

**ÇİNKO-ALÜMİNYUM (ZA) ALAŞIMLARININ TOZ METALURJİSİ
YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

Alper Melih ATAÇ

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
METAL EĞİTİMİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ŞUBAT 2011
ANKARA**

Alper Melih ATAÇ tarafından hazırlanan “ÇİNKO-ALÜMİNYUM (ZA) ALAŞIMLARININ TOZ METALURJİSİ YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd. Doç. Dr. AHMET GÜRAL
Tez Danışmanı, Metal Eğitimi Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Doç. Dr. Hüdayim BAŞAK
Makine Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Yrd. Doç. Dr. AHMET GÜRAL
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü

Doç. Dr. Bülent BOSTAN
Metal Eğitimi Anabilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 14/02/2011

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Alper Melih ATAÇ

**ÇİNKO-ALÜMİNYUM (ZA) ALAŞIMLARININ TOZ METALURJİSİ
YÖNTEMİYLE ÜRETİMİ, KARAKTERİZASYONU VE AŞINMA
ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**
(Yüksek Lisans Tezi)

Alper Melih ATAÇ

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**
Şubat 2011

ÖZET

Son zamanlarda, kullanımı giderek yaygınlaşan çinko-alüminyum esaslı ZA alaşımlarının geleneksel yatak alaşımlarına göre pek çok üstünlüklere sahip oldukları bilinmektedir. Bu üstünlüklerin başında, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yüksek aşınma dayanımına sahip olmaları, özgül mukavemetlerinin yüksek olması, üretimlerinin kolay ve ekonomik olması, yüksek hızlı çalışma şartlarında yüksek tribolojik davranış sergilemeleri gelmektedir. Bu nedenle çinko-alüminyum esaslı alaşımları, yatak üretiminde tercih edilmektedir.

Bu çalışmada, farklı kimyasal bileşimlere sahip çinko-alüminyum alaşımlarından ZA-8, ZA-12, ZA-27 alaşımları mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmesi amaçlanmıştır. Üretilen bu alaşımların mikroyapı karakterizasyonu ve kuru aşınma davranışları incelenmiştir. Çalışmada Spex tipi öğütücü ile mekanik alaşımlama metodu kullanılarak toz boyutundaki değişimler gözlenmiştir. Spex de farklı mekanik alaşımlama sürelerinde üretilen çinko-alüminyum alaşım tozları 320 °C’de sıcak preslenmiş ve yine aynı sıcaklıkta sinterleme yapılmıştır. Çinko-

alüminyum alaşımlarının mikroyapı karakterizasyonları SEM ve EDS ile yapılmıştır. Üretilen bu ZA alaşımlarının kuru sürtünme aşınma davranışları pin-on-disk tipi aşınma cihazında yapılmıştır.

ZA alaşımlarının presleme yoğunluklarının sinterleme yoğunluklarından yüksek olduğu bulunmuştur. Bu alaşımların yoğunlukları alüminyum oranının artışıyla azalmıştır. Aşınma test sonuçlarına göre en az aşınma ZA-27 alaşımında olurken, en fazla aşınma ZA-8 alaşımında gerçekleşmiştir. ZA alaşımlarında aşınma davranışı MA süreleriyle etkilenmiştir. MA süresinin artışıyla aşınma miktarı önce azalmış ancak 8. saat MA işlemi sonrası tekrar artmıştır.

Bilim Kodu : 710.1.092
Anahtar kelimeler : Toz Metalurjisi, karakterizasyon ve aşınma
Sayfa Adedi : 154
Tez Yöneticisi : Yrd.Doç. Dr. Ahmet GÜRAL

**ZA ALLOYS BY POWDER METALLURGY PRODUCTION
METHOD, CHARACTERIZATION AND WEAR PROPERTIES.**

(M. Sc. Thesis)

Alper Melih ATAÇ

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY**

February 2011

ABSTRACT

In recent years, the use of zinc-aluminum based ZA alloys, which are known to have better qualities in comparison to traditional bearing alloys, is becoming more and more common. Among these qualities having high wear resistance and high specific strength, being economical and easy to produce, showing high tribological behavior under high speed working conditions, are the top ones. Due to these qualities zinc-aluminum based ZA alloys are more commonly preferred in bearing production.

In this study, ZA-8-ZA-12-ZA-27 alloys with different compositions were aimed to produce through mechanical alloying method. Microstructural characterization and dry sliding wear behavior of these alloys were examined. Using Spex type mill and mechanical alloying method, changes in powder size were observed. Zinc-aluminum alloying powders produced in spex at different alloying times were hot pressed at 320 °C and sintered again at 320 °C. Microstructural characterization analyses were carried out by SEM and EDS. Dry sliding wear behavior of those ZA alloys were done on a pin-on-disc type wear machine.

It was found that the pressing densities of ZA alloys were higher than those of sintering densities. The densities of these alloys decreased with increasing aluminum rate. The lowest wear occurred in ZA-27 alloy, whereas it was the highest in ZA-8 alloy according to the results of wear tests. The wear behavior of ZA alloys was affected by MA times. At first, the amount of wear decreased with an increase MA time; however, it increased after the 8-hour MA process.

Science Code	: 710.1.092
Key Words	: Powder Metallurgy, Characterization and Wear
Page Number	: 154
Adviser	: Asist. Prof. Dr. Ahmet GÜRAL

TEŞEKKÜR

Tüm çalışmalarım esnasında, ilgi ve desteğini hiçbir zaman esirgemeyip bana rehberlik eden, tecrübeleri ile bana yol gösteren saygıdeğer hocam Yrd. Doç. Dr. Ahmet GÜRAL'a, deneysel çalışmalarım için destek veren Prof. Dr. Süleyman TEKELİ, Prof. Dr. Metin GÜRÜ, Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK, Doç. Dr. Bülent BOSTAN, Öğr. Gör. Murat AKIN, Öğr. Gör. Sinan AKSÖZ ve değerli arkadaşlarım Mustafa TÜRKAN, Mustafa DURUM, Zemzem ALTUNOK, Aynur TOPUZ, Seval-Kemal GÜLERYÜZ'e ve maddi ve manevi her zaman beni destekleyen, yanımda olan sevgili aileme teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xiv
RESİMLERİN LİSTESİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xix
1. GİRİŞ.....	1
2. ÇİNKO ESASLI ALAŞIMLARIN FAZ DİYAGRAMLARI.....	3
2.1. Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı.....	3
2.2. Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı.....	4
2.3. Çinko-Alüminyum Esaslı alaşımların Özellikleri.....	5
2.3.1. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarının Fiziksel Özellikleri.....	6
2.2.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarının Mekaniksel Özellikleri.....	7
3. TOZ ÜRETİMİ.....	9
3.1. Öğütme.....	9
3.2. Elektroliz.....	10
3.3. Kimyasal İndirgeme.....	10
3.4. Atomizasyon.....	10

