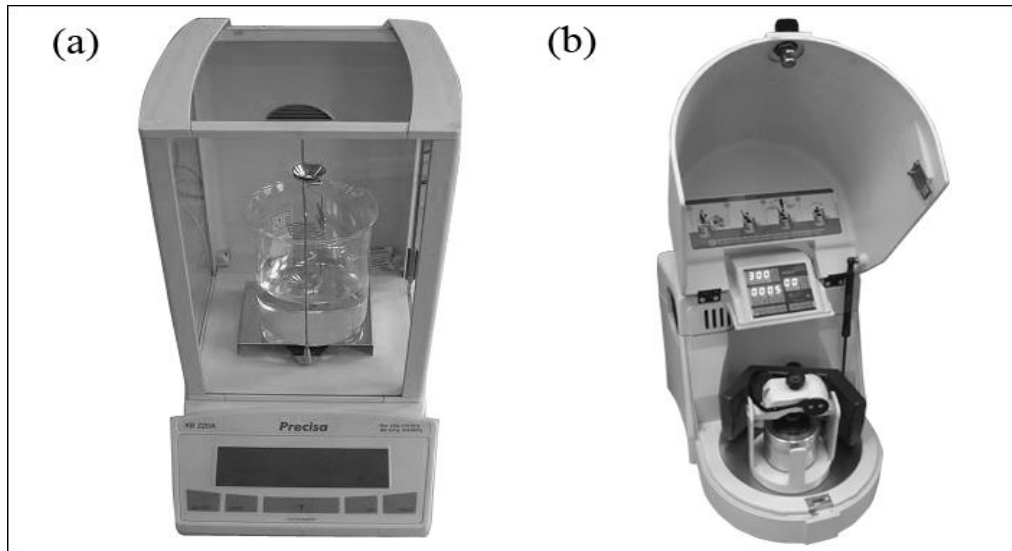
Çizelge 4.2’de başlangıç tozlarına ait EDX analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 4.2. Başlangıç tozlarına ait EDX analiz sonuçları.

Alaşım	Al	Si	Mg	Fe	C	O	B	Ni
A356	92,15	6,79	0,89	0,17				
Bor					35,7	3,59	60,71	
Nikel					3,57	2,27		94,16

4.2. MEKANİK ALAŞIMLAMA

Alaşım 40 gram toz ve yağlayıcı olarak %1 stearik asit 1/10000 g hassasiyete sahip Precisa XB200h marka hassas terazide (Şekil 4.2 (a)) tartılmıştır. Hazırlanan bileşimler Fritsch Pulverisette marka planeter tip mekanik alaşımlama cihazında (Şekil 4.2 (b)) mekanik alaşımlandırılmıştır.



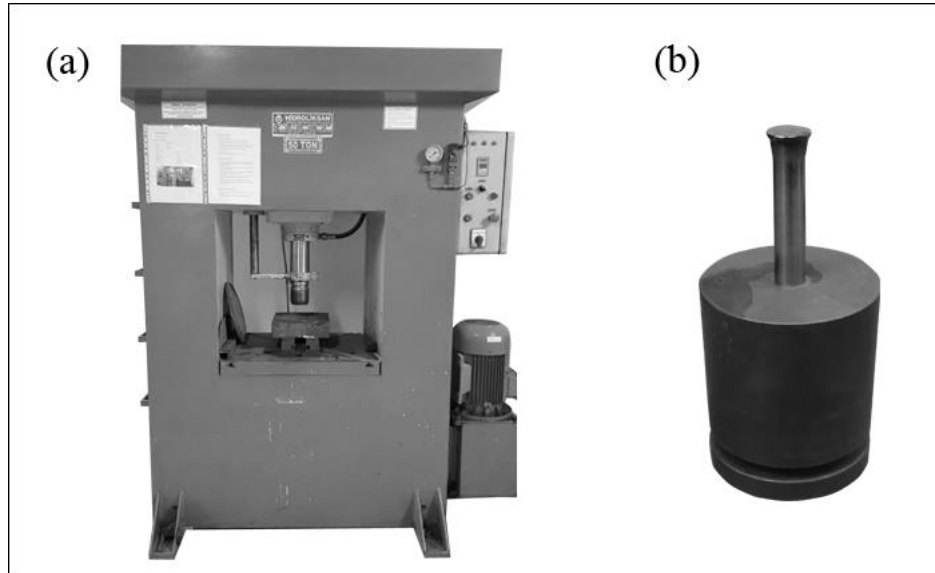
Şekil 4.2. a) Precisa XB200h marka terazi ve b) Fritsch Pulverisette marka planeter tip mekanik alaşımlama cihazı.

Mekanik alaşımlama işleminde; paslanmaz çelik kap, 1:10 toz/bilye oranı, 6 mm çapındaki paslanmaz çelik bilye ve 300 dev/dk alaşımlama hızı kullanılmıştır. Hazırlanan alaşımlar 4 saat mekanik alaşımlama işlemine tabi tutulmuştur. Mekanik alaşımlama esnasında tozların aşırı ısınmasını engellemek amacıyla her bir saat alaşımlama sonrasında 30 dakika ara verilmiştir.

Al ve al alaşımı toz partiküllerin, sünek özelliğinden dolayı, mekanik alaşımlama aşamasında toz partiküllerin öğütme süresine bağlı olarak ilk olarak ezilerek, yassılaştığı fakat ilerleyen mekanik alaşımlama süresi ile kırılma ve incelmesi ardından birbirine yapıştığı bilinmektedir (Suryanarayana, 2001). Bu aşamada gerçekteşen kırılma sonrasında birbirine yapışan toz partikülleri arasında oksijen içeriği yüksek bölgeler oluşmaktadır. Özellikle sinterleme aşamasında toz partikülleri tane sınırlarındaki oksijen miktarının toz partiküllerin difüzyonunu güçleştirdiği ve olumsuz etkilediği düşünölmektedir.

4.3. ÖN ŞEKİLLENDİRME

Mekanik alaşımlama ile üretilen tozlar, soğuk presleme yöntemi ile Ø10x10 mm boyutlarında, 350 MPa kuvvet altında 1 dakika süre ile preslenmiştir. Presleme işlemi, K.B.Ü. Teknoloji Fakölteesi, İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan Hidroliksan marka pres kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4.3'te Şekillendirme işleminde kullanılan hidrolik pres ve kalıp verilmiştir. Numunelerin kalıptan sıyrılması için çinko stearat seçilmiştir. Kullanılan çinko stearat bir fırça yardımı ile kalıp ve zımba yüzeyine sürölmüştür.



Şekil 4.3. Çalışmada kullanılan a) pres ve b) tek yönlü pres kalıbı.

4.4. SİNERLEME

Soğuk presleme ile ön şekillendirilen numuneler, K.B.Ü. Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan vakumlu ısıl işlem fırınında (Şekil 4.4) sinterlenmiştir.



Şekil 4.4. Sinterleme fırını.

Al_2O_3 numune altlıkları kullanılarak numuneler fırına yerleştirilmiştir. Sinterleme işlemi $4^\circ C/dk$ ısıtma/soğutma hızı ile $600^\circ C$ sıcaklıkta 1 saat süre ile vakum (10^{-6} mbar) altında yapılmıştır. 1 saat sinterleme işlemi sonunda fırın sıcaklığı $100^\circ C$ ye düşürülmüş ve $100^\circ C$ 'de 10 dakika beklenildikten sonra fırının oda sıcaklığına düşmesi beklenilmiştir. Oda sıcaklığına düşen fırından numuneler çıkarılmıştır.

4.5. BOR VE NİKEL KATKILI A356 ALAŞIMLARININ KARAKTERİZASYONU

Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen farklı oranlarda B ve Ni içeren A356 alaşımlarının karakterizasyon testleri için; Optik mikroskop, SEM-EDX, yoğunluk testi, sertlik testi, XRD testi ve aşınma testleri yapılmıştır.

4.5.1. Metalografik İşlemler ve Optik Mikroskop

Metalografi incelemeleri için numuneler ASTM E3-11 standardına uygun olarak hazırlanmıştır. Numuneler, soğuk gömme ile bakalite alınmıştır. Zımparalama ve polisaj işlemlerinde K.B.Ü. İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan PRESI MECAPOL P 262 model polisaj cihazı kullanılmıştır. Zımparalama işlemi tamamlanan numuneler, parlatma cihazında Metkom marka 6 µm elmas pasta ve 6 µm yağlayıcı ile parlatılmıştır. Keller solüsyonu ile 40-45 saniye dağlanmıştır. Şekil 4.5'te zımparalama ve polisaj cihazın görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5. Zımparalama ve polisaj cihazı.

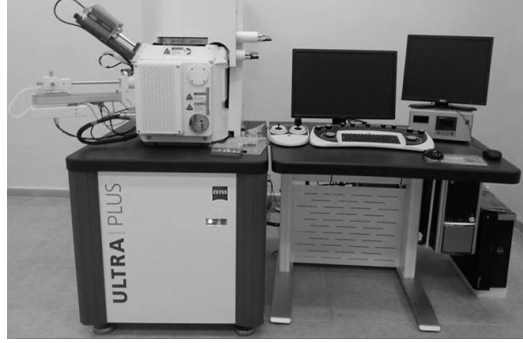
Metalografik işlemler sonucunda hazırlanan numunelerin optik mikroskop incelemeleri K.B.Ü, Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan MEIJI marka optik mikroskop ve MSQ PLUS 6.5 görüntü analiz programı ile yapılmıştır. Şekil 4.6'da mikro yapı incelemelerin yapıldığı optik mikroskop verilmiştir.



Şekil 4.6. Optik mikroskop.

4.5.2. Taramalı Elektron Mikroskop (SEM+EDX) İncelemeleri

Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarı'nda bulunan Zeiss marka Ultra/Plus (FEG) model (Şekil 4.7) tarama elektron mikroskobunda (SEM), mikro yapı, EDX ve aşınma yüzeyi SEM incelemeleri yapılmıştır. SEM görüntüleri üzerinden MSQ Plus yazılımı ile alaşımların tane boyutu belirlenmiştir.



Şekil 4.7. SEM + EDX incelemelerinin yapıldığı tarama elektron mikroskobu.

4.5.3. Yoğunluk Ölçümleri

Yoğunluk ölçümleri Arşimet Prensiğine göre yapılmıştır. Ölçümlerde K.B.Ü. Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölümü laboratuvarında bulunan 220 g maksimum ölçüm kapasiteli, 1/10000 g hassasiyete sahip Precisa XB200h yoğunluk ölçüm cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.8'de yoğunluk kitine sahip hassas terazi verilmiştir. Yoğunluk ölçümleri için numuneler 45 dakika boyunca suda bekletilmiştir.



Şekil 4.8. Yoğunluk ölçüm cihazı.

4.5.4. Sertlik Testleri

Sertlik ölçümleri, mikro ve makro olmak üzere iki farklı türde yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri K.B.Ü. Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan “SHIMADZU” marka mikro sertlik ölçüm cihazında yapılmıştır. Sertlik ölçümleri HV 0,2 ile 10 saniye süre ile yapılmıştır. Mikro sertlik ölçümleri için her numuneden 3 değer alınmış ve ortalamaları kullanılmıştır. Şekil 4.9’da çalışmada kullanılan mikro sertlik cihazı verilmiştir.



Şekil 4.9. Mikro sertlik cihazı.

Makro sertlik ölçümleri için ise Karabük Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan AFFRI marka Brinell sertlik cihazı kullanılmıştır. Makro sertlik ölçümleri 2,5 mm çelik bilye ve 31,25 kg/f kuvvet ile yapılmıştır. Makro sertlik ölçümleri için her numuneden 3 değer alınmış ve ortalamaları kullanılmıştır. Şekil 4.10’da kullanılan makro sertlik cihazı verilmiştir.



Şekil 4.10. Makro sertlik cihazı.

4.5.5. XRD Testleri

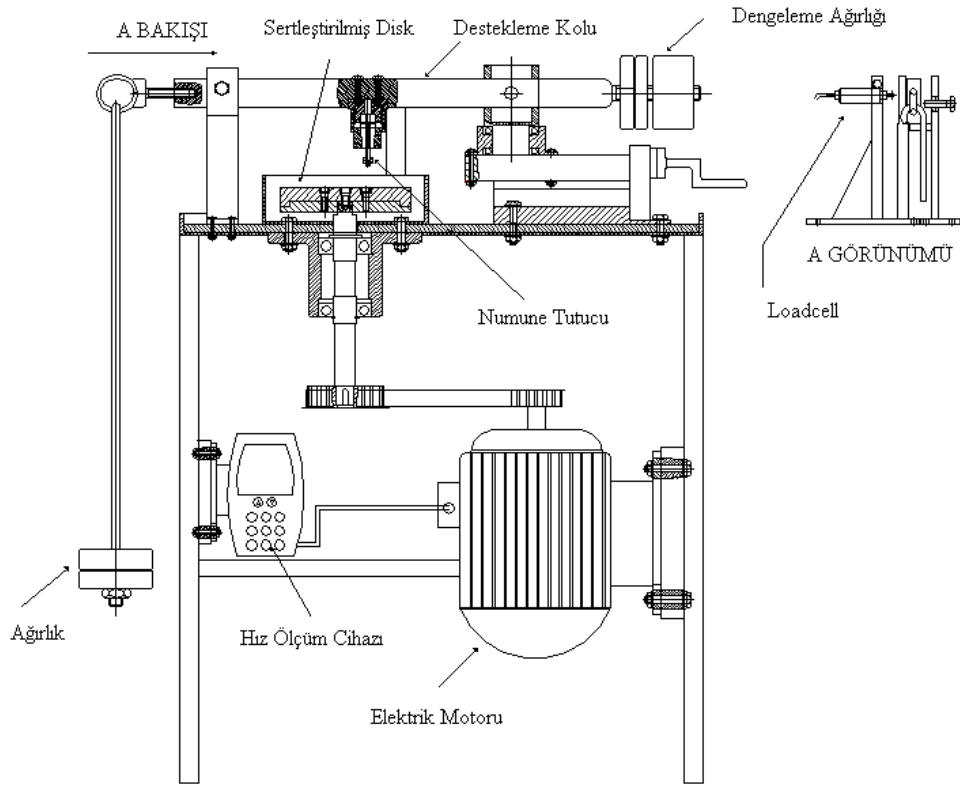
Oluşan fazların tespiti amacıyla Karabük Üniversitesi, Demir Çelik Enstitüsü, MARGEM Laboratuvarı'nda bulunan Rigaku marka XRD cihazında X-ışını kırınımı (XRD) cihazı kullanılmıştır. Şekil 4.11'de XRD cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.11. XRD cihazı.

4.5.6. Aşınma Testleri

Aşınma testleri, K.B.Ü. Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği bölümü laboratuvarında bulunan ASTM: G99-05 standartlarında, pin-on-disk tipi aşınma test cihazında yapılmıştır. Aşınma testleri oda sıcaklığında, 1 m/s kayma hızında, iki farklı yük (10 ve 20N) ve 4 farklı kayma mesafesinde (500, 1000, 1500 ve 2000 m) yapılmıştır. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü Şekil 4.12'de verilmiştir.



Şekil 4.12. Aşınma test cihazı şematik görünümü.

BÖLÜM 5

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR

Bu çalışmada, toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Bor ve Nikel katkılı A356 alaşımının mekanik özellikleri ve mikroyapısı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar; mikro yapı incelemeleri, XRD ve EDX incelemeleri, yoğunluk, mikro-makro sertlik, aşınma testi sonuçları ve değerlendirmesi başlıkları altında verilmiştir.

5.1. M.A. ÖNCESİ TOZ PARTİKÜLLERİN KARAKTERİZASYONU

Şekil 4.1’de mekanik alaşımlama öncesi tozlara ait SEM görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri ile yapılan analizlere göre; A356 alaşımı küresel şekilde ve toz boyut aralığı 47-65 µm, Bor elementinin süngerimsi ve topaklanmış şekilde, Nikel elementinin ise süngerimsi şekilde ve toz boyut aralığının 34-110 µm olduğu görülmüştür.