Sayfa

4. MEKANİK ALAŞIMLAMA METODU.....	12
4.1. Mekanik Alaşımlama İşlemi.....	12
4.2. Mekanik Alaşımlamada Kullanılan Öğütücü Türleri.....	15
4.2.1. Bilyalı yatay değirmenler (Ticari değirmenler).....	15
4.2.2. SPEX tipi öğütücüler.....	17
4.2.3. Düzlemsel (Planeter) tip bilyalı değirmenler.....	17
4.2.4. Atritör tip değirmenler	19
4.3. Mekanik Alaşımlama Mekanizması.....	20
4.3.1. Sünek-sünek alaşımlama sistemi.....	24
4.3.2. Sünek-kırılgan alaşımlama sistemi.....	25
4.3.3. Kırılgan-kırılgan alaşımlama sistemi.....	26
4.4. Mekanik Alaşımlamayı Etkileyen Parametreler.....	27
4.4.1. Değirmen (Öğütücü) tipi.....	28
4.4.2. Öğütme haznesi.....	28
4.4.3. Öğütme hızı.....	29
4.4.4. Öğütme süresi.....	30
4.4.5. Öğütme malzemesi.....	31
4.4.6. Bilya – Toz ağırlık oranı.....	32
4.4.7. Öğütme haznesi doldurma miktarı.....	33
4.4.8. Öğütme atmosferi.....	33
4.4.9. Sıcaklık etkisi.....	34
4.4.10. İşlem kontrol kimyasalı (İKK).....	35

Sayfa

4.5. Presleme.....	36
4.6. Sinterleme.....	39
5. AŞINMA.....	45
5.1. Tribolojik Sistem.....	47
5.2. Aşınma Mekanizmaları.....	48
5.2.1. Adhesiv (Yapışmalı) Aşınma Mekanizması.....	49
5.2.2. Abrasiv Aşınma Mekanizması.....	51
5.2.3. Yorulma Aşınması.....	53
5.2.4. Erozif aşınma.....	54
5.2.5. Öğütmeli aşınma.....	54
5.2.6. Oymalı aşınma (Gouging Wear).....	55
5.2.7. Kazımalı aşınma (Fretting wear).....	55
5.2.8. Tribosüblimasyon ve difüzyon aşınması.....	56
5.2.9. Termal aşınma (Termal etkenler).....	57
5.3. Aşınma Testleri ve Ölçüm Yöntemleri.....	57
5.3.1. Ağırlık farkı metodu.....	58
5.3.2. Kalınlık farkı metodu.....	60
5.3.3. İz değişiminin ölçülmesi metodu.....	61
5.3.4. Aşınmanın radyo-izotoplarla ölçülmesi yöntemi.....	61
5.3.5. Ultrasonik yöntemle aşınmanın tespiti yöntemi.....	61
5.3.6. Optik yöntemle aşınmanın tespiti.....	62
5.3.7. Mekanik ölçüm yöntemiyle aşınmanın tespiti.....	63

Sayfa

6. MALZEME VE METOD.....	64
6.1. Deneysel Malzeme.....	64
6.2. Deneysel Yöntem.....	64
6.2.1 Karışım toz hazırlama işlemleri.....	64
6.2.2. Mekanik alaşımlama cihazının optimizasyonu.....	65
6.2.3. Mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının preslenmesi.....	66
6.2.4. Sinterleme İşlemleri.....	67
6.3. Metalografik Çalışmalar.....	67
6.4. Yoğunluk ölçümleri.....	68
6.5. Aşınma İşlemleri.....	68
7. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME.....	71
7.1. MA İşlemleri.....	71
7.1.1. MA sonrası toz karakterizasyonu.....	71
7.1.2 Toz boyut analizleri.....	74
7.2. ZA Alaşımlarının Sinterleme Sonları Mikroyapı Karakterizasyonu.....	75
7.2.1. ZA-8 alaşımlarının EDS sonuçları.....	75
7.2.2. ZA-12 alaşımlarının EDS sonuçları.....	78
7.2.3. ZA-27 alaşımlarının EDS sonuçları.....	80
7.3. Yoğunluk.....	83
7.4. Kuru Sürtünme Aşınma Davranışları.....	85
7.4.1. Aşınma Yüzeyleri.....	88
8. SONUÇLAR.....	93
KAYNAKLAR.....	95
EKLER.....	106
ÖZ GEÇMİŞ.....	154

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler.....	4
Çizelge 2.2. Çinko-alüminyum-bakır sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri.....	6
Çizelge 2.3. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri.....	7
Çizelge 2.4. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak Alaşımlarının mekanik özellikleri.....	8
Çizelge 6.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan ZA alaşımlarının kimyasal bileşimi	64
Çizelge 7.1. ZA alaşımlarının sıcak presleme sonrası yoğunlukları.....	84
Çizelge 7.2. ZA alaşımlarının sinterleme sonrası yoğunlukları.....	84

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Çinko-alüminyum faz diyagramı	3
Şekil 2.2. Çinko-alüminyum-bakır faz diyagramı.....	5
Şekil 3.1. Bilyalı değirmende toz öğütümü.....	9
Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi	11
Şekil 4.1. Atritör, bilyalar ve kolların şematik görünüşü	13
Şekil 4.2. Öğütme işleminde bilyaların karşılıklı kesişme hareketleri.....	16
Şekil 4.3. (a)Yüksek Enerjili Planetary Değirmen, (b) Değirmen içerisindeki bilyaların hareketinin şematik gösterimi	18
Şekil 4.4. Başlangıç tozları ve alaşımlamaya bağlı olarak deformasyon tavırları	21
Şekil 4.5. MA işleminde oluşan Bilya-Toz-Bilya çarpışması.....	22
Şekil 4.6. MA işleminin şematik gösterimi. (a) öğütme işleminin başlangıcı ve (b) birkaç çarpışma işlemi sonrası.....	22
Şekil 4.7. MA esnasında sünek-sünek tozların oluşturduğu çeşitli durumlar	25
Şekil 4.8. Kırılgan-sünek tozların mekanik alaşımlama esnasındaki oluşumları.....	26
Şekil 4.9. MA işleminde üretim aşamasını etkileyen parametrelerin şematik gösterimi.....	27
Şekil 4.10. Ni-Ta sisteminde öğütme süresinin parçacık boyutuna etkisi	30
Şekil 4.11. Örslü presleme tek hareketli sıkıştırmanın en basit şekli.....	36
Şekil 4.12. Çift hareketli sıkıştırma ile sıkıştırılan zımba	37
Şekil 4.13. Yüzer dişi kalıplı presleme ile çift hareketli zımba etkisi oluşturma	37
Şekil 4.14. a) Çift yönlü soğuk preslemenin şematik gösterimi b) Presleme basıncına bağlı toz ve kalıp etkileşimi	38

Şekil	Sayfa
Şekil 4.15. Bakır tozundan sıkıştırılmış silindirlerde sabit yoğunluk çizgileri. Çizgiler g/cm^3 olarak gösterilmiş olup, tek ve çift hareketli sıkıştırmalarda boy ve yarıçapa göre çizilmiştir.....	39
Şekil 4.16. Çift-küre sinterleme modeli.....	41
Şekil 4.17. Boyun çapı X olan iki küresel parçacığın sinterleme profili.....	42
Şekil 4.18. Sinterleme basamaklarına göre gözenek yapısındaki değişim	42
Şekil 4.19. Sinterlemenin son aşamasında gözenek izolasyonu ve küreselleşmesi...	43
Şekil 5.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi.....	45
Şekil 5.2. Tribolojik sisteme giren enerji dağılımı.....	48
Şekil 5.3. Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi. a) iki çıkıntının buluşması ve bağ oluşturmaları b) Bağın koparak bir yüzden diğerine malzeme transferinin oluşumu c) Uzanmış olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi sonucunda da yüzeyde kırıntı oluşumu...	50
Şekil 5.4. Abrasiv aşınma şeması.....	52
Şekil 5.5. İki elamanlı abrasiv aşınma.....	52
Şekil 5.6. Üç elamanlı abrasiv aşınma.....	52
Şekil 5.7. Bir kesici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmesinin oluşum mekanizması.....	55
Şekil 5.8. Yüzeyler arası malzeme transferi.....	56
Şekil 5.9. Aşınmayı belirlemek için oluşturulan çukur.....	62
Şekil 6.1. ZA alaşımlarının preslenmesinde kullanılan metal kalıp.....	66
Şekil 6.2. Sinter ve yaşlandırma ısı işlemi yapılan fırın.....	67
Şekil 6.3. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü.....	69
Şekil 7.1. ZA alaşımlarının MA süresine göre ortalama tane boyut grafiği.....	74
Şekil 7.2. MA işlemi sonrası preslenmiş ZA alaşımlarının yoğunluk grafiği.....	84

Şekil	Sayfa
Şekil 7.3. Sinterleme işlemi sonrası ZA alaşımlarının yoğunluk grafiği.....	85
Şekil 7.4. ZA alaşımlarının mekanik alaşımlama sürelerine göre aşınma oranları	86
Şekil 7.5. ZA alaşımlarının mekanik alaşımlama sürelerine göre sürtünme katsayıları.....	87
Şekil 7.6 8 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği.....	92
Şekil 7.7 6 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği.....	92

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Ticari olarak kullanılan değirmenler.....	16
Resim 4.2. SPEX tipi karıştırıcı (a) SPEX 800 tipi değirmen, (b) SPEX’e ait öğütme kabı, kapak, bilya ve conta.....	17
Resim 4.3. Planeter tipi bilyalı değirmen.....	18
Resim 4.4. Atritör tipi mekanik alaşımlama ünitesi.....	20
Resim 4.5. 6061 Alüminyum tozları ile grafit tozlarının mekanik alaşımlama işlemi süresince toz yapısının değişimi (a) Alaşımlama öncesi tozlar, (b) 20 saat MA, (c) 30 saat MA, (d) 40 saat MA, (e) 60 saat MA, (f) 70 saat MA..	31
Resim 6.1. SPEX tipi karıştırıcı (a) SPEX 800 tipi değirmen, (b) SPEX’e ait öğütme kabı, kapak, bilya ve conta.....	65
Resim 7.1. MA işlemi yapılmamış tozların SEM yapıları.....	71
Resim 7.2. 1 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	71
Resim 7.3. 2 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	72
Resim 7.4. 3 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	72
Resim 7.5. 4 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	72
Resim 7.6. 5 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	72
Resim 7.7. 6 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	73
Resim 7.8. 7 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	73
Resim 7.9. 8 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27...	73
Resim 7.10. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının SEM görüntüsü.....	76
Resim 7.11. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 1. noktanın EDS analizi.....	76
Resim 7.12. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 2. noktanın EDS analizi.....	77
Resim 7.13. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının SEM görüntüsündeki genel EDS Analizi.....	77
Resim 7.14. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının Element Dağılım Haritası.....	77
Resim 7.15. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımlarının SEM görüntüsü.....	78

Resim	Sayfa
Resim 7.16. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 1. noktanın EDS analizi.....	79
Resim 7.17. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 2. noktanın EDS analizi.....	79
Resim 7.18. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının SEM görüntüsündeki genel EDS Analizi.....	79
Resim 7.19. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının Element Dağılım Haritası.....	80
Resim 7.20. 4 saat MA yapılmış ZA-27 alaşımlarının SEM görüntüsü.....	81
Resim 7.21. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 1. noktanın EDS analizi.....	81
Resim 7.22. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 2. noktanın EDS analizi.....	82
Resim 7.23. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının SEM görüntüsündeki genel EDS Analizi.....	82
Resim 7.24. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının Element Dağılım Haritası.....	82
Resim 7.25. 5 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27.....	89
Resim 7.26. 6 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27.....	89
Resim 7.27. 7 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27.....	90
Resim 7.28. 8 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27.....	90

SİMGELER VE KISALTMALAR

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

Simgeler

Al	Alüminyum
Ar	Argon
Bi	Bizmut
Co	Kobalt
Cr	Krom
Fe	Demir
Ge	Germanyum
H	Hidrojen
He	Helyum
Mn	Mangan
Ni	Nikel
Si	Silisyum
Ta	Tantal
Ti	Titanyum
W	Tungsten

Kısaltmalar

BTO	Bilya toz oranı
İKK	İşlem kontrol kimyasalı
MA	Mekanik alaşımlama
MD	Mechanical Disordering (Mekanik düzensizlik)
MM	Mechanical Milling (Mekanik öğütme)
ODS	Oksit dağılımı ile sertleştirilmiş
ZA	Çinko-Alüminyum

1. GİRİŞ

Geleneksel yatak malzemelerinin yerine başarılı bir şekilde kullanılan çinko-alüminyum esaslı malzemeler uzun süren araştırmalar sonucunda geliştirilmiştir [1-3]. 1930-1940 yılları arasında % 4 Al, %0,03 Mg ve çok düşük oranda bakır içeren ZAMAK-3 ve ZAMAK-5 adlı çinko-alüminyum esaslı alaşımlar basınçlı döküm yöntemi ile üretilmiştir [4]. Daha sonra, II. Dünya Savaşı yıllarında, Almanya'da bakır ve kalay tedarikinde karşılaşılan güçlükler nedeniyle bronzun yerine kullanılmak amacıyla yüksek oranlarda alüminyum ve düşük oranlarda bakır içeren çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımları geliştirilmiştir [3,5,6]. Savaş sonrası, malzeme tedarikinde karşılaşılan zorluklar ortadan kalktığında kaymalı yatak üretiminde yeniden geleneksel yatak malzemeleri kullanılmaya başlanmıştır [7-10]. Ancak, az sayıda da olsa bazı firmalar çinko-alüminyum esaslı yatak alaşımlarını üretmeye ve geliştirmeye devam etmişlerdir. 1960'lı yıllarda, ILZRO (International Lead-Zinc Research Organization) tarafından desteklenen ve New Jersey Çinko Şirketi tarafından yürütülen bir araştırma sonucunda; %12 oranında alüminyum içeren ve ilk adı ILZRO-12 olan ve daha sonra ZA-12 olarak gösterilen bir alaşım geliştirilmiştir [11,12]. Daha sonraki yıllarda, Noranda Araştırma Merkezi tarafından çinko-alüminyum esaslı alaşımlar üzerine yapılan araştırma çalışmaları sonucunda, sırasıyla ZA-8 ve ZA-27 olarak adlandırılan alaşımlar geliştirilmiştir [13-15]. Aynı yıllarda, Vöest-Alpine of Linz adlı Avusturya firması tarafından, Alzen alaşımları olarak adlandırılan, %27-70 Al ve %0,5 Cu içeren çinko-alüminyum alaşımları geliştirilmiştir [16,17]. Geliştirilen bu alaşımlardan, Alzen-305 ($ZnAl_{35}Cu_5$) olarak bilinen alaşım halen İngiltere'de yatak malzemesi olarak üretilmektedir [18-20]. Yatak malzemesi olarak kullanılan çinko-alüminyum esaslı alaşımların geliştirilmesine yönelik çalışmalar bugün de büyük bir hızla sürdürülmektedir [21,22].