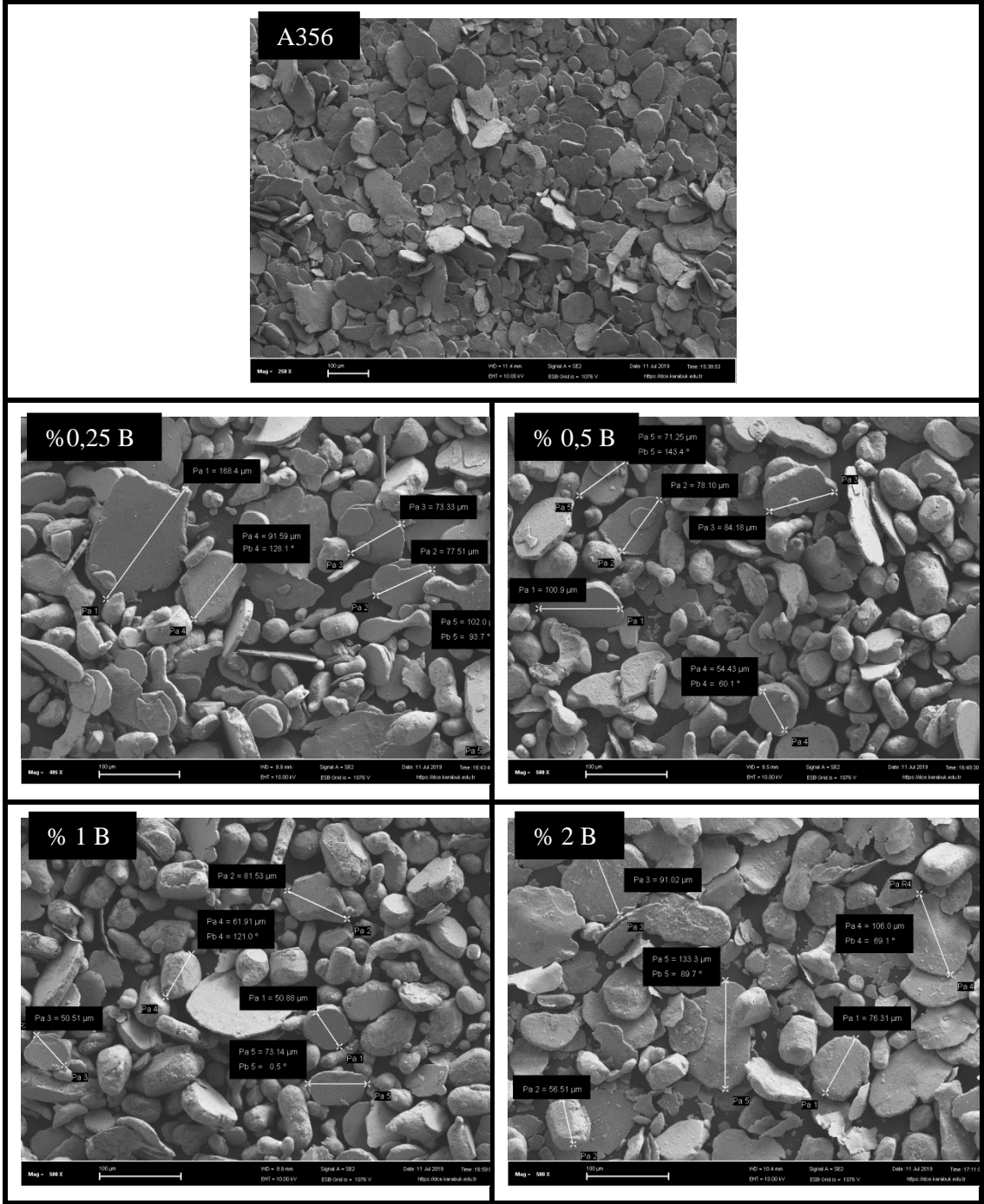
5.2. M.A. SONRASI TOZ PARTİKÜLLERİN KARAKTERİZASYONU

Bor ilave edilen alaşımların mekanik alaşımlama işlemi sonrasında toz taneciklerinde deformasyon sonucu oluşan boyutsal ve şekilsel değişimi anlamak için alınan SEM görüntüleri ve toz boyut analizleri Şekil 5.1’de verilmiştir.

A356 alaşımı toz tanecikleri, mekanik alaşımlama metodu ile üretildiğinde başlangıçta küresel olan tozların bilye-bilye ve kap cidarı-bilye arasında ezilerek deformasyona uğradığı ve yassılaştığı görülmektedir (Şekil 5.1). Bunun sebebi matris malzemesi olarak kullanılan A356 alaşımı tozların sünek olmasıdır. Toz taneciklerin yaklaşık 30-100 µm aralığında olduğu görülmüştür.

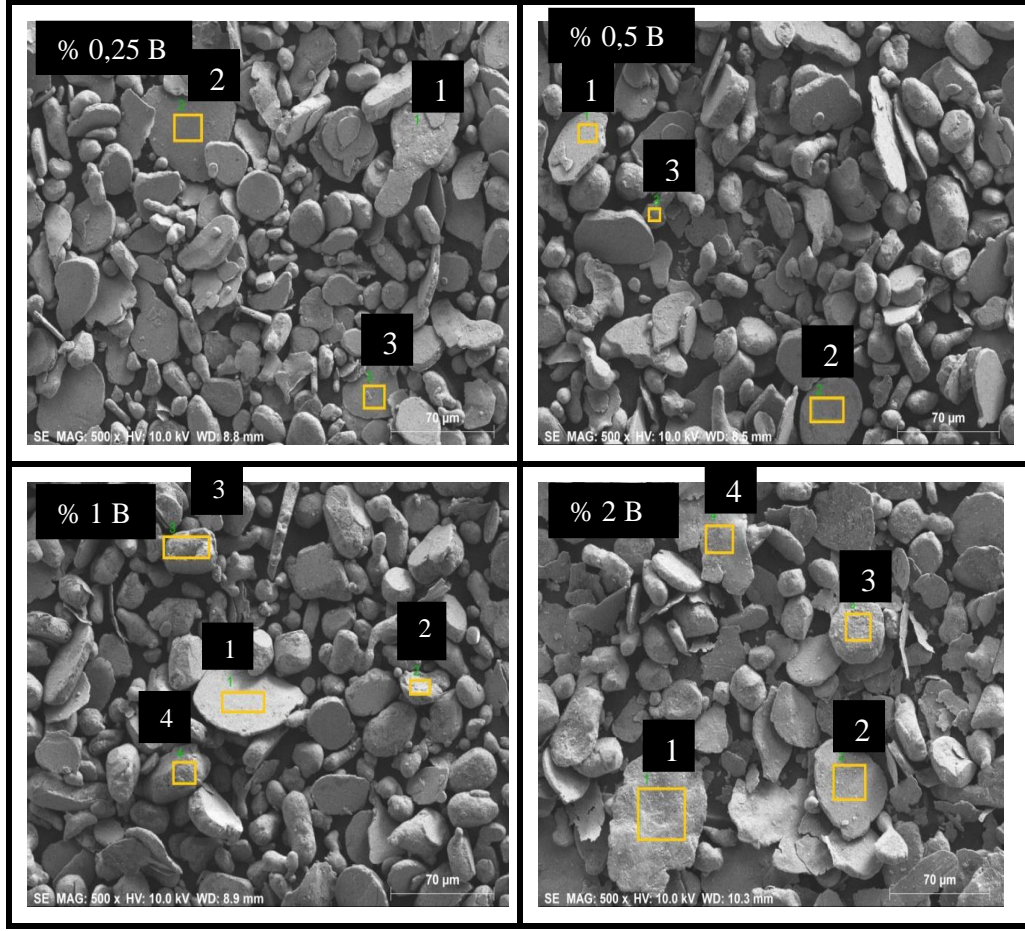
Büyük ve geniş yüzey alanına sahip yassı toz taneciklerin dış cidarlarında, alaşımlama sırasında yüksek enerjiden kaynaklanan deformasyon ile çatlama ve parçalanmalar olduğu belirlenmiştir. Bor toz partikülleri, A356 alaşımı toz partiküllerine göre daha küçük ve serttir. Pul şeklindeki A356 toz partiküllerin yüzey alanının artması B toz partiküllerinin yapışması için uygun bölgelerin artmasını sağlamıştır. B toz partikülleri pul şeklindeki A356 toz partikülleri ile birbirine yapıştığı (Şekil 5.1) ve mekanik alaşımlama ile tane içine doğru yoğunlaşarak deformasyonu hızlandırdığı düşünülmektedir.

Şekil 5.1 incelendiğinde mekanik alaşımlama sonrası %0,25 B alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 73-168 μm , %0,5 B alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 54-101 μm , %1,0 B alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 50-81 μm ve %2,0 B alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 56-133 μm civarında olduğu görülmüştür. Sonuç olarak, B ile alaşımlanan A356 toz tanecikleri SEM görüntüleri dikkate alındığında toz boyut ve şeklinin hemen hemen birbirine benzer olduğu, boyutsal ve şekilsel anlamda farklılık göstermediği belirlenmiştir.



Şekil 5.1. A356/xB alaşımı toz tanecekleri, mekanik alaşımlama sonrası SEM görüntüleri ve boyut analizleri.

A356/xB alaşımı toz tanecekleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz bölgeleri Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2. A356/xB alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz bölgeleri.

A356/xB alaşım tozlarının mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz sonuçları Çizelge 5.1’de verilmiştir.

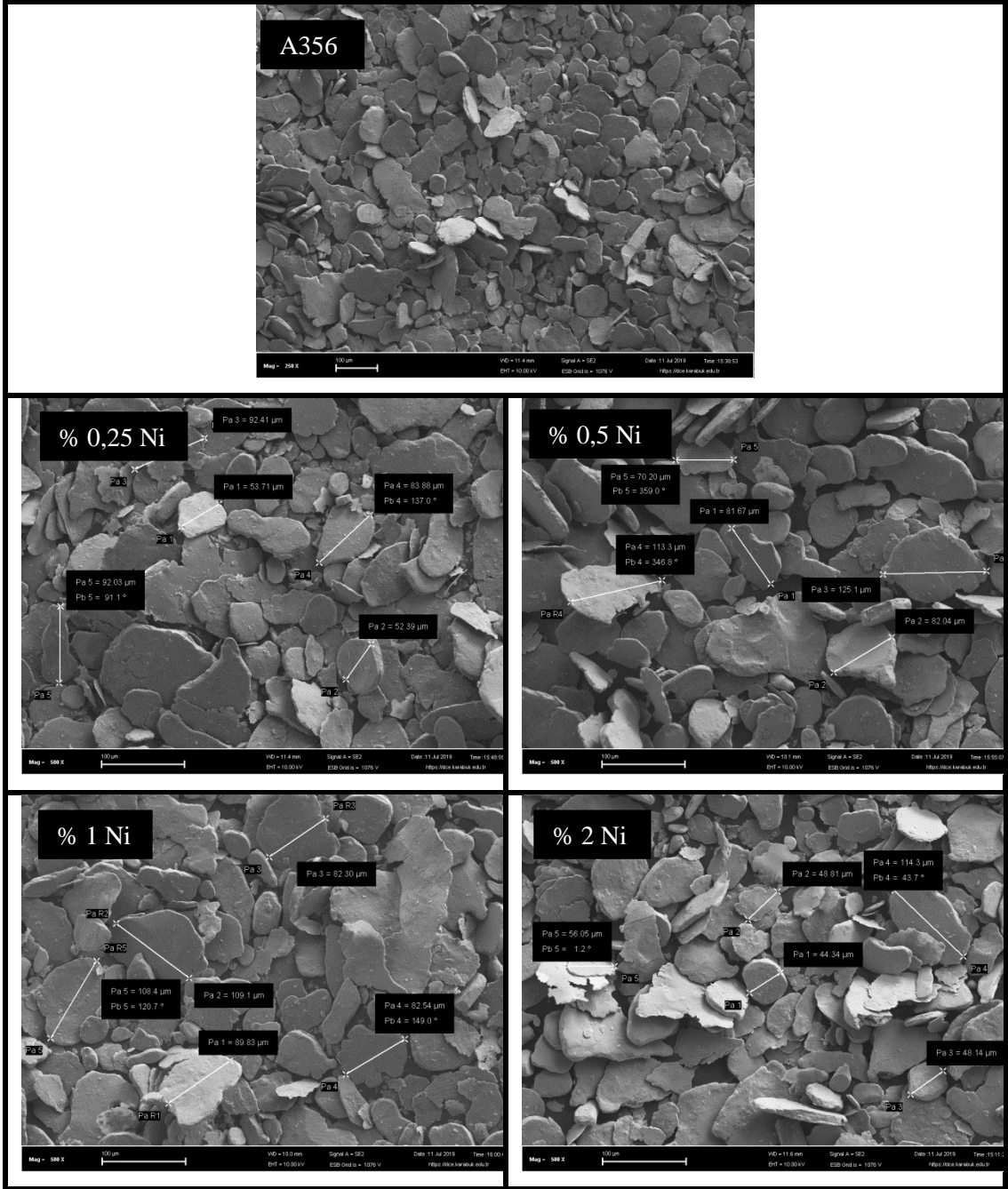
Çizelge 5.1. A356/xB alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz sonuçları.

Alaşım	Konum	Element (%)				
		Al	Si	Mg	Fe	B
0.25 B	1	61,76	6,10	0,67	1,60	29,86
	2	79,65	6,74	0,71	0,35	12,54
	3	75,90	7,04	0,65	0,63	15,78
0.50 B	1	61,84	6,67	0,58	1,25	29,66
	2	69,79	6,36	0,65	1,85	21,35
	3	68,18	7,64	0,66	3,21	20,31
1.0 B	1	66,65	6,99	0,63	0,51	25,33
	2	34,67	4,02	0,57	4,77	55,97
	3	45,28	4,07	0,61	3,67	46,37
	4	46,38	6,09	0,67	4,63	42,22
2.0 B	1	57,62	5,15	0,62	3,73	32,88
	2	47,99	4,25	0,87	5,77	41,12
	3	28,52	2,73	1,32	9,88	57,55
	4	55,43	5,33	0,72	4,47	34,05

Nikel ilave edilen alaşımların mekanik alaşımlama işlemi sonrasında toz taneciklerinde deformasyon sonucunda oluşan boyutsal ve şekilsel değişimi anlamak için alınan SEM görüntüleri ve toz boyut analizleri Şekil 5.3'te verilmiştir.

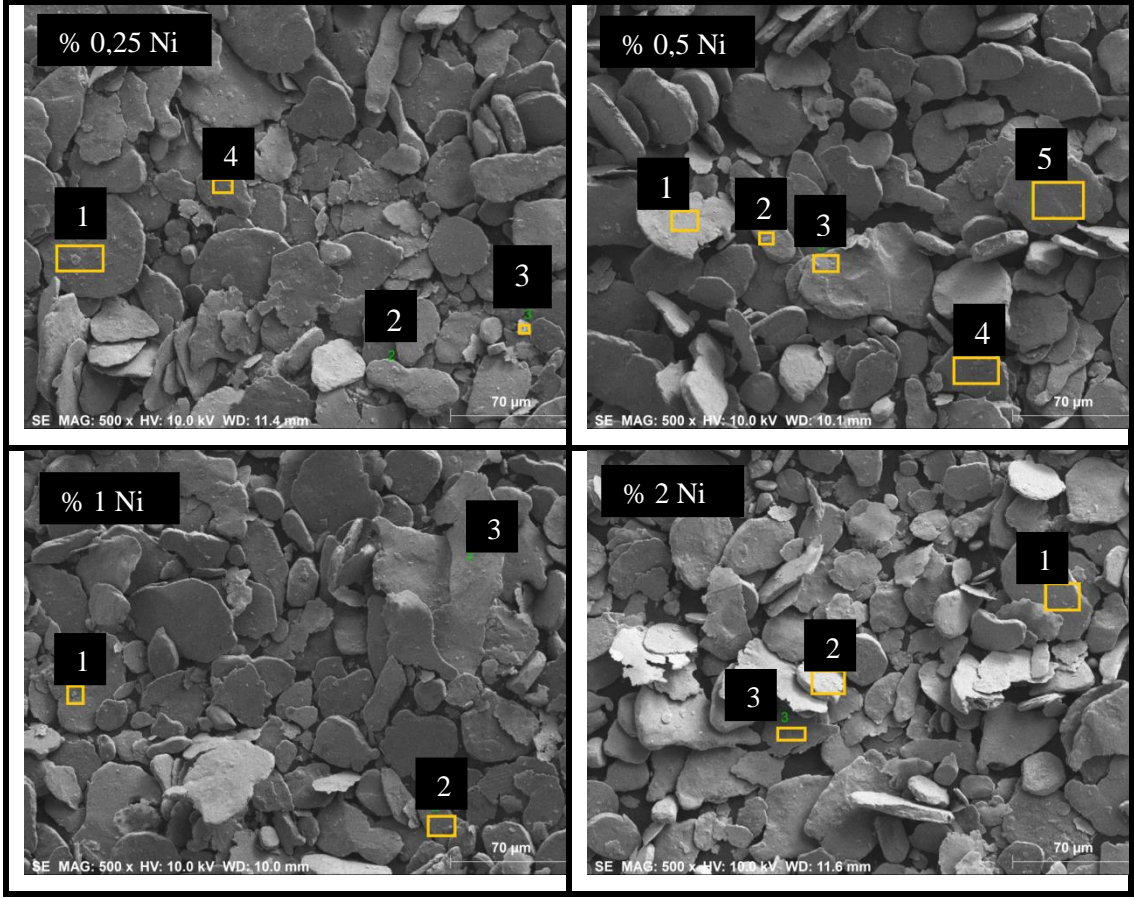
A356 alaşımı toz taneciklerin Nikel toz taneciklerine nazaran daha büyük olmasından dolayı Nikel toz taneciklerinin, A356 toz taneciklerinin deformasyona uğradığı esnada yüzeyine yapıştığı ve deformasyonun ilerlemesi ile A356 toz taneciklerinin içine doğru yoğrulduğu düşünülmektedir.

Mekanik alaşımlama sonrasında, %0,25 Ni alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 52-92 μm , %0,5 Ni alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 70-125 μm , %1,0 Ni alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 82-109 μm ve % 2.0 Ni alaşımlı A356 alaşımı toz boyut aralığı 44-114 μm civarındadır. Sonuç olarak, Ni ile alaşımlanan A356 toz tanecikleri SEM görüntüleri dikkate alındığında toz boyut ve şeklinin hemen hemen birbirine benzer olduğu boyutsal ve şekilsel anlamda farklılık göstermediği belirlenmiştir.



Şekil 5.3. A356/xNi alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası SEM görüntüleri ve boyut analizleri.

Nikel ilave edilen alaşımların EDX analiz bölgeleri Şekil 5.4’de ve EDX analiz sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.4. A356/xNi alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz bölgeleri.

A356/xNi alaşım tozlarının mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz sonuçları Çizelge 5.2’de verilmiştir.

Çizelge 5.2. A356/xNi alaşımı toz tanecikleri mekanik alaşımlama sonrası EDX analiz sonuçları.

Alaşım	Konum	Element (%)				
		Al	Si	Mg	Fe	Ni
0.25 Ni	1	90,25	8,10	0,81	0,48	0,36
	2	88,88	8,80	0,85	1,04	0,44
	3	20,59	1,92	0,59	0,00	76,91
	4	89,17	8,82	0,80	0,76	0,46
0.50 Ni	1	89,29	9,23	0,89	0,06	0,53
	2	89,16	9,52	0,74	0,00	0,59
	3	89,44	8,68	0,88	0,54	0,46
	4	92,96	5,89	0,68	0,47	0,00
	5	92,08	6,43	0,92	0,48	0,10
1.0 Ni	1	90,19	8,62	0,79	0,00	0,40
	2	91,31	7,50	0,77	0,14	0,27
	3	90,55	8,29	0,74	0,10	0,31
2.0 Ni	1	88,81	10,15	0,76	0,00	0,29
	2	87,94	10,91	0,69	0,00	0,46
	3	95,74	1,52	0,85	1,79	0,11

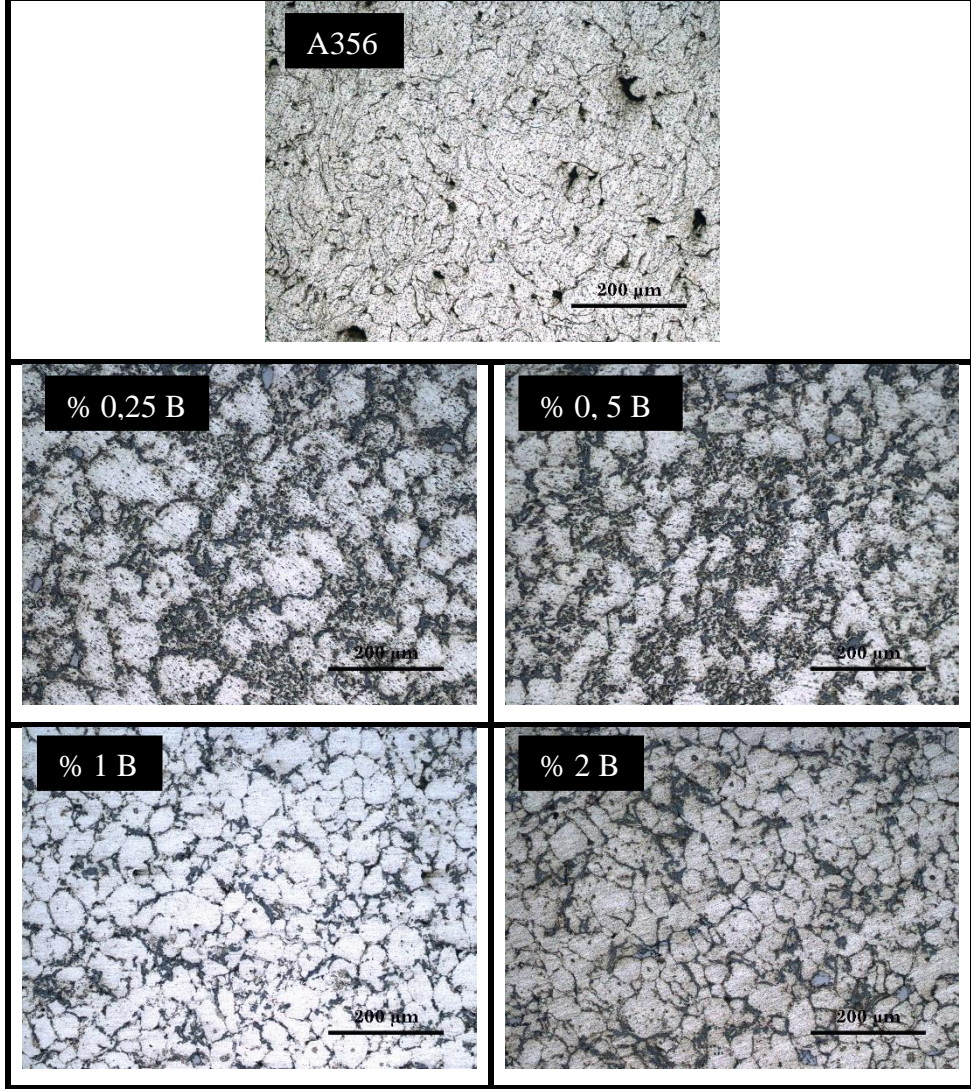
5.3. OPTİK MİKROSKOP (OM) GÖRÜNTÜLERİ

A356/xB alaşımlarının sinterleme sonrası OM görüntüleri Şekil 5.5'te verilmiştir. OM görüntülerinde A356 tozlarının B ilavesine bağlı olarak mikroyapıdaki; porozite miktarları, tane ve tane sınırları, ayrıca özellikle tane boyutları ve şekilleri dikkat çekicidir.

Yüksek enerjili bilyeli öğütme hücresinde deforme olmuş yassı A356 toz taneciklerin tek yönlü soğuk presleme esnasında sıkıştırılması ve daha sonra sinterlenmesi sonucunda tozların, elipsel plaka şeklindeki taneleri oluşturduğu görülmektedir.

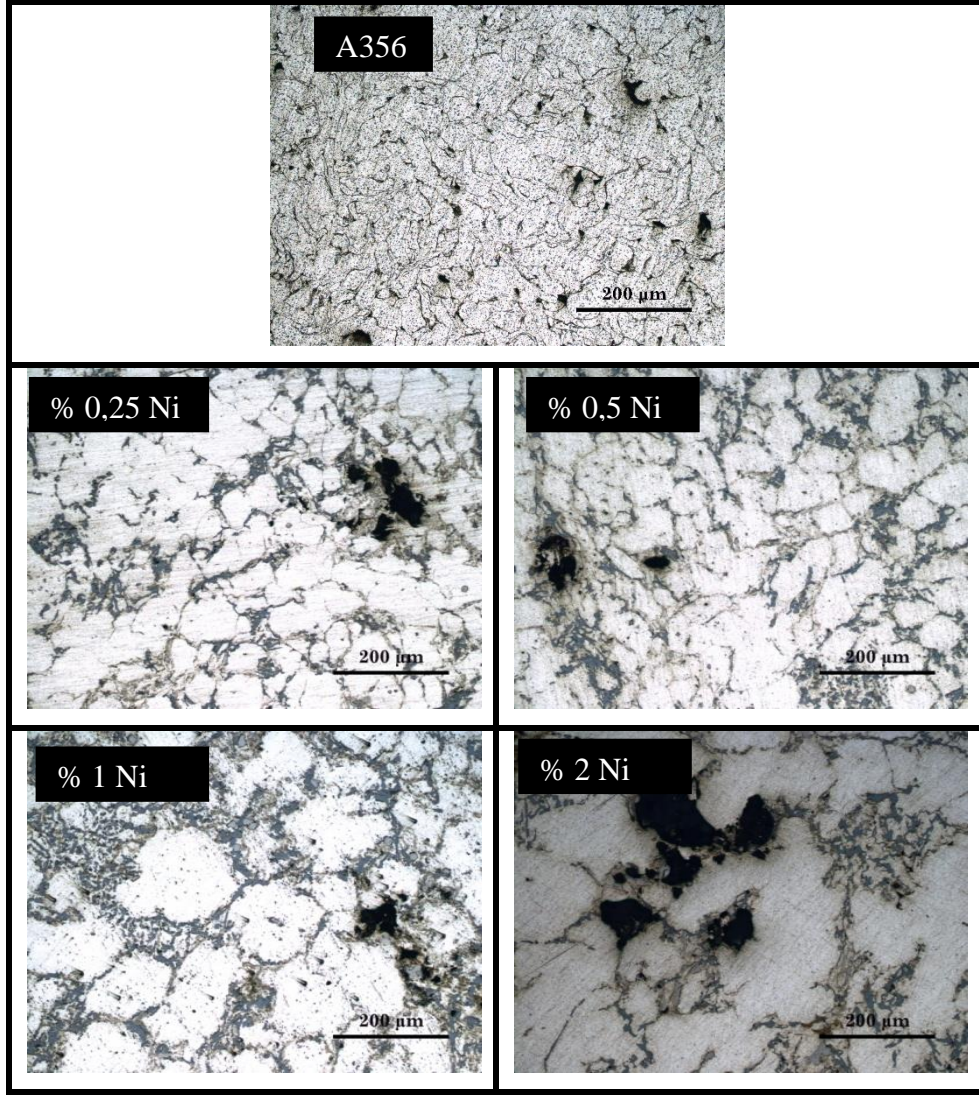
Sinterleme sıcaklığına ve süresine bağlı olarak toz taneciklerin birbirine temas ettiği noktalardan difüzyon mekanizması sonucu boyun verdiği ve tane sınırlarını oluşturduğu bilinmektedir. Ayrıca sinterleme sırasında oluşan poroziteler, sinterleme işlemi ile toz taneciklerin temas edemediği yüzeylerde, tane sınırı boyunca küresel şekilde karşımıza çıkmaktadır. A356/xB alaşımlarının Bor miktarının artmasıyla, Bor ile alaşımlanmayan A356 alaşımına nazaran daha küresel ve homojen bir şekilde geliştiği görülmüştür. OM altında 5 farklı bölgeden 2 farklı görüntü üzerinden

görüntü işleme analiz programı yardımı ile porozite miktarı, tane ve tane sınırları alanları hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.13, 5.14, 5.15'te verilmiştir.



Şekil 5.5. A356/xB alaşımlarının sinterleme sonrası OM görüntüsü.

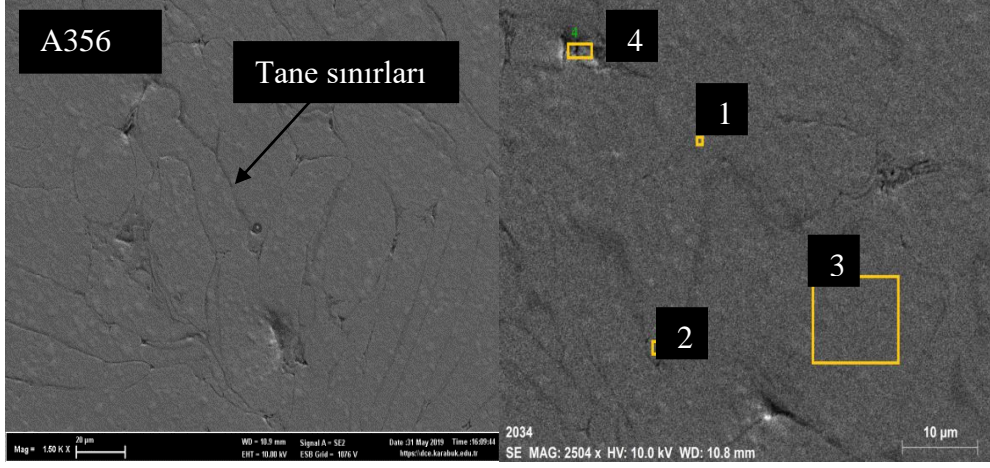
A356/xNi alaşımlarının sinterleme sonrası OM görüntüleri Şekil 5.6'da verilmiştir. OM altında 5 farklı bölgeden 2 farklı görüntü üzerinden görüntü işleme analiz programı yardımı ile porozite miktarı, tane ve tane sınırları alanları hesaplanmıştır. Sonuçlar Şekil 5.16, 5.17, 5.18'de verilmiştir.



Şekil 5.6. A356/xNi alaşımlarının sinterleme sonrası OM görüntüsü.

5.4. TARAMA ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ VE TARTIŞMALAR

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Bor ve Nikel katkılı A356 alaşımlarının karakterizasyonu için Tarama Elektron Mikroskobu (SEM) incelemeleri, EDX analizleri ve SEM harita görüntüleri incelenmiştir. Şekil 5.7’de sinterleme sonrası A356 alaşımına ait SEM görüntüsü verilmiştir. Şekil 5.7 incelendiğinde tane sınırlarında oksitlenmelerin meydana geldiği görülmektedir.



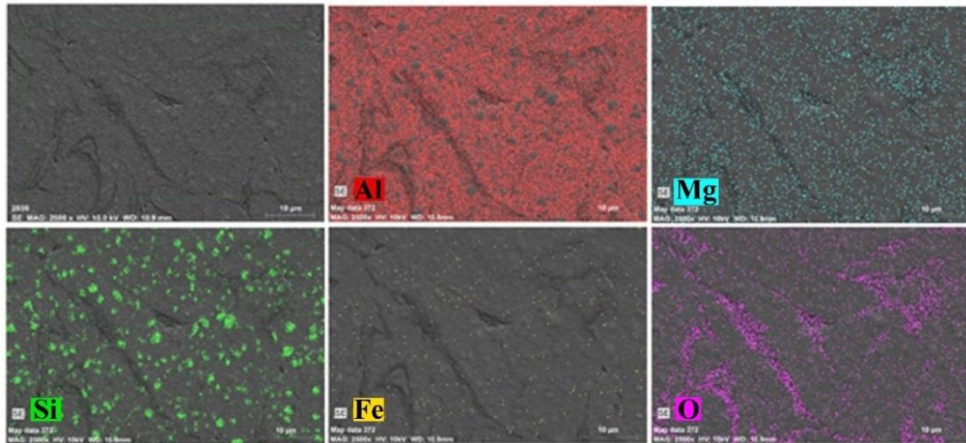
Şekil 5.7. Sinterleme sonrası A356 alaşımı SEM görüntüleri.

Çizelge 5.3'te sinterleme sonrası A356 alaşımının EDX analiz sonuçları verilmiştir.

Çizelge 5.3. A356 EDX analiz sonuçları.

Konum	Al	Si	Mg	Fe	O
1	10,10	88,79	0,10	-	1,00
2	95,06	0,14	0,95	-	3,85
3	89,69	7,40	0,43	0,36	2,12
4	76,04	1,83	1,90	1,25	18,98

Şekil 5.8'de A356 alaşımının SEM haritalama görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.8 incelendiğinde Al matris üzerinde Si tanecikleri belirgin olarak görülmektedir. Mg ve Fe elementlerinin matriste homojen dağıldığı ayrıca A356 toz parçacıkları yüzeyleri arasında (tane sınırlarında) oksitlenmenin olduğu net bir şekilde belirlenmiştir.

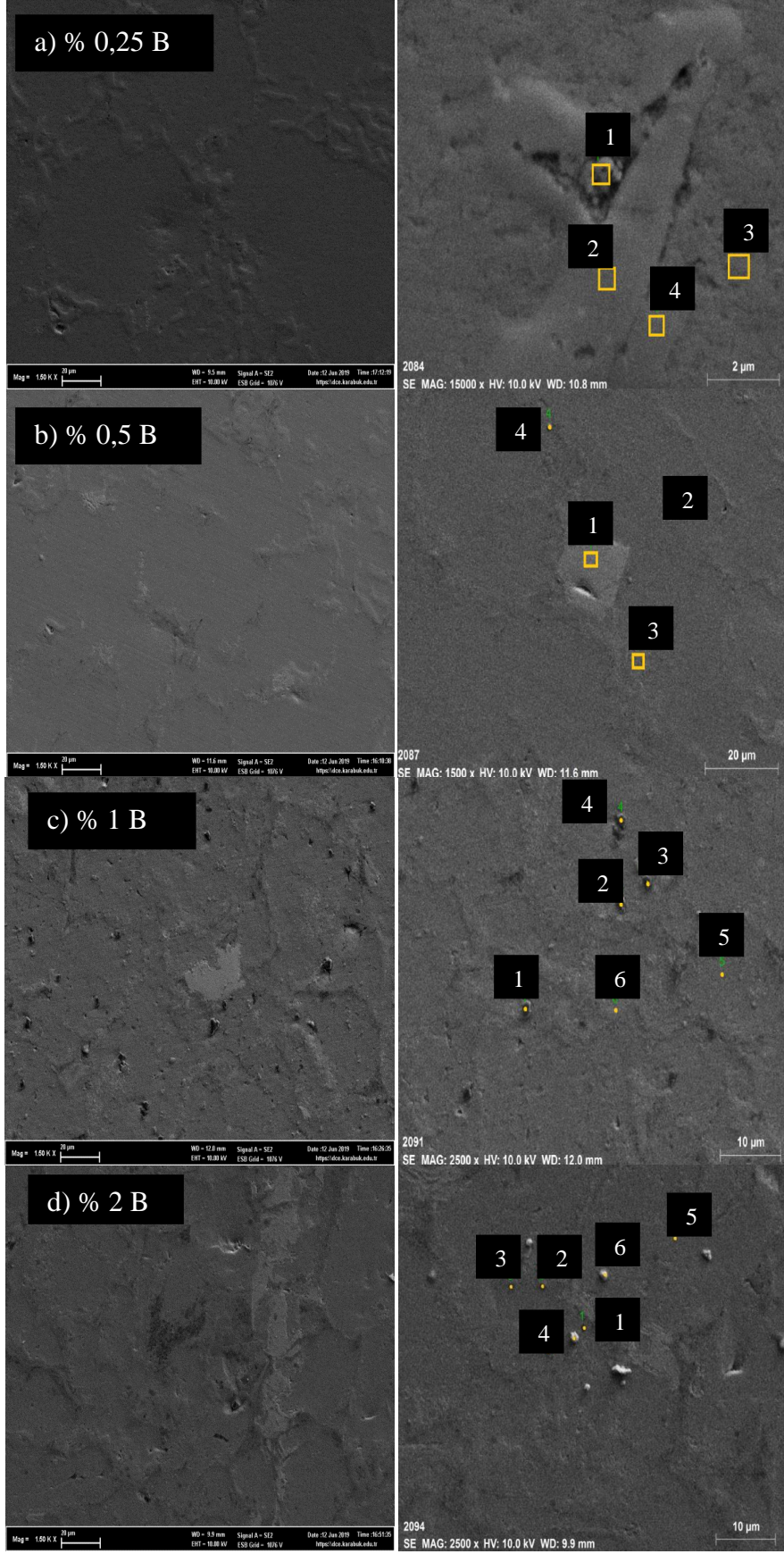


Şekil 5.8. A356 alaşımı SEM haritalama görüntüleri.

Bor ilave edilen A356 alaşımlarının sinterleme sonrası SEM görüntüleri Şekil 5.9'da verilmiştir. Sinterleme sırasında difüzyon mekanizması ile birbirine bağlanan A356 alaşımı taneleri görölmektedir. Bu A356 partiköleri, taneleri oluşturmaktadır. Partiköllerin temas edemediği yüzeylede porozite oluşumları görölmektedir. B ilavesi ile birlikte tane sınırlarında farklı renk tonlarında fazlar oluşmuştur. Ayrıca tane boyutlarında belirgin bir azalma görölmektedir.