Çinko-Alüminyum esaslı alaşımların yüksek aşınma dayanımına sahip olmaları, özgül mukavemetlerinin yüksek olması, üretimlerinin kolay ve ekonomik olması ve aşırı yükleme, yetersiz yağlama ve yüksek hızlı çalışma koşullarında bile ideal tribolojik davranış sergilemeleri gelmektedir [23-25]. Söz konusu alaşımların bütün

bu üstünlüklerinin yanında, bazı de javantajlarının da olduğu bilinmektedir. Bu de javantajların başında, özellikle bakır içeren alaşımlarda, faz dönüşümleri sonucunda meydana gelen boyut değişimleri gelmektedir [15,26]. Bu sorun, alaşımlara ısı işlem uygulamak veya uygun alaşım elementi katmak suretiyle giderilmeye çalışılmaktadır [1,27,28]. Bu amaçla geliştirilen çinko-alüminyum-silisyum alaşımlarının üstün aşınma direncine sahip olmalarına karşın, mukavemet değerlerinin bakır içeren üçlü alaşımlardan daha düşük olduğu görülmüştür [1-3,26,29]. Bu olumsuzluğu gidermek için son yıllarda, dördü çinko-alüminyum-bakır-silisyum esaslı yatak alaşımları geliştirilmeye çalışılmaktadır [26,30].

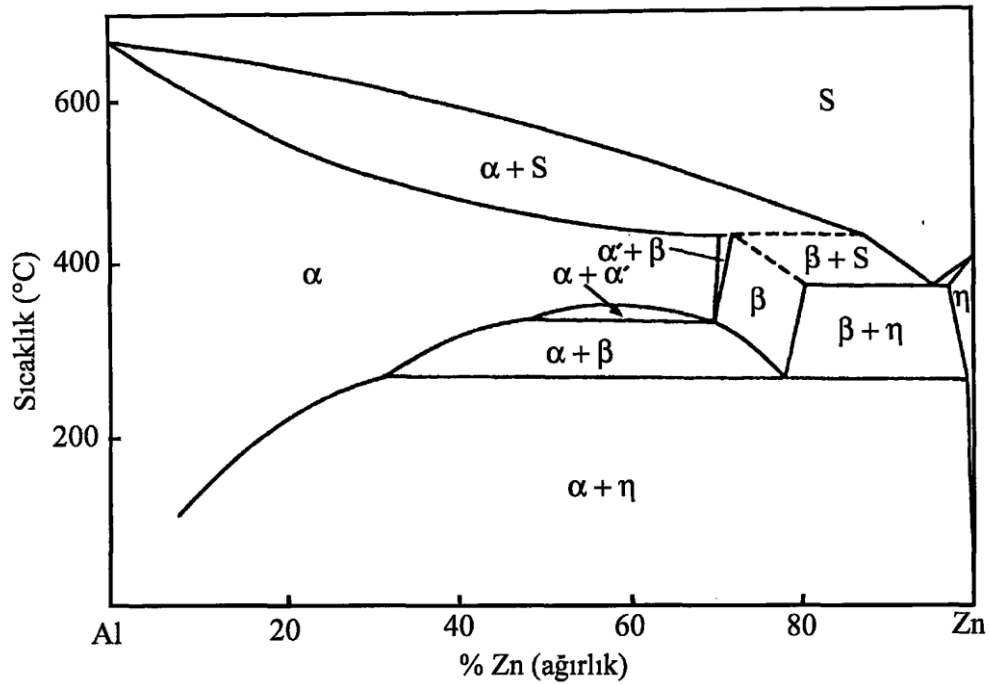
Geliştirilen çinko-alüminyum esaslı alaşımlar, yatak üretiminde gittikçe artan oranda kullanılmaktadır [10,24,31]. Söz konusu alaşımlardan üretilen yataklar, daha çok düşük hız ve aşırı yüklemenin söz konusu olduğu uygulamalarda tercih edilmektedir [23,25,32]. Bu alaşımlar, kaymalı yatak üretiminde başka mühendislik amaçlı bazı parçaların üretiminde de gittikçe artan oranda kullanılmaktadır [26,29]. Örneğin; otomobillerde kullanılan karbüratör parçaları, silindir kapağı, dişli kutusu kapakları, motor ayakları, biyel kolu ve jant gibi parçalar bu alaşımlardan üretilmektedir [15,29,33].

Bu çalışmada, farklı kimyasal bileşime sahip Çinko-Alüminyum (ZA) alaşımları SPEX tipi cihazda MA yöntemi ile tozları üretilmeye çalışılmıştır. Bu alaşımların mikroyapıları karakterizasyonu ve aşınma davranışları incelenmiştir. SPEX de üretilen ZA alaşım tozları presleme ve sinterleme işlemleri yapılarak yoğunluk değişimleri tespit edilmiştir. ZA alaşımlarının mikroyapı karakterizasyonları yapabilmek için SEM ve EDS analizleri yapılarak elementlerin yapı içerisine dağılımları incelenmiştir. ZA alaşımlarını pin-on-disk tipi aşınma cihazında tüm ZA alaşımlarının kuru sürtünme aşınma davranışları aynı şartlar altında incelenmesi amaçlanmıştır.

2. ÇİNKO ESASLI ALAŞIMLARIN FAZ DİYAGRAMLARI

2.1. Çinko-Alüminyum Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum alaşımlarının ergime sıcaklıkları ve katılaşma aralıkları içerdikleri alüminyum oranına bağlıdır. Çinko-alüminyum faz diyagramı, Şekil 1’de verilmiştir. Bu diyagramda, alüminyumca zengin faz bölgesi α , çinkoca zengin faz bölgesi ise η olarak adlandırılmaktadır [34]. Çinko, alüminyum içerisinde %80 Zn oranına kadar çözülerek α , α' ve β olarak adlandırılan, yüzey merkezli kübik yapıli faz bölgeleri oluşturmaktadır [35].



Şekil 2.1. Çinko-alüminyum faz diyagramı [36]

Söz konusu faz diyagramında, 382°C sıcaklıkta ve %95 Zn bileşim oranında ötektik nokta yer almaktadır. Ötektik dönüşüm sonucunda, yüzey merkezli kübik yapıli α ile sıkı düzenli hegzagonal yapıli η fazlarını içeren bir yapı oluşmaktadır. Alüminyumun η fazı içerisindeki katı çözünürlüğü, ötektik sıcaklık çizgisinde %5 iken, bu değer sıcaklık düştükçe azalmakta ve 20°C sıcaklıkta %0,05 Al oranına kadar düşmektedir. β fazı, 275°C den daha düşük sıcaklıklarda, alüminyumca zengin α ile çinkoca

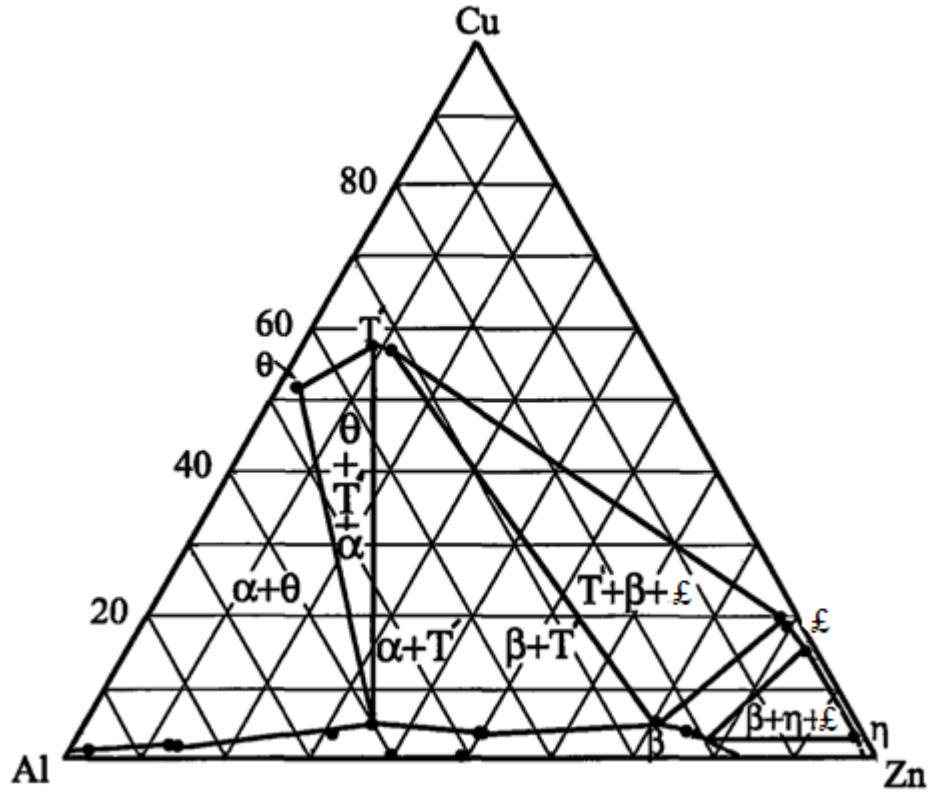
zengin η fazlarına dönüşmektedir [36]. Çinko-alüminyum faz diyagramında ortaya çıkan önemli faz dönüşümleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Çinko-alüminyum faz diyagramındaki önemli dönüşümler [36]

Dönüşüm	Çinko oranı (%)	Sıcaklık (°C)
Ötektik $S \leftrightarrow \beta + \eta$	95	382
Ötektoid $\beta \leftrightarrow \alpha + \eta$ $\alpha/\alpha' \leftrightarrow \alpha + \beta$	78 52	276 340
Peritektik $\alpha + S \leftrightarrow \beta$	71.6	443

2.2. Çinko-Alüminyum-Bakır Faz Diyagramı

Çinko-alüminyum-bakır faz diyagramlarında; θ (CuAl₂), ξ (CuZn₄) ve T'(Al₄Cu₃Zn) gibi metallerarası (intermetalik) bileşiklerin oluşması nedeniyle, faz dönüşümleri ikili çinko-alüminyum alaşım sistemine göre çok daha karmaşık olup, bu dönüşümlerin tamamlanması uzun süre almaktadır [37]. Murphy tarafından belirlenen Zn-Al-Cu faz diyagramının, 350°C sıcaklıktaki izotermal kesiti Şekil 2.2’de, bu sistemde meydana gelen katı hal dönüşümleri de Çizelge 2.2’de verilmiştir.



Şekil 2.2. Çinko-alüminyum-bakır faz diyagramı [38]

Faz dönüşümlerini büyük ölçüde yavaşlatan bakır katkısı, aynı zamanda kalıcı bir hacimsel büyümeye yol açmaktadır [38]. Zn-Al-Cu alaşımlarında görülen bu hacimsel büyümenin, katılaşma sırasında oluşan yarı kararlı (metastabil) fazların kararlı fazlara dönüşmesi sonucunda meydana geldiği belirlenmiştir [39]. Dörtlü faz dönüşümü olarak bilinen $\alpha + \epsilon \leftrightarrow T' + \eta$ reaksiyonu sonucunda %4,5 oranında kalıcı bir hacimsel büyümenin meydana geldiği belirlenmiş bulunmaktadır [40].

Çizelge 2.2. Çinko-alüminyum-bakır sisteminde meydana gelen katı hal dönüşümleri [41].

Dönüşüm	Sıcaklık (°C)
$T'+\beta \leftrightarrow \alpha+\xi$	288
$\beta \leftrightarrow \alpha+\eta$	275
$\beta+\xi \leftrightarrow \alpha+\eta$	276
$\alpha+\xi \leftrightarrow T'+\eta$	268

Bu tabloda; α alüminyumca zengin fazı, β çinkoca zengin fazı, ξ yarı kararlı (metastabil) bir yapıya sahip olan bakırca zengin fazı ve T' kararlı yapıya sahip olan bakırca zengin fazı göstermektedir [28,42-44].

2.3. Çinko-Alüminyum Alaşımlarının Özellikleri

2.3.1. Çinko-Alüminyum alaşımlarının fiziksel özellikleri

İkili çinko-alüminyum denge diyagramından da görüldüğü gibi, alaşımların ergime noktası ve katılaşma aralığı alüminyum oranına bağlı olarak değişmektedir. Alüminyum oranı arttıkça, alaşımların ergime noktası yükselmekte, katılaşma aralığı ise daralmaktadır [44,45]. Çinko-alüminyum esaslı alaşımların, geleneksel döküm alaşımların çoğundan daha düşük ergime sıcaklığına sahip olması, döküm için enerji sarfiyatını azaltmakta ve döküm gereçlerinin ömrünü artırmaktadır [46]. Çizelge 2.3'de çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri verilmiştir.

Çinko-alüminyum esaslı alaşımların ısı iletkenlik, ısı genleşme ve elektriksel iletkenlik katsayıları alüminyum alaşımları dışındaki geleneksel yatak alaşımlarının söz konusu katsayılarından daha yüksek olup, bu değerler artan alüminyum oranı ile artmaktadır. Diğer taraftan, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yoğunlukları bronz, pirinç ve dökme demir gibi geleneksel yatak alaşımlarının yoğunluklarından daha

düşüktür [47]. Ayrıca, çinko-alüminyum esaslı alaşımların yoğunlukları alüminyum oranı arttıkça azalmakta, bu da söz konusu alaşımların birim maliyetini düşürmektedir. Üçlü çinko-alüminyum-bakır alaşımlarında katılaşma sırasında oluşan yarı kararlı fazların, yaşlandırma sırasında kararlı fazlara dönüşmesi sonucunda önemli ölçüde hacimsel büyüme meydana gelmektedir [48].