%1 ve 2 Bor ilave edilen A356 alaşımları matrisinde AlB_2 ve AlB_{12} intermetalik bileşiklerin net bir Şekilde görölmektedir. Ek olarak, özellikle %2 B ilave edilen A356 alaşımının matrisinde $AlFe_2B_2$ intermetalik fazı açık gri renkteki bölgelerde belirlenmiştir.

Khaliq ve ark., Al-B faz sisteminde katı alüminyum içinde borun kısıtlı çözündüğünü ve mikroyapıda AlB_2 ve AlB_{12} intermetaliklerin oluştuğunu belirtmektedirler. Mikro yapıda, al matris içinde AlB_{12} intermetaliklerinin kümeleşmiş (cluster) Şekilde, AlB_2 intermetaliklerinin daha küçük boyutta dağıldığını görmüşlerdir (Khaliq, vd, 2014).

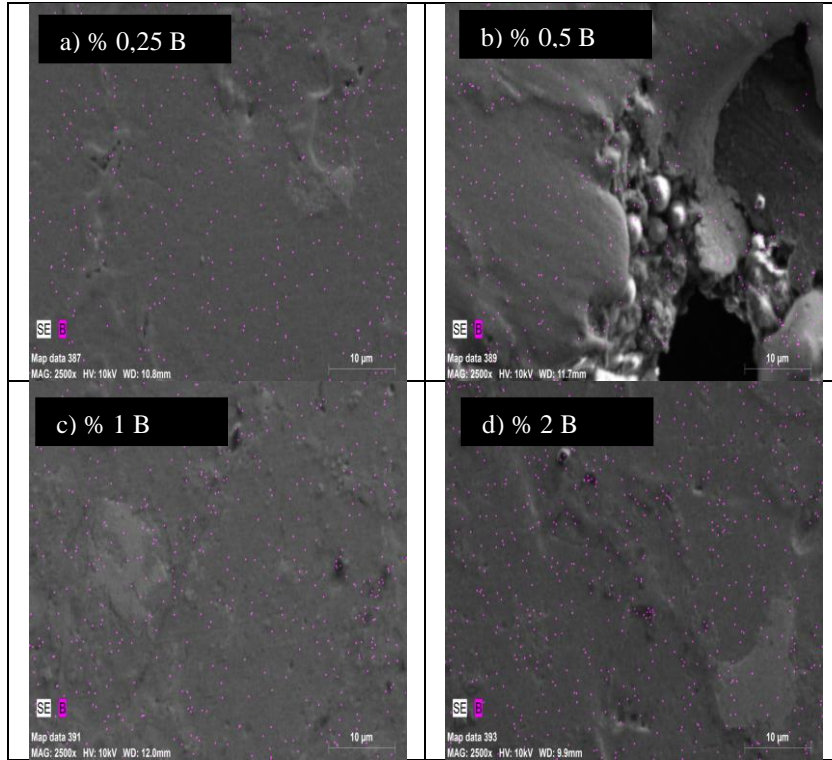


Şekil 5.9. A356/xB alaşımlarının SEM görüntüleri.

Çizelge 5.4. Bor ilave edilen A356 alaşımlarının EDX sonuçları.

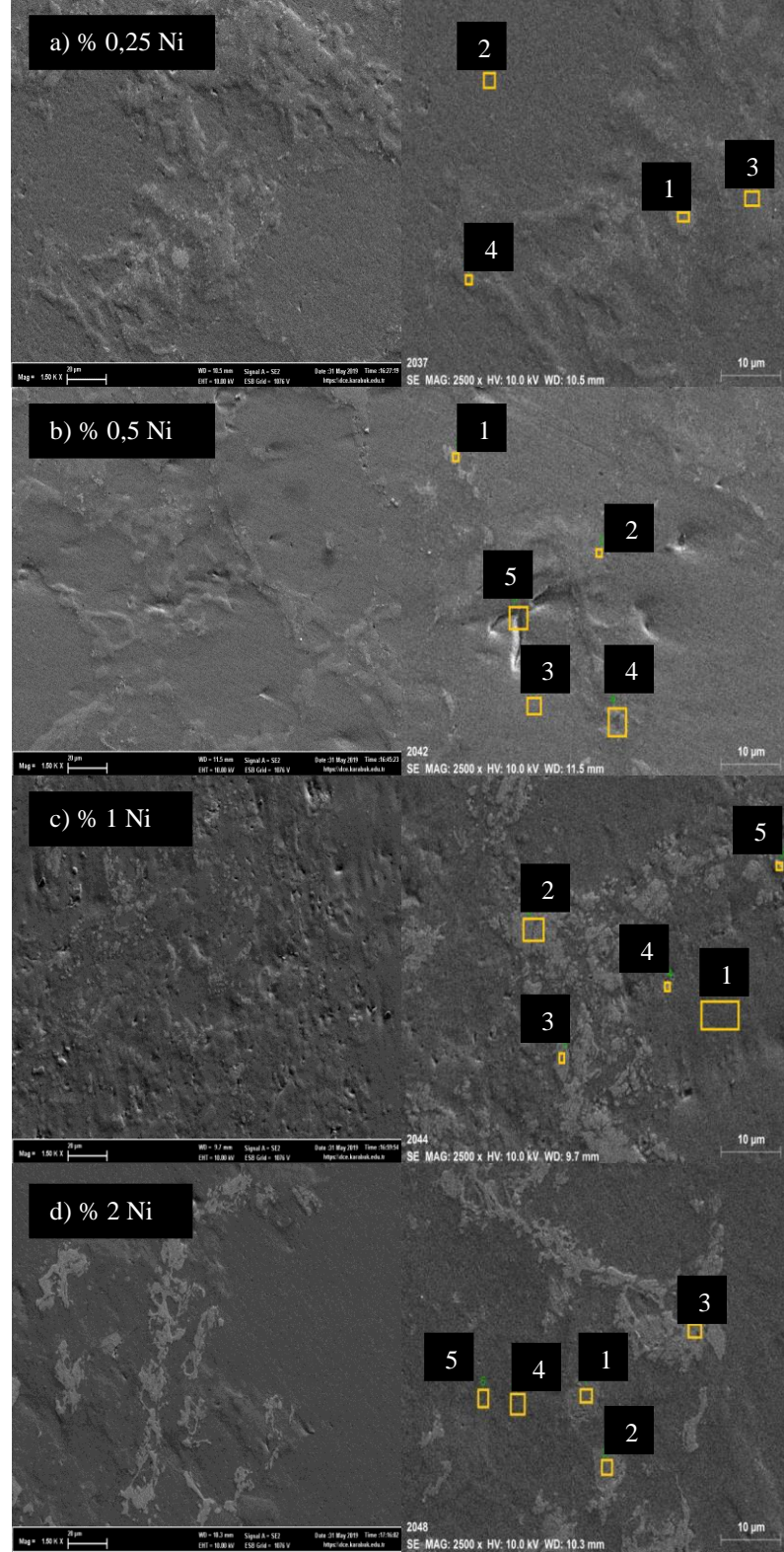
Alaşım	Konum	Element (%)					
		Al	Si	Mg	Fe	O	B
0,25 B	1	49.64	3.89	1.33	1.14	43.01	0.99
	2	20.31	59.23	1.79	0.24	7.44	10.98
	3	97.32	0.42	0.47	0.00	1.79	0.00
	4	13.42	72.30	0.32	0.00	1.75	12.21
0,50 B	1	66.11	15.16	-	14.47	4.26	-
	2	69.50	12.45	-	13.36	4.69	-
	3	39.21	43.04	2.65	2.44	12.65	-
	4	40.89	0.60	3.10	0.31	35.92	19.18
1,0 B	1	5.78	0.33	-	-	8.80	85.10
	2	6.95	0.56	0.76	-	-	91.74
	3	2.70	-	1.99	-	4.31	91
	4	1.71	0.68	-	-	3.14	94.47
	5	97.22	-	0.10	-	0.81	1.88
	6	2.34	85.17	-	0.16	0.43	11.90
2,0 B	1	23.13	0.23	3.69	-	1.98	70.98
	2	53.88	0.14	3.32	0.11	2.30	40.25
	3	48.67	1.27	3.14	2.24	1.16	43.52
	4	47.18	0.12	3.51	0.04	2.07	47.08
	5	84.15	0.07	0.38	2.28	0.85	12.28
	6	46.53	16.05	-	26.21	0.87	10.33

Şekil 5.10'da A356/xB alaşımların SEM haritalama görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.10 incelendiğinde B'nin yapıda homojen olarak dağıldığı görülmektedir.



Şekil 5.10. A356/xB alaşımlarının SEM haritalama görüntüleri.

Nikel ilave edilen A356 alaşımlarının sinterleme sonrası SEM görüntüleri Şekil 5.11’de verilmiştir.

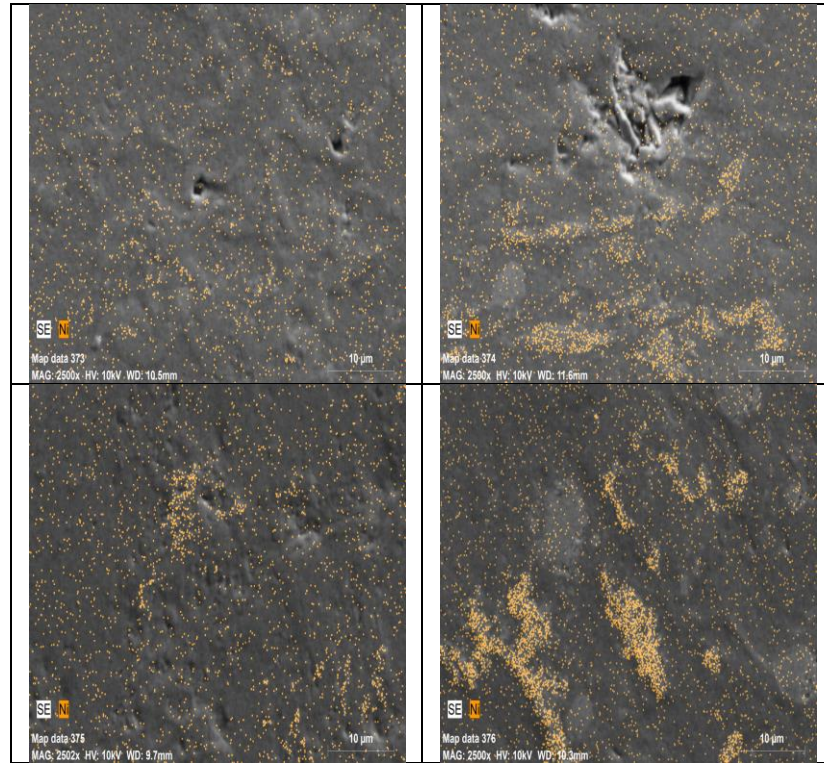


Şekil 5.11. A356/xNi alaşımlarının SEM görüntüleri.

Çizelge 5.5'te A356/xNi alaşımlarının EDX analiz sonuçları, Şekil 5.12'de A356/xNi alaşımlarının SEM haritalama görüntüleri verilmiştir.

Çizelge 5.5. A356/xNi alaşımlarının EDX sonuçları.

Alaşım	Konum	Element (%)					
		Al	Si	Mg	Fe	O	Ni
0.25 Ni	1	65,77	16,56	0,25	13,57	3,52	0,33
	2	95,02	0,38	0,48	0,82	2,87	0,43
	3	8,36	85,94	0,58	0,13	4,38	0,61
	4	6,70	90,21	0,51	0,00	2,09	0,49
0.50 Ni	1	54,76	1,88	1,74	3,40	8,55	29,67
	2	19,76	77,47	0,10	0,00	1,95	0,71
	3	93,79	0,79	0,47	1,34	2,59	1,02
	4	67,29	3,24	1,20	4,09	8,94	15,24
	5	91,20	0,86	0,00	0,24	7,22	0,47
1.0 Ni	1	96,50	0,79	0,45	0,00	1,76	0,51
	2	57,60	0,91	1,16	0,00	6,04	34,30
	3	57,18	0,88	0,66	1,20	4,18	35,90
	4	66,85	13,23	0,76	10,20	6,93	2,03
	5	5,33	89,70	0,14	0,00	3,71	1,12
2.0 Ni	1	67,34	15,28	0,82	9,79	5,52	1,25
	2	66,96	16,13	0,29	9,45	5,38	1,79
	3	57,75	0,43	1,36	0,58	6,41	33,46
	4	20,09	76,08	0,57	0,40	2,48	0,38
	5	40,84	53,96	0,88	0,03	3,75	0,55

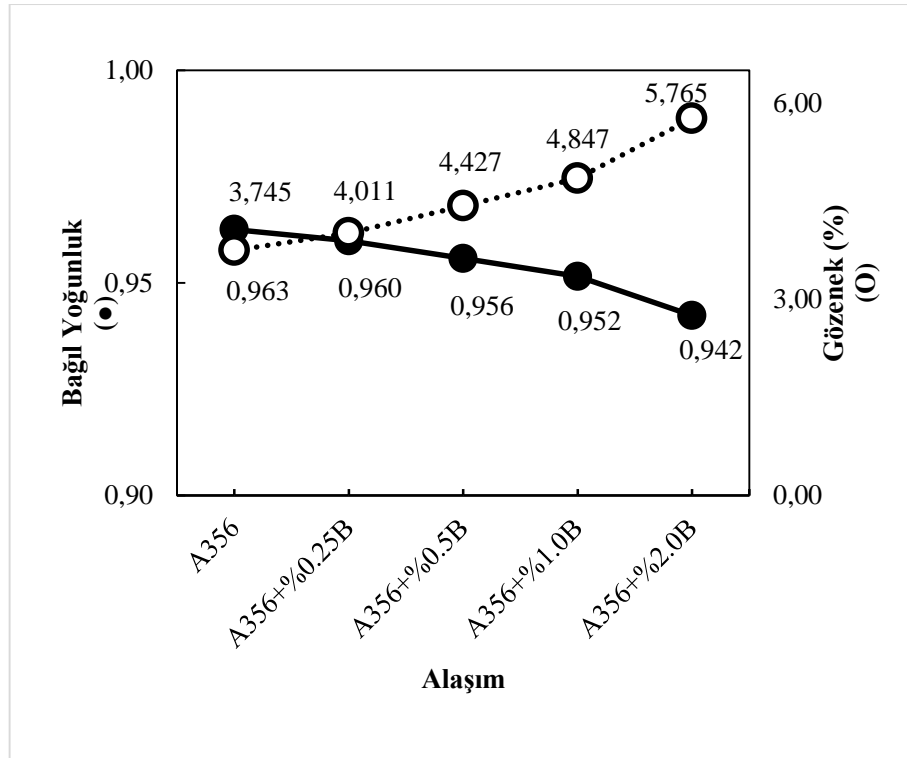


Şekil 5.12. A356/xNi alaşımlarının SEM haritalama görüntüleri.

5.5. YOĞUNLUK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

A356 alaşımına Bor takviyesinin bağıl yoğunluk ve gözenek miktarına etkisi Şekil 5.13'te verilmiştir. Bor oranı arttıkça gözenek oranının arttığı gözlemlenmiştir. Bor içermeyen A356 alaşımında %3,745 oranında gözenek mevcut iken, %0,25 B içeren alaşımda %4,011, %0,5 B içeren alaşımda %4,427, %1 B içeren alaşımda %4,847, %2 B içeren alaşımda %5,765 oranında gözenek mevcut olduğu görülmüştür.

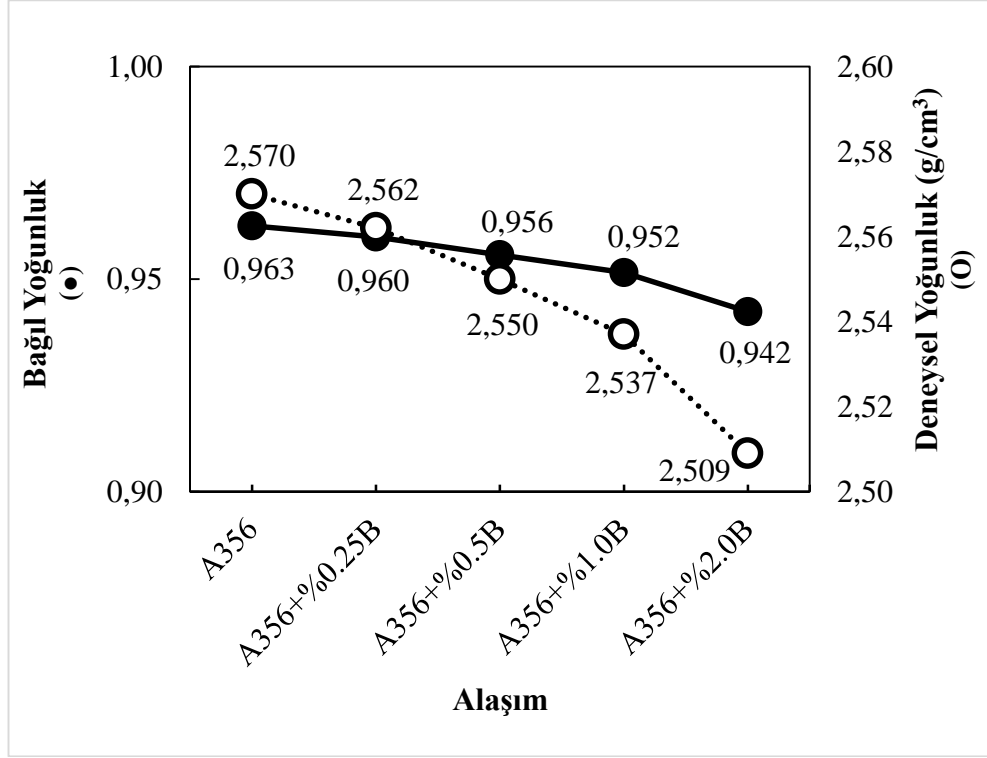
Bor oranı arttıkça gözenek oranındaki artışa bağlı olarak bağıl yoğunluğun azaldığı görülmüştür. Bor içermeyen A356 alaşımının bağıl yoğunluğu 0,963, %0,25 B içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,960, %0,5 B içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,956, %1 B içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,952, %2 B içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,942 olmuştur.