Çizelge 2.3. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının fiziksel özellikleri [40,49]

ALAŞIMLAR						
Fiziksel Özellikler	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
Yoğunluk (g/cm ³)	6,30	6,03	5,0	8,50	8,83	6,94
Katılaşma Büzülmesi (%)	1,0	1,2	1,3	-----	-----	1,0
Katılaşma Sıcaklık Aralığı (°C)	404-375	430-80	490-380	1010-855	975-855	1232
Isıl Genleşme Katsayısı (µm/m°K)	23,2	24,1	26,0	18	18	11,9
Isıl İletkenlik Katsayısı (W/m°K)	115	116	126	72	59	45
Elektrik İletkenlik Katsayısı (%IACS)	28	28	30	15	12	6

2.2.2. Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlarının Mekaniksel Özellikleri

İkili çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerlerinin pek çok uygulama için yeterli olmadığı bilinmektedir [45,49]. Düşük oranlardaki bakır, magnezyum ve silisyum gibi element katkılarının söz konusu alaşımların mekanik

özelliklerini iyileştirildiği belirlenmiştir [50,51]. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri Çizelge 2.4’de verilmiştir. Bu tablodan, çinko-alüminyum alaşımlarının geleneksel yatak alaşımlarından daha yüksek mukavemet değerlerine sahip oldukları görülmektedir. Sıcaklık arttıkça, çinko-alüminyum alaşımlarının sertlik ve mukavemet değerleri önemli ölçüde düşerken, süneklik değerleri artmaktadır [52,53]. Bu yüzden ZA-27 alaşımının 120°C’nin, ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarının da 90°C’nin altındaki sıcaklıklarda kullanılması önerilmektedir [45].

Çizelge 2.4. Çinko-alüminyum esaslı bazı alaşımlar ile geleneksel yatak alaşımlarının mekanik özellikleri [40,45,49,54]

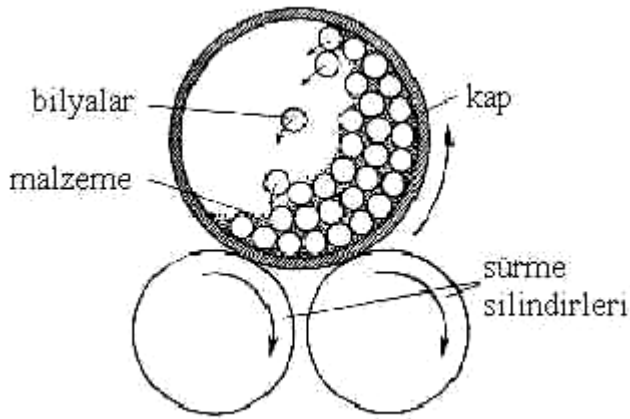
ALAŞIMLAR						
Mekanik Özellikler	ZA-8	ZA-12	ZA-27	SAE-40 Pirinci	SAE-660 Bronzu	Kır Dökme Demir
Çekme Dayanımı (MPa)	221-255	310-345	414-441	255	240	214
Akma Dayanımı (MPa)	200-210	207-268	372-393	114	124	124
Kopma Uzaması (%)	1-2	1,5-2,5	2-3	30	20	-----
Brinell Sertlik Değeri (BSD)	85-90	85-95	110-120	60	65	210
Darbe Dayanımı (J)	13-18	17-22	25-40	15	8	-----
Yorulma Dayanımı (MPa)	103	103	172	-----	-----	-----
Kayma Mukavemeti (MPa)	241	255	270	-----	-----	-----

3. TOZ ÜRETİMİ

Hemen hemen bütün malzemeler toz haline getirilebilir, fakat tozları üretmek için seçilen metotlar malzeme özelliklerine bağlıdır. Öğütme, elektroliz, kimyasal indirgeme ve atomizasyon dört ana toz üretim metodudur. Bu üretim metotlarına ilave olarak, bazı seçilmiş malzemeler için özel toz üretim teknikleri de kullanılır. Endüstride kullanılan tozların % 60'dan fazlası atomizasyon yöntemi ile üretilmektedir [55].

3.1. Öğütme

Metaller arası bileşikler, demir alaşımları, demir-krom, demir-silisyum v.b. gibi kırılgan malzemeler mekanik olarak bilyalı değirmenlerde öğütülürler (Şekil 3.1). Fakat öğütme işlemi bir çok sünek metal için uygun değildir; çünkü bu metaller kolayca kırılmazlar. Sünek tanecikler kırılma yerine birbirleri ile soğuk olarak kaynaklanır ve daha büyük tanecik oluştururlar. Günümüzde öğütme işlemi alüminyum gibi sünek metallere pul toz üretiminde de kullanılır. Bu durumda, soğuk kaynaklanmayı ve yapışmayı engellemek için yağlayıcılar kullanılır [55].



Şekil 3.1. Bilyalı değirmende toz öğütümü [55]

3.2. Elektroliz

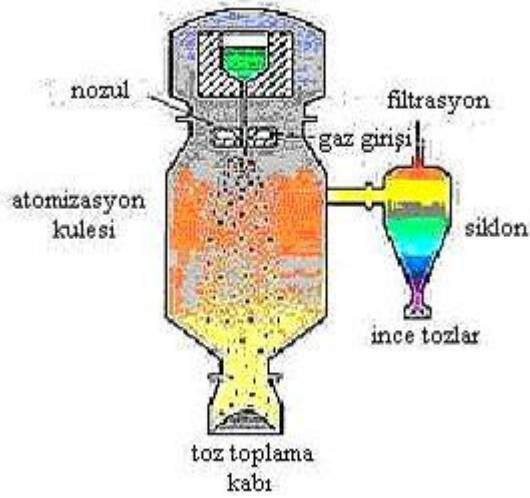
Elektrolitin kimyasal bileşimi ve mukavemeti, sıcaklık, akım yoğunluğu gibi şartları altında seçerek, birçok metal sünger veya toz durumunda katot üzerinde biriktirilmektedir. Sonraki aşamada yıkama, kurutma, indirgeme, tavlama ve öğütme yapılabilmektedir. Bu yöntemle üretilen metallerin başında bakır gelir, aynı zamanda krom ve magnezyum da bu yöntemle üretilir. Elektrolitik yöntemle üretilen tozların saflık değerleri yüksektir [55].

3.3. Kimyasal İndirgeme

Demir tozlarının üretiminde bu metot çok kullanılmaktadır. Bu yöntemde seçilen cevher öğütülür, kokla karıştırılır, karışım indirgemenin olduğu sürekli fırından geçirilir ve kek şeklinde sünger demir elde edilir. Sünger demir daha sonra öğütülür, metalik olmayan malzemelerden ayrılır ve elenir. Tozların saflığı ham malzemelere bağlıdır. Düzensiz süngerimsi tanecikler yumuşaktır ve kolayca preslenebilir ve böylece ham mukavemeti iyi olan ürünler oluşur. Benzeri şekilde refrakter metaller de oksitlerinin hidrojenle indirgenmesiyle üretilirler [55].

3.4. Atomizasyon

Bu yöntemde toz malzemeler sıvı metalin başka bir katı yüzeye çarpmadan önce küçük damlacıkların hızlı bir şekilde dağılarak katılaşması ile elde edilir (Şekil 3.2). Bu ise sıvı metalin, bir gaz veya sıvı akışkan jeti ile parçalanmasını sağlamak suretiyle gerçekleştirilir. Kullanılan gaz çeşitleri genellikle argon, azot veya hava, sıvı olarak ise su kullanılır. Püskürtme açısı ve konisi, akışkan hızı, debisi, akan metalin kalınlığı gibi birçok parametrenin kontrolü ile çok farklı boyutlarda toz üretimi mümkündür. Katılaşma hızına bağlı olarak parçacığın şekli küresel halden, su veya düşük ısı kapasiteli gaz kullanılması halinde ise daha düzensiz parçacığa kadar farklılık gösterebilir [55].