Şekil 5.13. A356/xB alaşımlarında, B oranının bağıl yoğunluk ve gözenek miktarına etkisi.

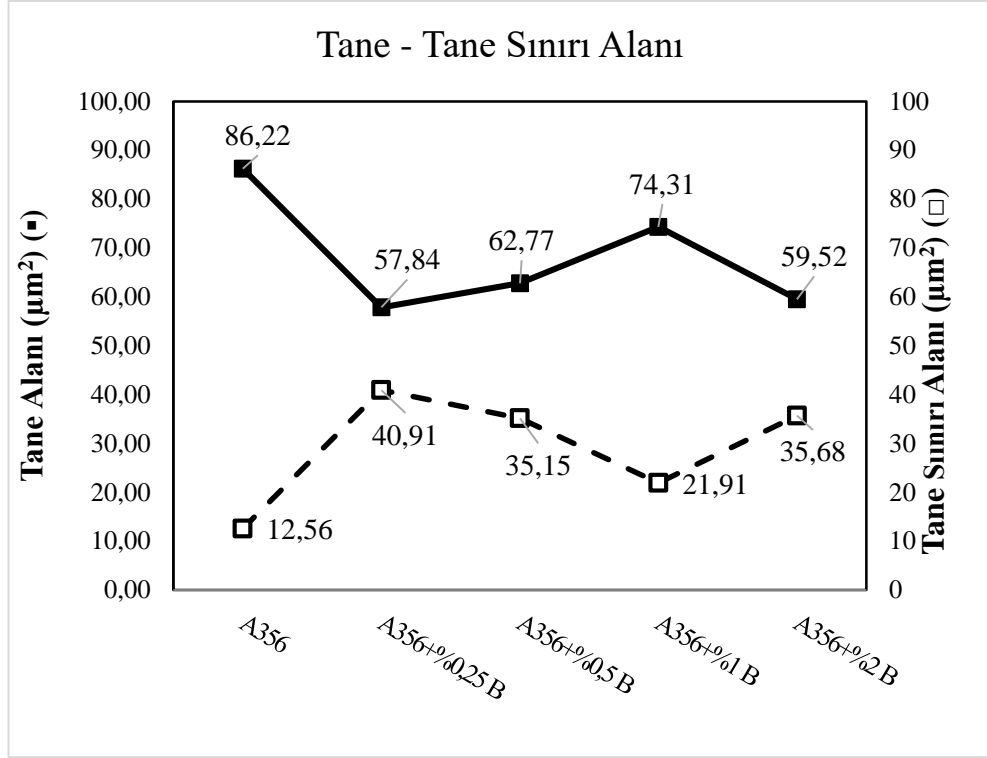
Şekil 5.14'de B takviyesinin deneysel yoğunluğa etkisi verilmiştir. Bor miktarının gözenek oranını arttırması (Şekil 5.13) ve bor elementinin yoğunluğunun (2,34

g/cm³) A356 alařımının yoęunluęundan daha dűşűk olmasından dolayı bor miktarına baęlı olarak yoęunluk azalmıřtır. Bor ięermeyen A356 alařımının yoęunluęu 2,57 g/cm³, %0,25 B ięeren alařımının yoęunluęu 2,562 g/cm³, %0,5 B ięeren alařımın yoęunluęu 2,55 g/cm³, % 1 B ięeren alařımının yoęunluęu 2,537 g/cm³, % 2 B ięeren alařımının yoęunluęu 2,509 g/cm³ olduęu gűrűlműřtűr.



Şekil 5.14. A356/xB alaşımlarında, B oranının bağlı yoğunluk ve deneysel yoğunluğa etkisi.

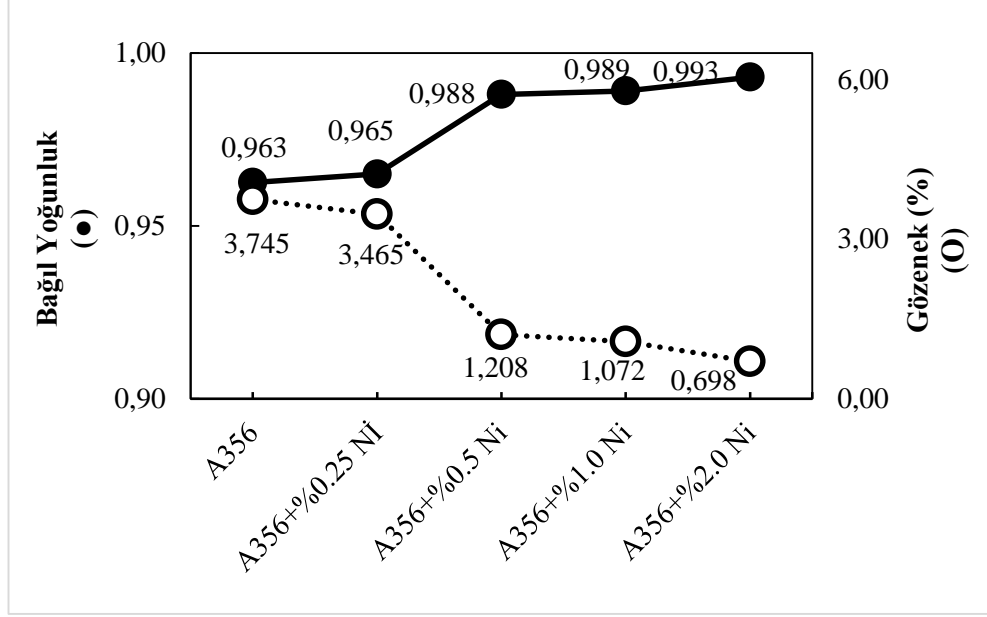
Şekil 5.15'te B takviyesinin tane alanı ve tane sınır alanlarına etkisi verilmiştir. Bor iğermeyen A356 alaşımının tane alanı 86,22 μm^2 tane sınır alanı 12,56 μm^2 , %0,25 B iğeren alaşımın tane alanı 57,84 μm^2 tane sınır alanı 40,91 μm^2 , %0,5 B iğeren alaşımın tane alanı 62,77 μm^2 tane sınır alanı 35,15 μm^2 , %1 B iğeren alaşımın tane alanı 74,31 μm^2 tane sınır alanı 21,91 μm^2 , %2 B iğeren alaşımın tane alanı 59,52 μm^2 tane sınır alanı 35,68 μm^2 olmuştur. Bor ilavesi ile tane alanları ve tane sınır alanları değişiklik gűstermiřtir. B iğeren alaşımlar iğerisinde en bűyűk tane alanına sahip olan alaşım %1 B alaşımıdır. En fazla tane sınırı iğeren alaşım ise %0,25 B alaşımı olmuştur.



Şekil 5.15. A356/xB alaşımlarında, B oranının tane ve tane sınırı alanlarına etkisi.

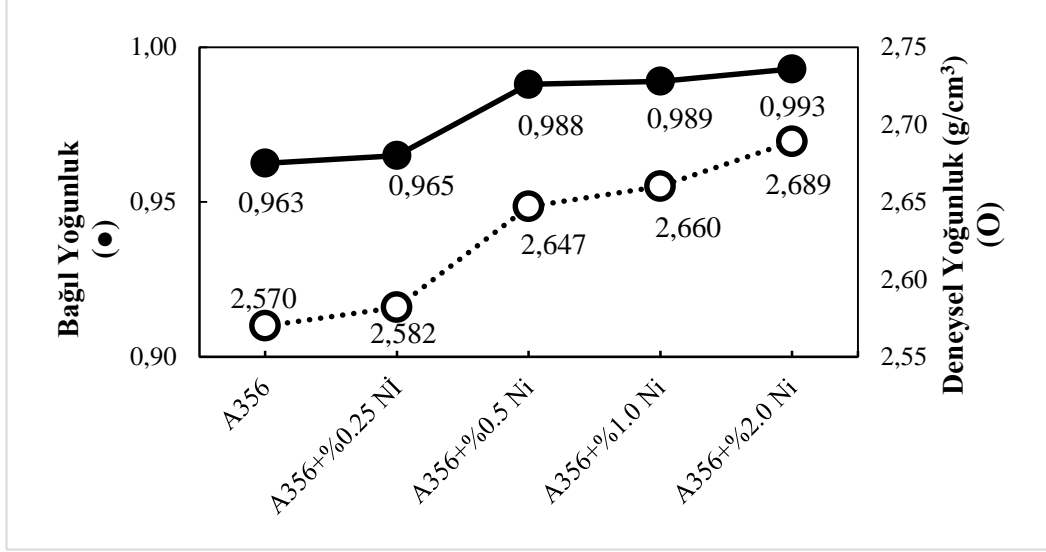
A356 alaşımına Nikel takviyesinin bağıl yoğunluk ve gözenek miktarına etkisi Şekil 5.16’da verilmiştir. Nikel oranı arttıkça, gözenek oranının azaldığı gözlemlenmiştir. Nikel içermeyen A356 alaşımında %3,745 oranında gözenek mevcut iken, %0,25 Ni içeren alaşımda %3,465, %0,5 Ni içeren alaşımda %1,208, %1 Ni içeren alaşımda %1,072, %2 Ni içeren alaşımda %0,698 oranında gözenek mevcut olduğu görülmüştür.

Nikel oranı arttıkça gözenek oranındaki azalmaya bağlı olarak bağıl yoğunluğun arttığı görülmüştür. Nikel içermeyen A356 alaşımının bağıl yoğunluğu 0,963, %0,25 Ni içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,965, %0,5 Ni içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,988, %1 Ni içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,989, %2 Ni içeren alaşımın bağıl yoğunluğu 0,993 olmuştur.



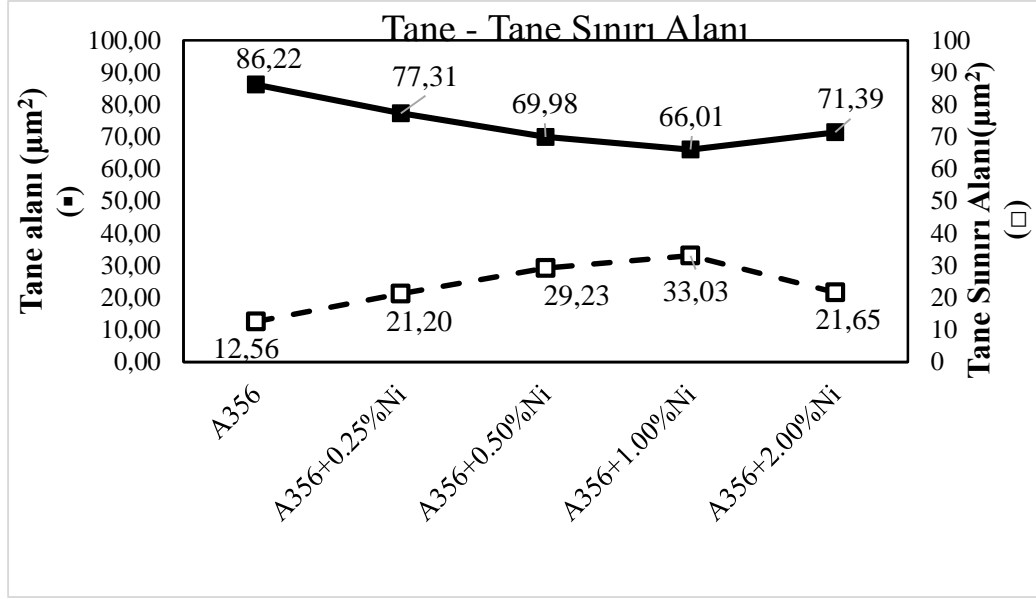
Şekil 5.16. A356/xNi alaşımlarında, Ni oranının bağıl yoğunluk ve gözenek miktarına etkisi.

Şekil 5.17’de Nikel takviyesinin deneysel yoğunluğa etkisi verilmiştir. Nikel miktarının gözenek oranını azaltması (Şekil 5.16) ve Nikel elementinin yoğunluğunun ($8,9 \text{ g/cm}^3$) A356 alaşımının yoğunluğundan daha yüksek olmasından dolayı Nikel miktarına bağlı olarak yoğunluk artmıştır. Nikel içermeyen A356 alaşımının yoğunluğu $2,57 \text{ g/cm}^3$, %0,25 Nikel içeren alaşımının yoğunluğu $2,582 \text{ g/cm}^3$, %0,5 Nikel içeren alaşımının yoğunluğu $2,647 \text{ g/cm}^3$, %1 Nikel içeren alaşımının yoğunluğu $2,660 \text{ g/cm}^3$, %2 Nikel içeren alaşımının yoğunluğu $2,689 \text{ g/cm}^3$ olduğu görülmüştür.



Şekil 5.17. A356/xNi alaşımlarında, Ni oranının bağıl yoğunluk ve deneysel yoğunluğa etkisi.

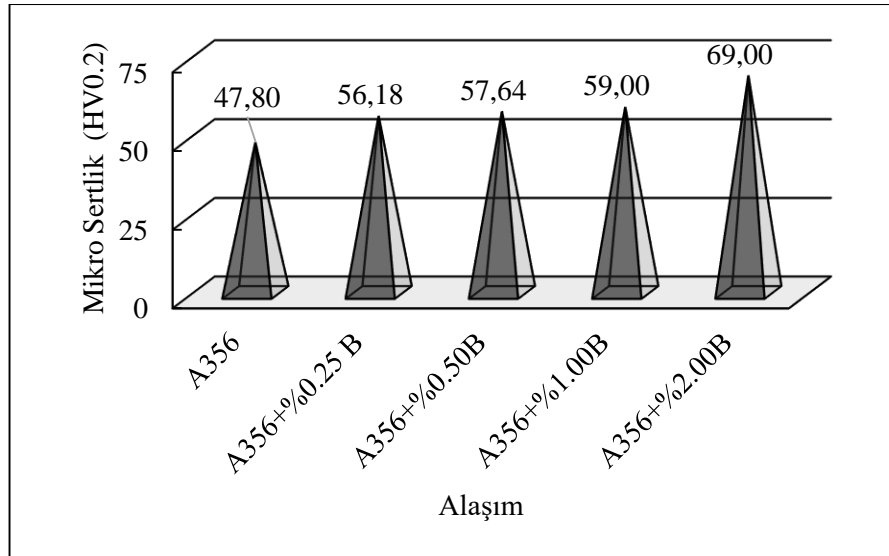
Şekil 5.18’de Ni takviyesinin tane alanı ve tane sınır alanlarına etkisi verilmiştir. Ni içermeyen A356 alaşımının tane alanı $86,22 \mu\text{m}^2$ tane sınır alanı $12,56 \mu\text{m}^2$, %0,25 Ni içeren alaşımın tane alanı $77,31 \mu\text{m}^2$ tane sınır alanı $21,20 \mu\text{m}^2$, %0,5 Ni içeren alaşımın tane alanı $69,98 \mu\text{m}^2$ tane sınır alanı $29,23 \mu\text{m}^2$, %1 Ni içeren alaşımın tane alanı $66,01 \mu\text{m}^2$ tane sınır alanı $33,03 \mu\text{m}^2$, %2 Ni içeren alaşımın tane alanı $71,39 \mu\text{m}^2$ tane sınır alanı $21,65 \mu\text{m}^2$ olmuştur. %0,25, %0,5 ve %1 Ni içeren alaşımlar Nikel oranı arttıkça tane alanları küçülmüş ve tane sınır alanları artmıştır. Ni içeren alaşımlar içerisinde en büyük tane alanına sahip olan alaşım %0,25 Ni alaşımıdır. En fazla tane sınırı içeren alaşım ise %1 Ni alaşımı olmuştur.



Şekil 5.18. A356/xNi alaşımlarında, Ni oranının tane ve tane sınır alanlarına etkisi.

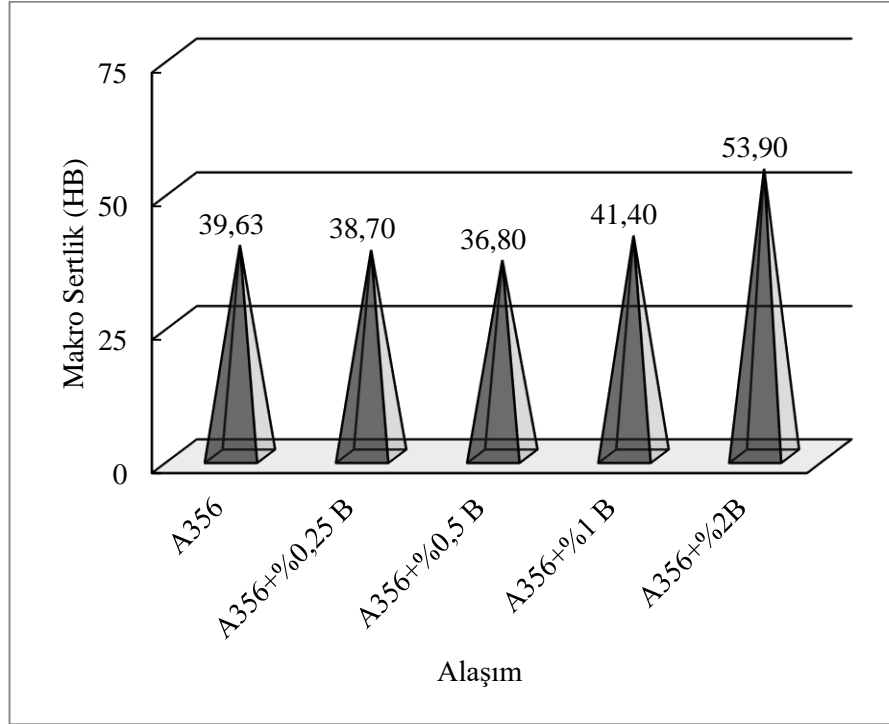
5.6. SERTLİK SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Farklı miktarlarda B içeren A356 alaşımlarının mikro sertlik sonuçları Şekil 5.19'da verilmiştir. Bor oranı arttıkça tane sınırlarındaki artış ve tane boyutundaki küçülmeden dolayı mikro sertlik artmıştır. Bor içermeyen A356 alaşımlarının mikro sertliği 47,80 HV0,2, %0,25 B içeren alaşımların mikro sertliği 56,18 HV0,2, %0,5 B içeren alaşımların mikro sertliği 57,64 HV0,2, %1 B içeren alaşımların mikro sertliği 59,00 HV0,2, %2 B içeren alaşımların mikro sertliği 69,00 HV0,2 olduğu görülmüştür.