Şekil 3.2. Düşey gaz atomizasyon ünitesi [55]

Pratikte bu yöntem ergitilebilen bütün metallere uygulanabilir. Ticari olarak üretilen tozlar arasında, demir, takım çelikleri, alaşımlı çelikler, bakır, pirinç, bronz ve alüminyum, kurşun, kalay çinko ve kadmiyum gibi diğer düşük ergime dereceli metal tozları sayılabilir. Krom gibi kolay oksitlenebilen metaller içeren alaşımlar, argon gibi asal gaz altında gittikçe artan oranda üretilmektedir.

Atomizasyon yönteminin avantajlarından biri de alaşım tozlarının ergitilmesinde rahatlıkla kullanılabilmesidir, bu yöntemle üretilen tozların bileşimleri her bir toz tanesinde aynı kalmaktadır.

4. MEKANİK ALAŞIMLAMA METODU

4.1. Mekanik Alaşımlama İşlemi

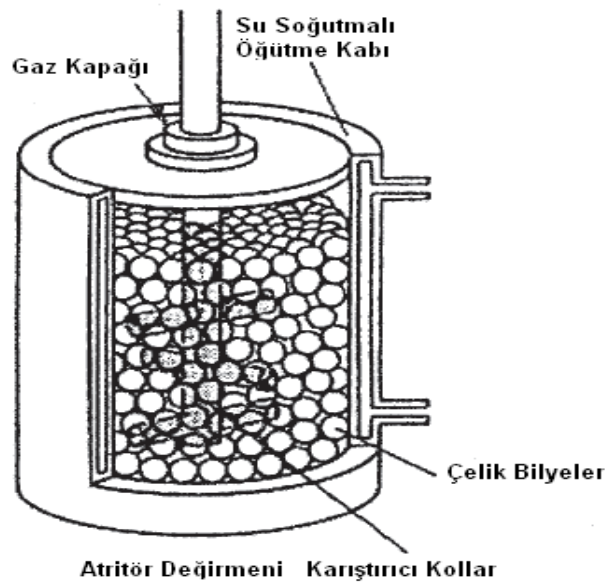
Mekanik alaşımlama (MA), sağlamış olduğu yüksek avantajlar ve özellikler sayesinde günümüzde kullanım sahaları gittikçe artmaktadır. Kullanımlarındaki artış ise MA'nın kullanımının ekonomik oluşu ve uygulama alanının geniş olmasından kaynaklanmaktadır. MA genellikle homojen dağılımlı ısıtıl veya kimyasal işlemlere başvurmadan gerçekleştirilen, bir katı hal reaksiyonudur. Başka teknik ve yöntemlerle karıştırılması zor veya imkânsız olan alaşım elementlerinin MA yöntemi ile karıştırılabilmesi bu yöntemi üstün kılmaktadır. MA işlemi sırasında oluşturulan karışım katı-katı bir karışım olduğundan dolayı normal şartlar dışına çıkılabilmektedir [56].

MA ilk olarak 1966 yılında International Nickel Company (INCO) şirketince Benjamin ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir [57]. Bu yöntem ilk olarak oksit dağılımı ile sertleştirilmiş (ODS) alaşımların üretimi amacıyla yapılmıştır. Ancak daha sonraki çalışmalar ticari uygulama alanlarından Fe, Ni ve Al esaslı süper alaşımların üretimi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu yöntemi diğer yöntemlerden ayıran en önemli özellik; normal ergitme teknikleriyle alaşım haline getirilemeyen sistemler bu yöntem sayesinde alaşımlanabilmektedir. Bunun yanı sıra son yıllarda bu yöntem ile nano boyutlu malzemeler de üretilebilmektedir [58].

MA işleminde kullanılan öğütücüler, bilya-toz-cidar çarpışması ve sürtünmeden açığa çıkan ısıdan dolayı genellikle su soğutmalıdır. Öğütme işlemi sırasında alaşımlanan veya öğütülen tozlarda devamlı bir kırılma ve birleşme meydana gelmektedir. Bu kırılan yüzeyler oksitlenmeye maruz kaldığından dolayı koruyucu bir atmosfer tarafından oksitlenme önlenmek zorundadır. Öğütme ortamındaki oksitlenmeyi azaltmak için ise Ar, He ve H gazları kullanılmaktadır [59].

MA işlemi tozların paslanmaz çelik kazanlar içerisinde karıştırılması ve arzu edilen sürede öğütülmesi (genellikle sertleştirilmiş çelik bilyalar veya tungsten bilyalar ile)

işlemdir (Şekil 4.1). Kullanılan malzemenin oksitlenmesini engellemek/azaltmak için genellikle koruyucu atmosfer olarak argon gazı kullanılmaktadır. Eğer nitrürleme gibi bir işlem de varsa atmosfer olarak azot (N_2) kullanılabilir. MA işleminde kullanılan tozlar yumuşak ise, işlem kontrol kimyasalı (örneğin: stearik asit) kullanılabilir. Üretilcek olan tozun miktarına, toz boyutuna ve daha birçok parametreye göre üretilmiş değişik kullanım amaçlı MA değirmenleri vardır [60].



Şekil 4.1. Atritör, bilyalar ve kolların şematik görünüşü [61]

Oksit dağılımı ile güçlendirilmiş malzemeler gibi parçacık takviyeli kompozitler yüksek sıcaklık sürünme dayanımı nedeniyle uzun zamandır kullanılmaktadır. Bu kompozitin üretiminde ana yapının her yerinde sert parçacıkların homojen dağılımını elde etmek zordur. Öğütme teknikleri bu kompozitleri üretmek amacıyla geliştirilmiştir. Hareketli bilyalar arasında aşındırma ile alaşımlı kompozit parçacıkları üretmek için MA, bu amaçla başarılı bir tekniktir. Mikroskobik ölçekte tekrarlanan çarpışma, soğuk kaynak ve kırılma olayları istenilen kompozit tozları üretir. Başlangıçta karışım halinde olan parçacıklar, fazların dağılımı ile kaplanmış parçacık haline gelirler. Diğer öğütme tekniklerinden farklı olarak, soğuk kaynak ve kırılma arasındaki denge, parçacık boyutunu oldukça sabit tutar [62].

Homojen bileşime sahip saf metaller, intermetalikler ya da ön alaşımlanmış tozlar yüksek enerjili bilyalı değirmenlerde öğütülür. Homojenizasyon için öğütme sırasında malzeme transferi gerekli değildir. Yapılan bu işleme mekanik öğütme (Mechanical Milling (MM)) denir. İki metalik karışım işlendiği zaman ve bu işleme sırasında alaşımlama olduğunda bu işlem mekanik alaşımlama (Mechanical Alloying (MA)) olarak adlandırılır. Çünkü işlem sırasında malzeme transferi gerçekleşmektedir. Eğer yapılan işlemle yalnızca parçacık çapını azaltmak ve yüzey alan artırmak amacıyla saf metal ya da intermetalik tozlar işlenirse bu işlem MA olarak tanımlanır. Çünkü bu işlemde malzeme transferi gerçekleşmemektedir. İntermetaliklerdeki uzun mesafeli diziliş düzeninin deformasyonu ile düzensiz bir intermetalik ya da amorf faz üretilir. Yapılan bu işleme de Mekanik Düzensizlik (Mechanical Disordering (MD)) olarak isimlendirilmiştir [63].