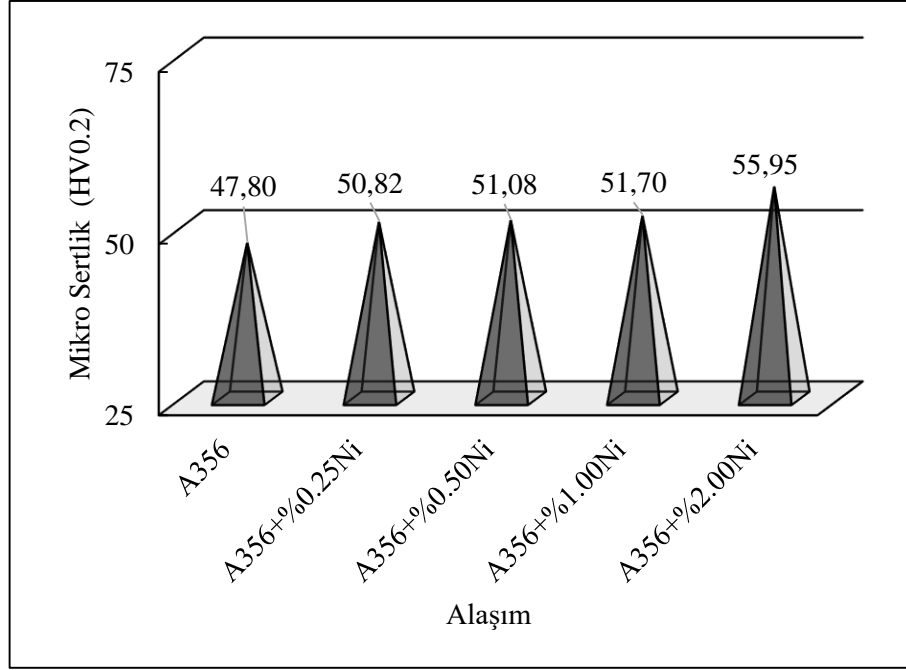
Şekil 5.19. A356/xB alaşımlarının mikro sertlikleri.

Farklı miktarlarda B içeren A356 alaşımının makro sertlik sonuçları Şekil 5.20’de verilmiştir. Bor içermeyen A356 alaşımının makro sertliği 39,63 HB, %0,25 B içeren alaşımın makro sertliği 38,70 HB, %0,5 B içeren alaşımın makro sertliği 36,80 HB, %1 B içeren alaşımın makro sertliği 41,40 HB, %2 B içeren alaşımın makro sertliği 53,90 HB olduğu görülmüştür.



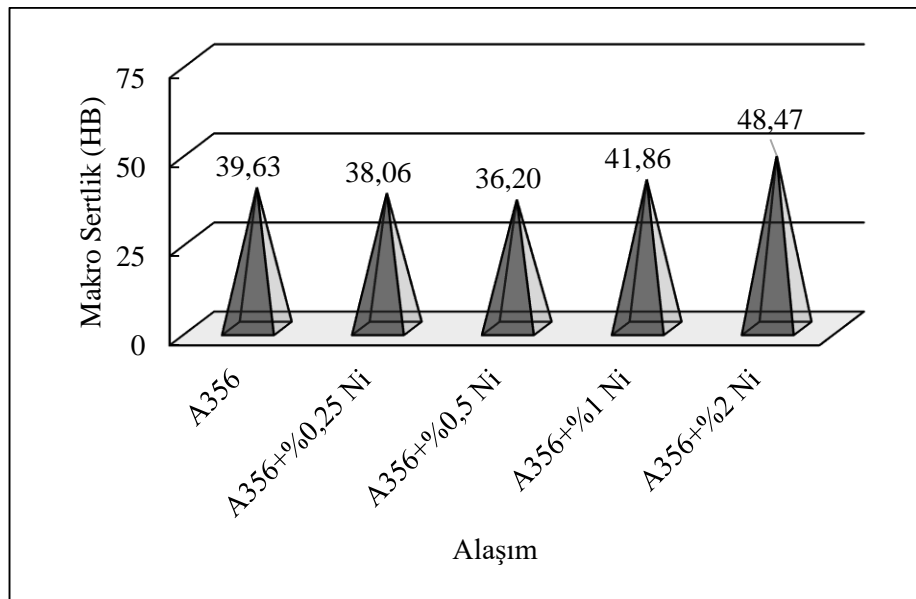
Şekil 5.20. A356/xB alaşımlarının makro sertlikleri.

Farklı miktarlarda Ni içeren A356 alaşımının mikro sertlik sonuçları Şekil 5.21’de verilmiştir. Ni içermeyen A356 alaşımının mikro sertliği 47,80 HV0,2, %0,25 Ni içeren alaşımın mikro sertliği 50,82 HV0,2, %0,5 Ni içeren alaşımın mikro sertliği 51,08 HV0,2, %1 Ni içeren alaşımın mikro sertliği 51,70 HV0,2, %2 Ni içeren alaşımın mikro sertliği 55,95 HV0,2 olduğu görülmüştür.



Şekil 5.21. A356/xNi alaşımlarının mikro sertlikleri.

Farklı miktarlarda Ni içeren A356 alaşımının makro sertlik sonuçları Şekil 5.22’de verilmiştir. Ni içermeyen A356 alaşımının makro sertliği 39,63 HB, %0,25 Ni içeren alaşımın makro sertliği 38,06 HB, %0,5 Ni içeren alaşımın makro sertliği 36,20 HB, %1 Ni içeren alaşımın makro sertliği 41,86 HB, %2 Ni içeren alaşımın makro sertliği 48,47 HB olduğu görülmüştür.

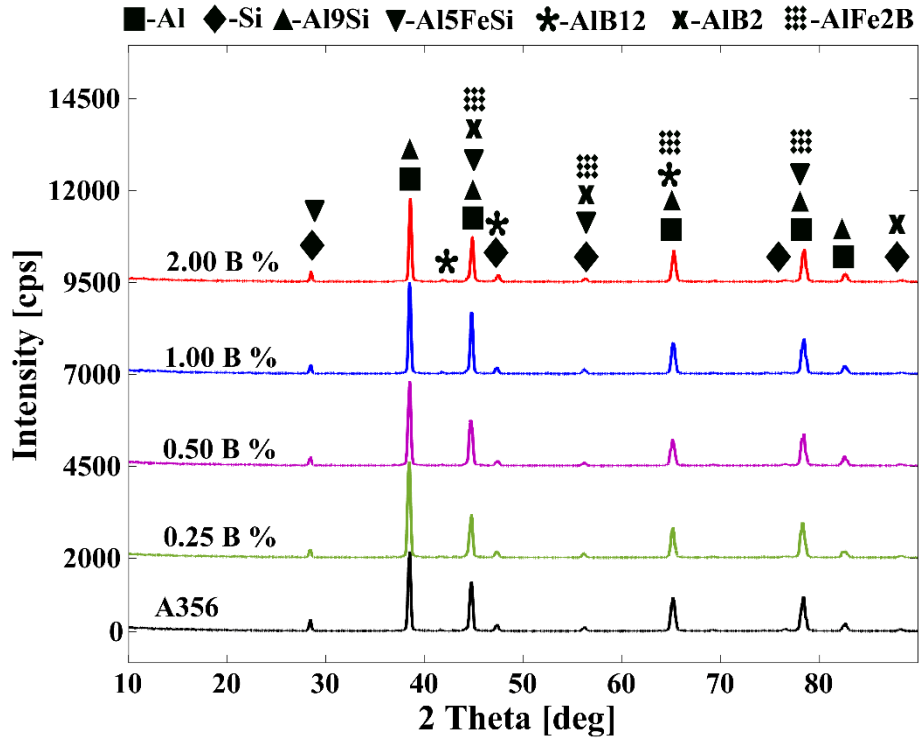


Şekil 5.22. A356/xNi alaşımlarının makro sertlikleri.

5.7. XRD İNCELEMELERİ

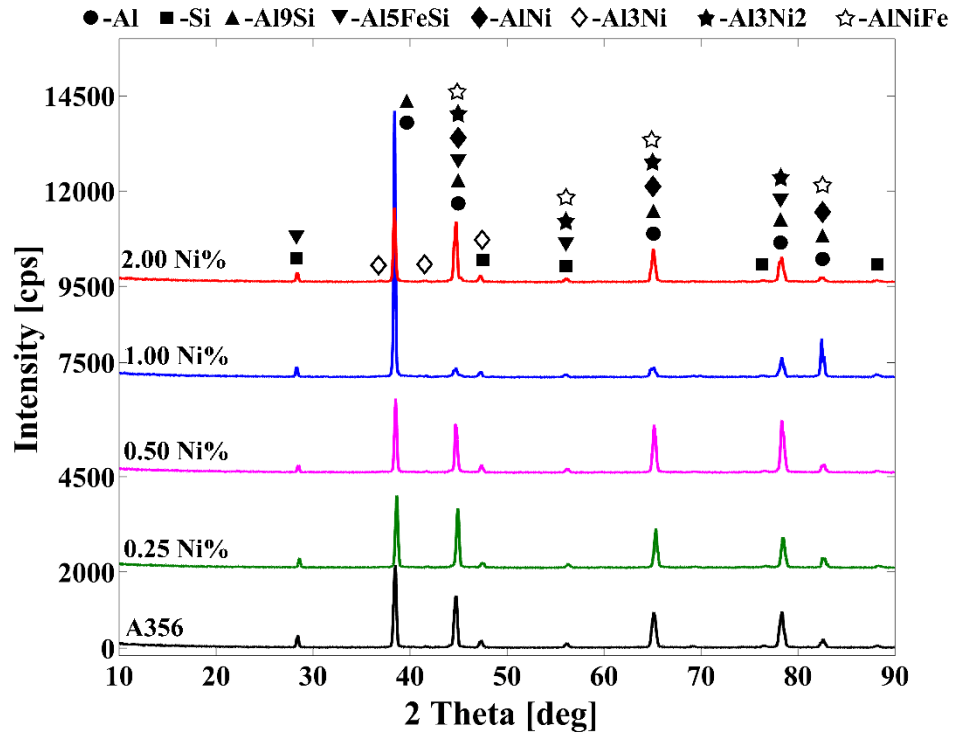
A356 alaşımına B ve Ni ilavesinin alaşımlama ve sinterleme mekanizmalarına bağlı olarak gelişen mikro yapıda oluşan fazların belirlenmesi için, her alaşım grubundan XRD analizi yapılmıştır. A356/xB alaşımları XRD analizi sonuçları Şekil 5.23'te ve A356/xNi alaşımları XRD analizi sonuçları Şekil 5.24'de verilmiştir. A356 alaşımını XRD sonucunda Al fazı 38, 44, 66, 78, 84 2-theta açısında, Si fazı 28, 46, 56, 88 2-theta açısında, Al₉Si fazı 38, 44, 66, 78, 84 2-theta açısında ve Al₅FeSi fazı 28, 44, 46, 56 2-theta açısında tespit edilmiştir. B içeren alaşımlarda A356 alaşımındaki Al, Si, Al₉Si, Al₅FeSi fazlarına ek olarak, B ilavesiyle yapıda AlB₂, AlB₁₂, AlFe₂B₂ fazları bulunmuştur. Ni ilavesiyle de yapıda AlNi, Al₃Ni, Al₃Ni₂ ve AlNiFe fazları bulunmuştur.

B içeren alaşımlarda; 44,56,88 2-theta derecede AlB₂, 44,46,66 2-theta derecede AlB₁₂, 44,56,66,78 2-theta derecede AlFe₂B₂ fazlarının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.23. A356/xB alaşımlarının XRD analizleri.

Ni içeren alaşımlarda; 66 2-theta derecede AlNi, 38,44,46 2-theta derecede Al₃Ni, 44,56,66,78 2-theta derecede Al₃Ni₂, 44,56,66,84 2-theta derecede AlNiFe fazlarının oluştuğu görülmüştür. Alüminyum alaşımlarında, Al₃Ni ve Al₃Ni₂ fazları 250°C ve üzerindeki çalışma sıcaklıklarında mekanik özelliklerini arttırdığı bilinmektedir (Farkossh et all, 2013).



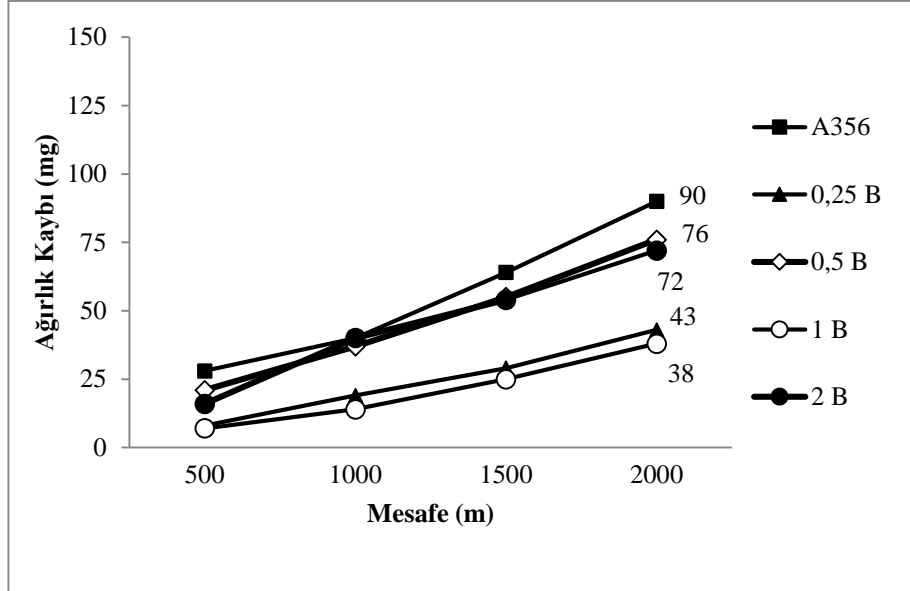
Şekil 5.24. A356/xNi alaşımlarının XRD analizleri.

5.8. AŞINMA TESTİ VE SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu çalışmada, A356 alaşımına ilave edilen Bor ve Nikelin, mekanik özelliklere etkisinin belirlenmesi için aşınma testleri yapılmıştır. Aşınma testleri numuneleri 10 ve 20 N yük altında, 1 ms⁻¹ kayma hızında ve 4 farklı (500 m, 1000 m, 1500 m ve 2000 m) kayma mesafesinde yapılmıştır.

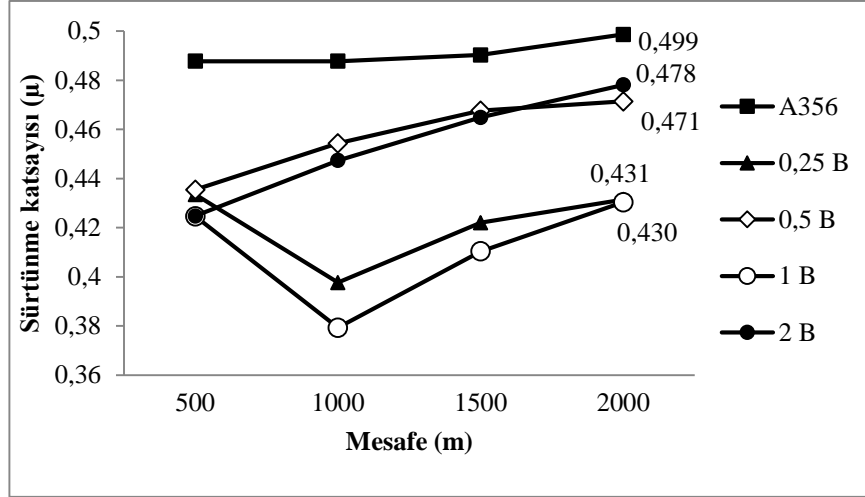
10 N kuvvet altında yapılan aşınma testleri sonucunda, Bor ilave edilen numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları Şekil 5.25'te gösterilmektedir. Şekil 5.25 incelendiğinde en uzun kayma mesafesi olan 2000 metrede; A356 alaşımında 90 mg, %0,25 B içeren alaşımda 43 mg, %0,5 B içeren alaşımda 76 mg, %1 B içeren

alaşımında 38 mg, %2 B içeren alaşımında ise 72 mg ağırlık kaybı olmuştur. Bor ilavesinin aşınma dayanımını arttırarak ağırlık kaybını azalttığı görülmüştür. %1 B içeren alaşım en az ağırlık kaybına (38 mg) uğrayarak en yüksek dayanımı göstermiştir.



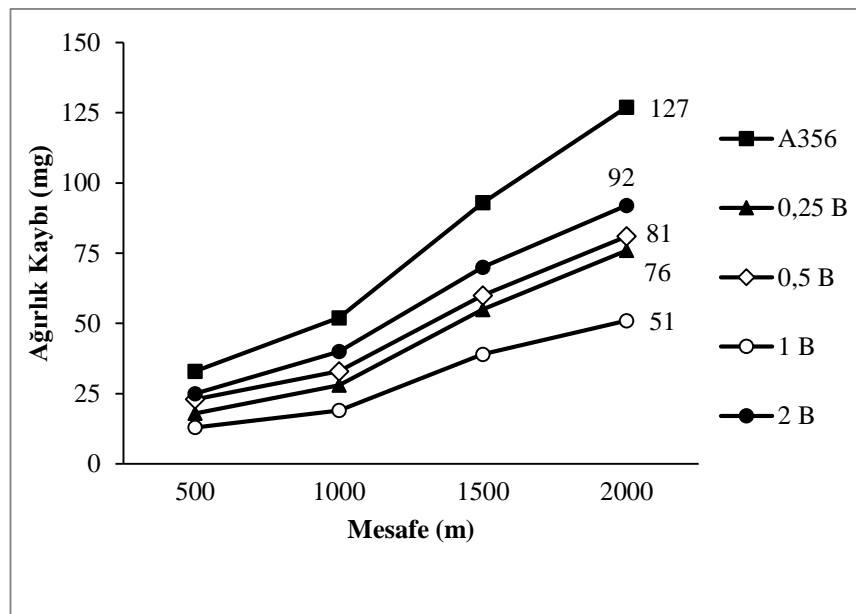
Şekil 5.25. A356/xB alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (10N).

Şekil 5.26'da 10 N kuvvet ile aşınma testi yapılan bor ilaveli alaşımlara ait sürtünme katsayı grafiği verilmiştir. Grafik incelendiğinde Bor içeren alaşımlarda dalgalanmalar olduğu A356 alaşımında ise hemen hemen stabil kaldığı görülmüştür. Mikroyapıda bulunan oksitler sürtünme esnasında yağlayıcı görevi yapar ve buna bağlı olarak sürtünme katsayıları azalır (Özyürek ve Çiftçi, 2011). Bor ilavesi ile mikroyapıda artan oksit miktarı sonucunda sürtünme katsayıları bor içermeyen alaşıma göre azalmıştır.



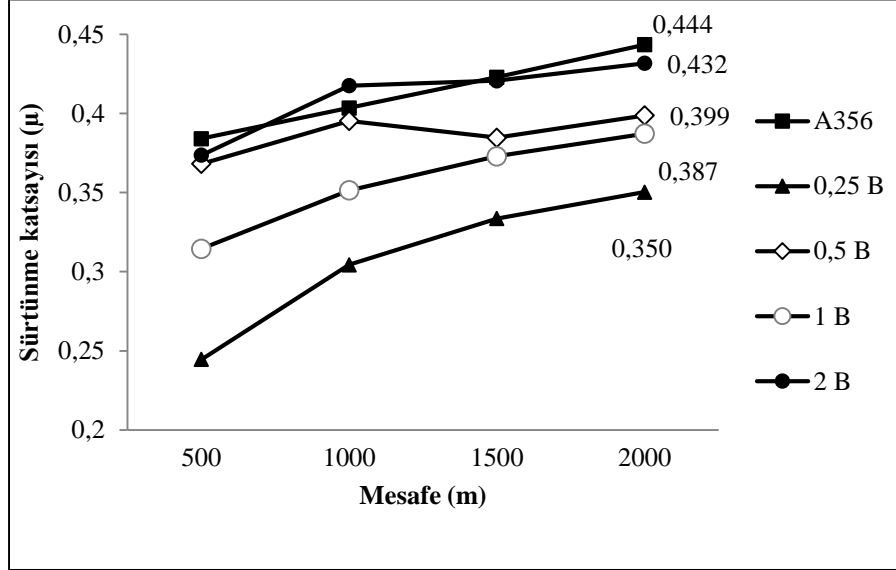
Şekil 5.26. A356/xB alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (10N).

20 N kuvvet altında yapılan aşınma testleri sonucunda, Bor ilave edilen numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları, Şekil 5.27’de gösterilmektedir. Şekil 5.27 incelendiğinde en uzun kayma mesafesi olan 2000 metrede; A356 alaşımında 127 mg, %0,25 B içeren alaşımda 76 mg, %0,5 B içeren alaşımda 81 mg, % 1 B içeren alaşımda 51 mg, % 2 B içeren alaşımda ise 92 mg ağırlık kaybı olmuştur. Bor ilavesinin aşınma dayanımını arttırarak ağırlık kaybını azalttığı görülmüştür. 10 N kuvvet altında yapılan aşınma testinde olduğu gibi, %1 B içeren alaşım en az ağırlık kaybına (51 mg) uğrayarak en yüksek dayanımı göstermiştir.



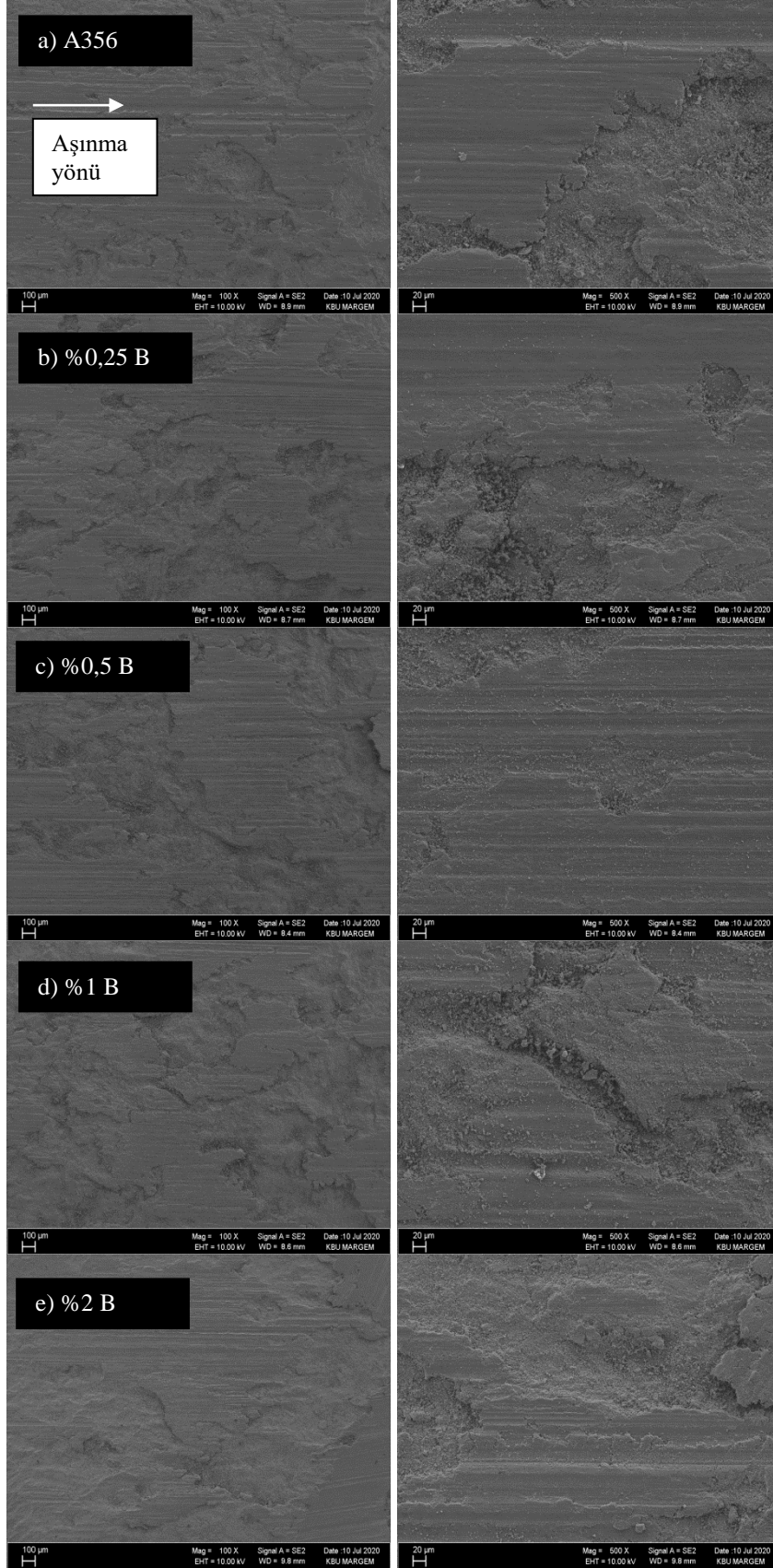
Şekil 5.27. A356/xB alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (20N).

Şekil 5.28’de 20 N kuvvet ile aşınma testi yapılan bor ilaveli alaşımlara ait sürtünme katsayı grafiği verilmiştir.



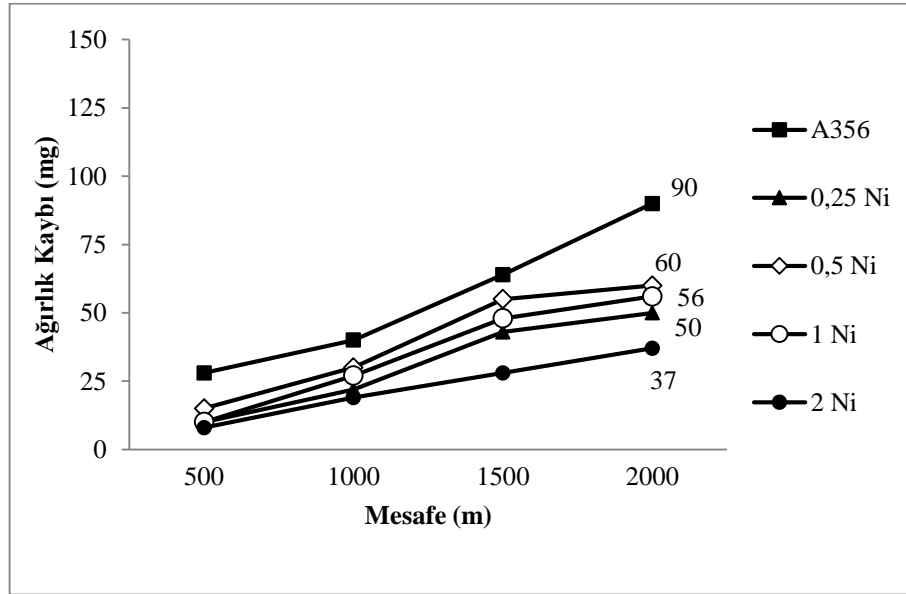
Şekil 5.28. A356/xB alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (20N).

Şekil 5.29’da Bor içeren alaşımların aşınma yüzey görüntüleri verilmiştir. Şekil 5.29 incelendiğinde aşınma kuvvetine ve hızını bağlı olarak yapıda oluşan kopma, çatlak ve kopan parçaların tekrar yüzeye yapışması vb. deformasyonlar görülmektedir. Aşınma testi sırasında tane sınırları ve döküm boşluklarının özellikle döküm malzemelerin aşınma dayanımlarında oldukça önemli bir yere sahip olduğu bilinmektedir. Art arda sürtünmenin etkisi ile tane sınırları, ikincil fazların ve boşlukların çevrelerinde deformasyon oluşmaktadır.



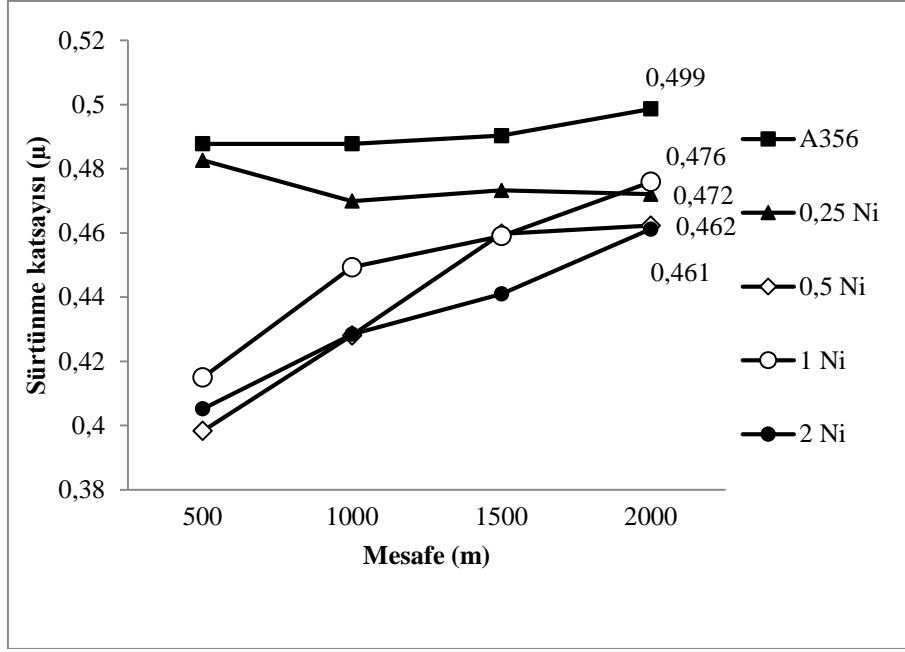
Şekil 5.29. A356/xB alaşımlarının 20 N kuvvet altında ve 2000 metre kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

10 N kuvvet altında yapılan aşınma testleri sonucunda, Nikel ilave edilen numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları, Şekil 5.30'da gösterilmektedir. Tüm numunelerde kayma mesafesi arttıkça ağırlık kaybı artmıştır. Şekil 5.30 incelendiğinde en uzun kayma mesafesi olan 2000 metrede; A356 alaşımında 90 mg, %0,25 Ni içeren alaşımda 50 mg, %0,5 Ni içeren alaşımda 60 mg, % 1 Ni içeren alaşımda 56 mg, % 2 Ni içeren alaşımda ise 37 mg ağırlık kaybı olmuştur. Nikel ilavesinin aşınma dayanımını arttırarak ağırlık kaybını azalttığı görülmüştür. %2 Ni içeren alaşım en az ağırlık kaybına (37 mg) uğrayarak en yüksek dayanımı göstermiştir. Bunun nedeni ise sertlik değerlerinin diğer Ni içeren alaşımlara göre daha yüksek olmasıdır. Bu sonuç yüksek sertlik değerine sahip numunelerde aşınma direncinin daha yüksek olması durumuyla tutarlıdır (Mazahery and Shabani, 2012).



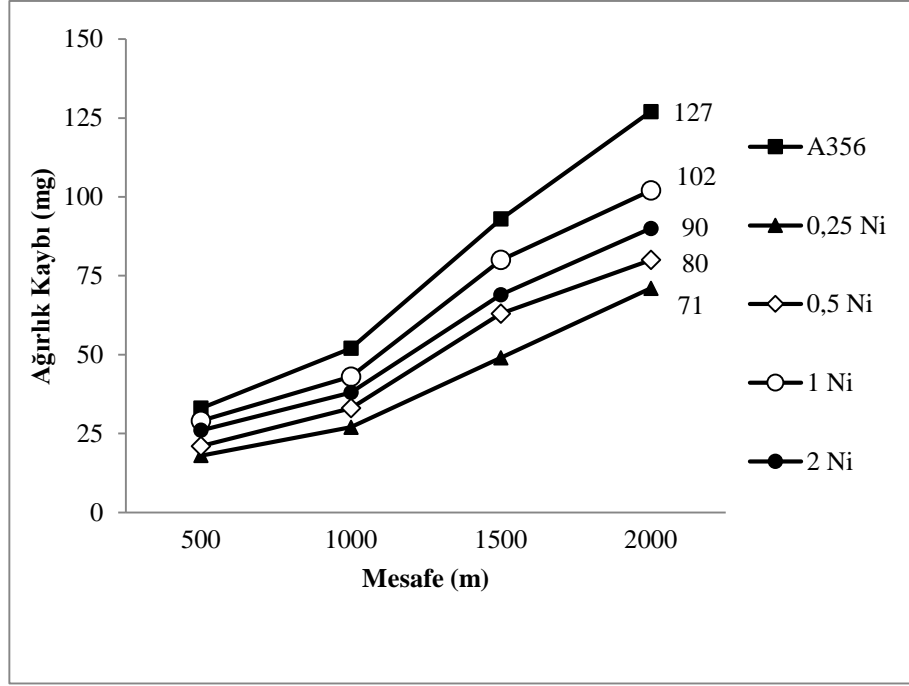
Şekil 5.30. A356/xNi alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (10N).

Şekil 5.31'de 10 N kuvvet ile aşınma testi yapılan Nikel ilaveli alaşımlara ait sürtünme katsayı grafiği verilmiştir. 10 N kuvvet altında yapılan aşınma testleri sonrasında en düşük sürtünme katsayısını en yüksek sertlik değerine sahip olan %2 Ni alaşımı vermiştir. Bu durum sürtünme katsayısının artan sertlik ile azalması ilişkisiyle tutarlıdır (Shabestari and Moemeni, 2004).



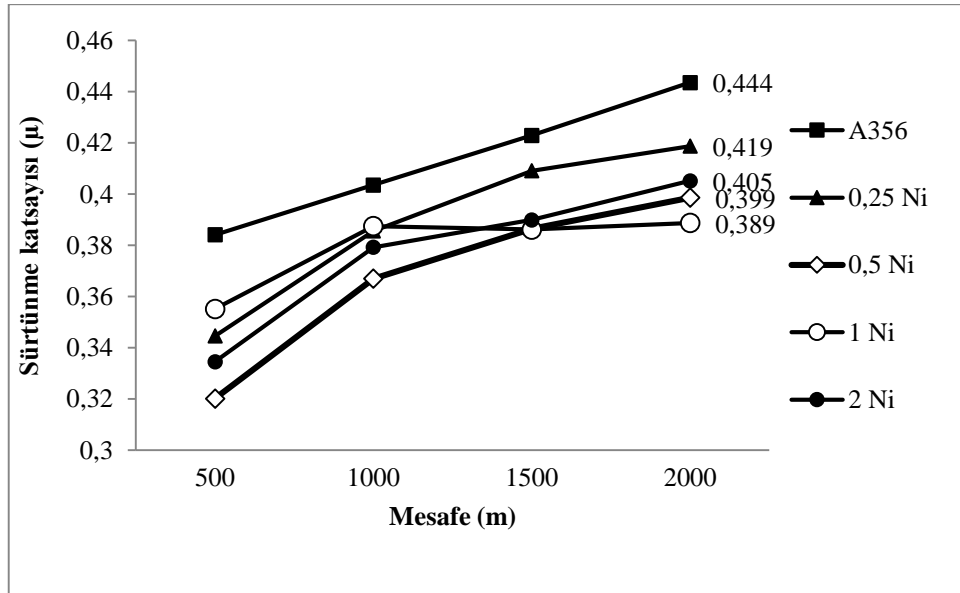
Şekil 5.31. A356/xNi alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (10N).

20 N kuvvet altında yapılan aşınma testleri sonucunda, Nikel ilave edilen numunelerde meydana gelen ağırlık kayıpları, Şekil 5.32’de gösterilmektedir. Şekil 5.32 incelendiğinde en uzun kayma mesafesi olan 2000 metrede; A356 alaşımında 127 mg, %0,25 Ni içeren alaşımda 71 mg, %0,5 Ni içeren alaşımda 80 mg, % 1 Ni içeren alaşımda 102 mg, % 2 Ni içeren alaşımda ise 90 mg ağırlık kaybı olmuştur. %0,25 Ni içeren alaşım en az ağırlık kaybına (71 mg) uğrayarak en yüksek dayanımı göstermiştir.

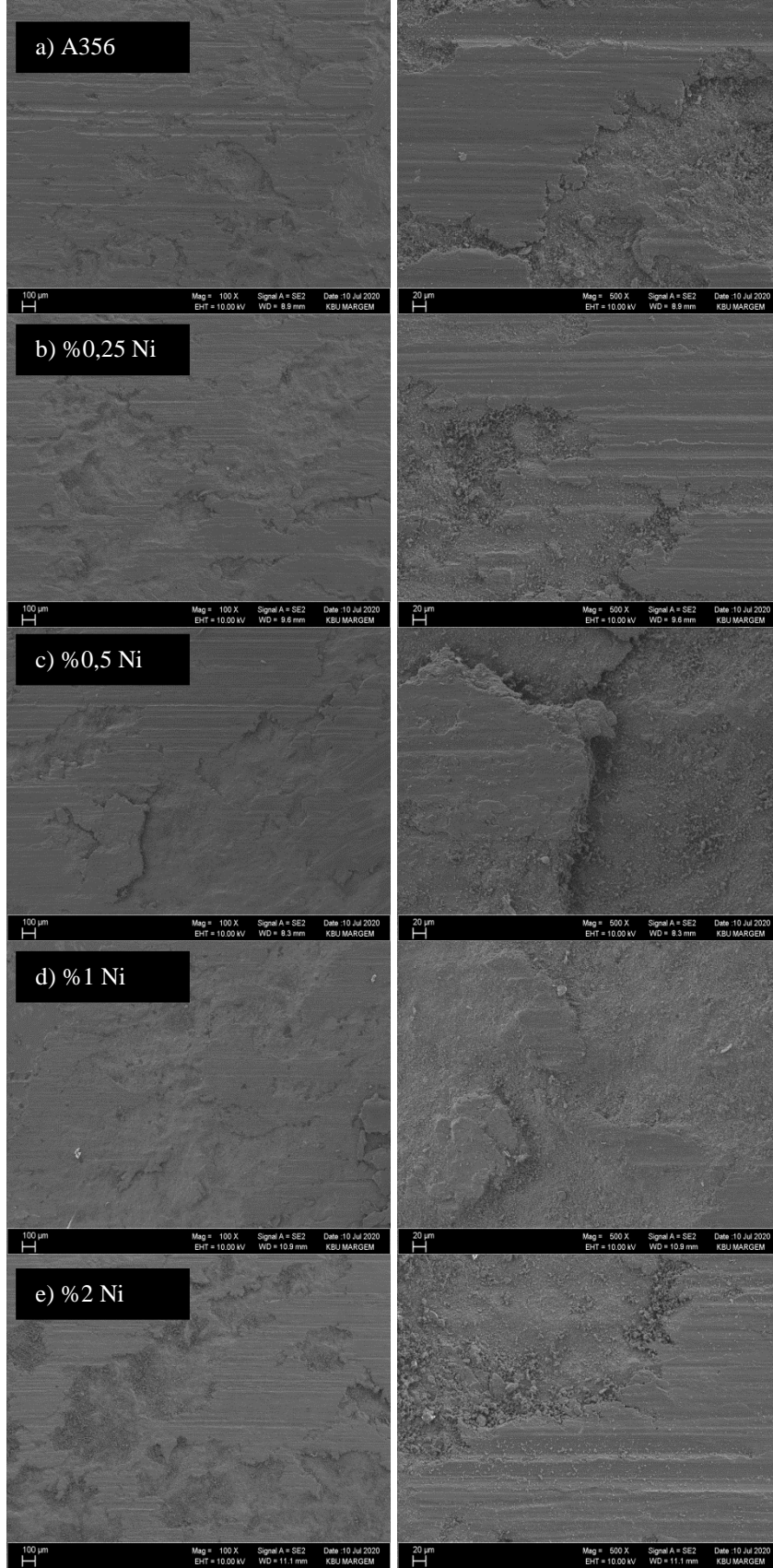


Şekil 5.32. A356/xNi alaşımlarının aşınma dayanımına etkisi (20N).

Şekil 5.33'te 20 N kuvvet ile aşınma testi yapılan Nikel ilaveli alaşımlara ait sürtünme katsayı grafiği verilmiştir. 2000 metre kayma mesafesinde en az sürtünme katsayısı %1 Ni içeren alaşımda olmuştur.



Şekil 5.33. A356/xNi alaşımlarının sürtünme katsayısına etkisi (20N).



Şekil 5.34. A356/xNi alaşımlarının alaşımların 20 N kuvvet altında ve 2000 metre kayma mesafesi sonucunda aşınma yüzeyi SEM görüntüleri.

BÖLÜM 6

SONUÇLAR

Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen Bor ve Nikel katkılı A356 alaşımının mekanik özelliklerinin ve mikro yapısının incelenmesi başlıklı bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. A356, Bor ve Nikel toz tanecikleri mekanik alaşımlama sırasında beraberce deformasyona uğrayarak yassılaştığı görülmüştür. Alaşım elementlerinin hemen hemen homojen olarak dağıldığı belirlenmiştir.
2. A356 alaşımına ilave edilen B miktarına bağlı olarak tane boyutunun küçüldüğü, buna karşın Ni ilavesi ile tane boyutunun arttığı belirlenmiştir. Özellikle %1 ve 2 alaşım elementi ilavelerinde net olarak görülmektedir.
3. A356 alaşımına ilave edilen B miktarına bağlı olarak, bağıl yoğunluk azalmakta, gözeneklilik artmaktadır. Buna karşın A356 alaşımına ilave edilen Ni miktarına bağlı olarak, bağıl yoğunluk artarken ve gözeneklilik düşmektedir.
4. A356 alaşımına ilave edilen B oranına bağlı olarak, mikro sertlik değerlerinin arttığı belirlenmiştir. Buna karşın makro sertlik değerlerinde sadece %2 B ilaveli A356 alaşımının sertliği artmıştır. Yine A356 alaşımına ilave edilen Ni oranına bağlı olarak, mikro sertlik değerleri artarken makro sertlik değerlerinde sadece %2 Ni içeren A356 alaşımının sertliği artmıştır.
5. A356/xB ve A356/xNi alaşımları SEM görüntülerinde ve EDX analizlerinde, alaşım elementlerinin miktarına bağlı olarak oluşan fazların çoğunlukla tane sınırlarında biriktiği ve farklı fazların oluştuğu belirlenmiştir.

A356/xB ve A356/xNi alaşımları XRD analizlerinde, alaşım elementlerinin çoğunlukla tane sınırlarında biriktiği ve farklı fazların olduğu belirlenmiştir. A356 alaşımında belirlenen Al, Si, Al₉Si, Al₅FeSi fazlarına ek olarak, B ilavesiyle yapıda AlB₂, AlB₁₂, AlFe₂B, fazlarının bulunmuştur. Ni ilavesiyle de yapıda AlNi, Al₃Ni, Al₃Ni₂ ve AlNiFe, fazları bulunmuştur.

6. Aşınma test ağırlık kayıplarına göre B ilaveli A356 alaşımlarında 10 ve 20 N da aşınma dayanımı sırasıyla %1, %0,25, %2, %0,5 ve A356 şeklinde elde edilmiştir (2000 m. göre).
7. Aşınma test ağırlık kayıplarına göre Ni ilaveli A356 alaşımlarında aşınma dayanımı sırasıyla 10 N kuvvet altında %2, %0,25, %1, %0,5 ve A356 şeklinde, 20 N kuvvet altında ise %0,25, %0,5, %2, %1 ve A356 şeklinde elde edilmiştir (2000 m. göre). 10 N ve 20 N kuvvet altında numunelerin dayanımlarının değişmesine; Nikel içeren fazların tane sınırlarında birikmesinin neden olduğu dşnlmektedir.

KAYNAKLAR

Anık, S., Dikicioğlu, A., Vural, M., ‘İmal Usulleri’, *İ.T.Ü. Makina Fakültesi*, İstanbul, (1999).

Ateş, M., "Basınçlı döküm yöntemiyle üretim OHTEA tekniği uygulaması ile ürün ve proses optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 40-44 (1995).

ASM Handbook Volume 2, ‘Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials’, *ASM International Handbook Committee*, 78-105, 509-514 (1990).

ASM Handbook Volume 3, ‘Alloy Phase Diagrams, Binary Alloy Phase Diagrams’, *ASM International Handbook Committee*, 279,337 (1992).

ASM Handbook Volume 7, ‘Powder Metal Technologies and Applications’, *ASM International Handbook Committee*, 10-14 (1998).

Beheraa, D.K., Tripathia, P., Chaubey, A.K., ‘Effect of Nickel on Mechanical Properties of Alloy Steel Produced by Powder Metallurgy’, *Materials Today:Proceedings*, 1704–1710 (2018).

Bradbury, S., ‘Powder metallurgy equipment manual’, *Metal Powder Industries Federation*, Princeton 170-172 (1986).

Boz, M., ‘Seramik Takviyeli Bronz Esaslı Toz Metal Fren Balata Üretimi ve Sürtünme- Aşınma Özelliklerinin Araştırılması’, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2003).

Demir, A., ‘Toz Metal Bir Çeliğin Mekanik Özellikleri’, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (1992).

Demir, M., ‘Al-Si-Mg alaşımlarında Mg etkisi’, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 12-102 (2012).

Demirci, K. M., ‘Dünya alüminyum ticaretinde Türkiye’ nin yeri’, *5’ inci Alüminyum Sempozyumu*, İstanbul, 17-28 (2011).

Dudas, J.H., Dean, W.A., ‘The production of precision aluminium P/M parts’, *International Journal of Powder Metallurgy*, 5(2): 21–36 (1969).

Eruslu, N., ‘Alüminyum alaşımlarının dökümü ve yapı kontrolü’, *SEGEM Yayınları*, İstanbul (1984).

Farkoosh, A. R., Javidani, M., Larouche, M. H. D., and Pekguleryuz, M., “Phase formation in as-solidified and heat-treated Al-Si-Cu- Mg-Ni alloys: Thermodynamic assessment and experimental investigation for alloy design”, *J. Alloy Compd.*, 551, 596–606 (2013).

German, R.M., “Sintering theory and practice”, *John Wiley & Sons*, New York (1996).

German, R.M., “Sinterleme Teorisi ve Uygulamaları (1. Basım)”, *Nobel Yayınevi*, Ankara (1996).

German, R. M., “Toz ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Editörler; Sarıtaş, S., Türker, M., Durlu, N., Ankara, 574 (2007).

German, R.M., "Sinterleme Teorisi ve Uygulamaları", *Nobel Akademik Yayıncılık Eğitim Danışmanlık*, İstanbul, 258-550 (2014).

Gruzleski, J.E. and Closset, B.M., “The Treatment of Liquid Aluminium – Silicon Alloys”, *American Foundrymen's Society* (1990).

Helvacı, C., “Türkiye Borat Yatakları Jeolojik Konumu, Ekonomik Önemi ve Bor Politikası”, *5.Endüstriyel Hammaddeler Sempozyumu*, İzmir, 11-27 (2003).

Hiçyılmaz, N., “Toz Metalurjisi Yöntemleri ile Elde Edilen Seramik Tanecik Destekli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerin Aşınma Özellikleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi*, Ankara, (1999).

İzgi, N., “Alüminyumun geri dönüştürülmesi ve özelliklerinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul 38-135 (2011).

Kalafatoğlu, İ., Ersan, Ö., S., Nuran, “21. Yüzyılda Bor Teknolojileri Ve Uygulamaları”, *BAÜ Fen Bil. Enst. Dergisi*, 59-71 (2000).

Karakulak, E., Yamanoglu, R., Zeren, M., Dünder, E.E., “ Production and Characterization of Hot Pressed Al-Ni Alloys”, *3th International Conference on Metallurgy and Materials* , Brno, Czech Republic, (2014).

Kayış, V., “Kısmi ve Ön Alaşımli Demir Tozları İçerisine Katılan B ve FeB İlavelerin Sinterleme Davranışları ve Mekanik Özelliklere Etkisi, Yüksek Lisans Tezi, *Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2005).

Kumdalı, F., “Alüminyum matrisli B4C takviyeli kompozitlerin toz metalurjisi yöntemi ile üretimi”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 11-17 (2008).

Mazahery, A., Shabani, M.O., “Study on microstructure and abrasive wear behavior of sintered Al matrix composites”, *Ceramics International*, Vol. 38, 4263–4269, (2012).

Ozyurek, D. and Ciftci, I., “An investigation into the wear behaviour of TiB₂ particle reinforced aluminium composites produced by mechanical alloying,” *Sci. Eng. Compos. Mater.*, 18, 5–12 (2011).

Palacı, Y., “Alüminanın Özelliklerine, Şekillendirme Yönteminin, Katkıların ve Sinterleme Sıcaklığının Etkisi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2001).

R. F., Mehl, “A Brief History of the Science of Metals”, *American Institute of Mining and Metallurgical Engineers*, New York, (1948).

Reed, R.C., “The Physical Metallurgy of Nickel and Its Alloys. In The Superalloys Fundamentals and Applications”, *Cambridge University Press*, Cambridge, 33–120 (2006).

Sago, A.S., Newkirk J.W., and Brasel, G.M., “Rapid Mechanical Alloying For Metal Powder Production”, *Adv. In PM*, Vol 2, 3-11 (1997).

Sarıtaş, S., and Doğan, C., “Metal powder production by centrifugal atomization”, *Int. J. Powder Metallurgy*, 419-427 (1994).

Shabestari, S.G, and Moemeni, H., “Effect of copper and solidification conditions on the microstructure and mechanical properties of Al–Si–Mg alloys,” *J. Mater. Process. Technol.*, 153, 193–198 (2004).

Sinha, A.K. “Boriding (Boronizing)” ASM Handbook, *ASM International*, Vol 4, 437-447 (1991).

Suryanarayana, C., “Mechanical alloying and milling”, *Progress in Materials Science*, 46, 1 – 184, (2001).

Şenel, L., “Al-Si Döküm alaşımlarının sıkıştırma döküm yöntemi ile mikroyapı ve mekanik özelliklerinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara (2004).

TAMER, Ö., “Alüminyum geri dönüşümünde sıvı metal kalitesini ölçme yöntemlerinin karşılaştırılması ve ikincil alüminyumda inklüzyon giderme”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 26-102 (2016).

TTMD-Türk Toz Metalürjisi Derneği Online Yayını, “Toz Metalürjisi”, Türk Toz Metalürjisi Derneği, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Ankara, (2003).

Turan, P., “W-Ni-B ve W-Ni Ağır Alaşımlarının Karşılaştırmalı Sinterleme Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul (2002).

Upadhyaya, G. S., “Sintered Metallic and Ceramic Materials: Preparation, Properties, and Applications”, *Wiley* (2000).

Üçışık, A. H., “Alüminyum alaşımları”, *İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Bölümü*, İstanbul (1978).

Yavuz, N., Güner, R., “Demir Esaslı Toz Metal Parçaların Elektrik Direnç Kaynağından Optimum Kaynak Şartlarının Belirlenmesi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik- Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 221-228 (2002).

Yılmaz, A., “Her Derde Deva Hazinemiz Bor”, *TÜBİTAK-Bilim ve Teknik Dergisi*, 38-48 (2002).

ÖZGEÇMİŞ

1993 yılında Ankara'nın Polatlı ilçesinde doğdum. 2011 yılında Polatlı Anadolu Teknik Lisesi Bilgisayarlı Nümerik Kontrol (CNC) bölümünden mezun oldum. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği bölümüne başladım. Lisans bitirme tezi olarak Al-Si-Fe döküm alaşımlarının Stronsiyum (Sr) ile modifikasyonu ve Zirkonyumun (Zr) bu alaşımlara etkisini inceledikten sonra 2016 yılında mezun oldum. 2016 yılında Makine ve Kimya Endüstrisi Kurumu (MKEK) Mühimmat Fabrikasında işe başladım. 2017 yılından itibaren C sınıfı İş Sağlığı ve Güvenliği Uzmanlığı sertifikasına sahibim. 2018 yılında 1 yıl süren askerlik hizmetim sonrasında şuan hala MKEK kurumunda çalışmaktayım.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : MKEK Mühimmat Fabrikası
Merkez/KIRIKKALE
Tel : (506) 539 10 92
E-posta : berattasar@hotmail.com.tr