Mekanik alaşımlama işleminde kullanılan tozlardan en az bir tanesi tozlarda bağlayıcılık özelliğini sağlayabilmesi için yumuşak, diğeri ise sert oksit parçacıklardan oluşmak zorundadır. Bunlar Fe ve Ni bazlı malzemeler için yumuşak matris içerisinde takviye elamanı olarak bulunmaktadır. Ayrıca alaşımlama ortamına Al ve Ti gibi reaktif elementlerde ilave edilmektedir. Bu reaktif elementler ya elementel olarak yâda doğrudan oksit şeklinde katılır. Bunlar genellikle Al_2O_3 veya Y_2O_3 parçacıklarıdır [64].

Mekanik alaşımlama işlemi yalnızca metallere has bir çalışma olmayıp, ayrıca nitrürlerde oksitlerde ve diğeri bazı malzeme çalışmalarında kullanılabilmektedir. Bu sebepten mekanik alaşımlama ile üretilen yeni malzemelerin kullanım alanları; diş protez malzemelerini, hidrojen depolama malzemelerini, kalıcı mıknatısları, süper plastik alaşımları, intermetalik bileşikler, elektrotları, süper korozyon alaşımlarını ve süper iletken metalleri kapsamaktadır [65].

MA yöntemi ile bir tozun şekli, ortalama boyutu, boyut dağılımı ve diğeri özellikleri MA işlemi sırasında kontrol edilebilir. MA küçük miktarlarda veya hızlı prototip için standart dışı bileşimler veya standart bileşimin hızlı bir şekilde üretilmesine müsaide eder [66].

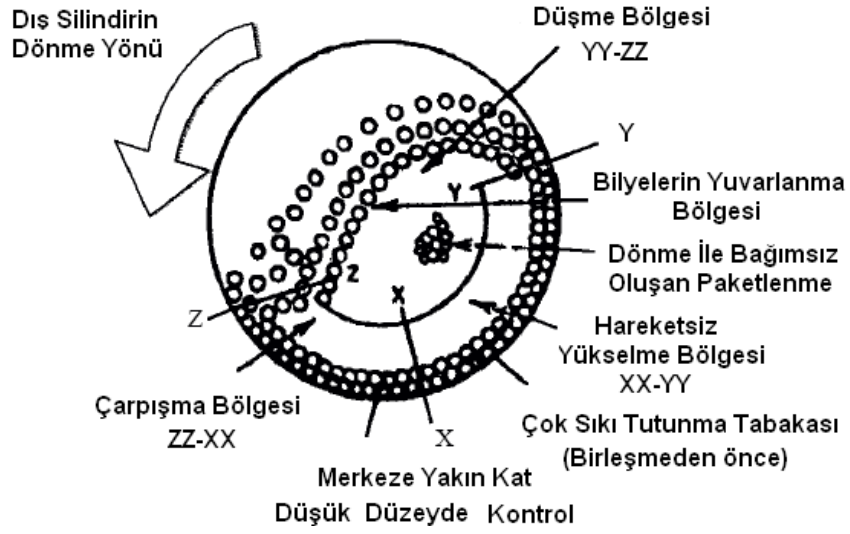
4.2. Mekanik Alaşımlamada Kullanılan Öğütücü Türleri

MA işleminde farklı tip ve türde alaşımlama cihazı kullanılabilmektedir. MA'nın önemli bir kısmını oluşturan öğütme işlemi, tane boyutunu azaltma, tane şeklini değiştirme, karıştırma ve alaşımlama gibi evrelerden oluşmaktadır. Bu işlemler esnasında kullanım amacına göre çok çeşitli öğütücüler kullanılmaktadır. Öğütücüler ve/veya değirmenler kapasiteleriyle, titreşimli oluşları ile işlem hızı ile öğütme verimlilikleriyle, soğutma ve ısıtma gibi ek üniteleriyle farklılık gösterirler. MA işleminde genellikle titreşimli, yatay bilyalı ve atritör tipi öğütücü cihazlar kullanılmaktadır.

4.2.1. Bilyalı yatay değirmenler (Ticari değirmenler)

Bilyalı değirmenlerin geçmişi 1876 tarihine kadar dayanmaktadır [67]. Öğütme işleminde bilyalar (demir, çelik veya tungsten karbür) kullanılmaktadır. Öğütme işleminde kapasiteyi ayarlama da çeşitli ayarlamalar ve dengeler (öğütücü kabın çapı, haznenin dönme hızı, bilyaların büyüklüğü, kullanılan tozların büyüklüğü gibi) kullanılmaktaydı [68]. Bunlara ek olarak, bu tür mekanik alaşımlama işlemi diğer yüksek enerjili türlere göre daha ucuz ve daha az bakım gereksinimi sağlamaktadır [68].

Düşme hareketi ile oluşturulan mekanik alaşımlama işlemi tozların hazırlanmasında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır (Şekil 4.2). Bununla birlikte, düşük enerjili öğütme türünde MA işlemini tamamlamak için daha fazla zamana ihtiyaç vardır. Bu işlem homojen ve eşit dağılımlı tozları üretiminde kullanılır [69]. Ticari olarak kullanılan değirmenler bir seferde çok büyük hacimlerde toz alabilmektedirler. Ticari ürünler için MA yaklaşık 1200 kg kapasiteli bilyalı değirmenlerde yapılabilir (Resim 4.1) [70].



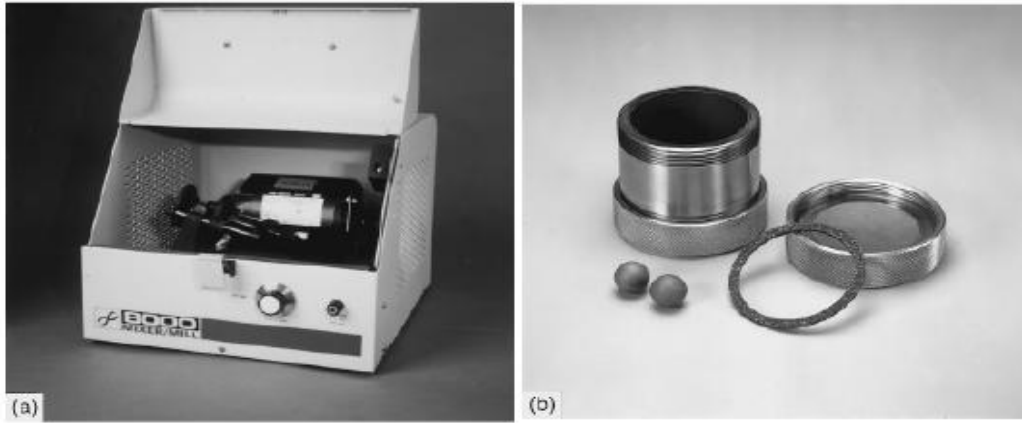
Şekil 4.2. Öğütme işleminde bilyaların karşılıklı kesişme hareketleri [71]



Resim 4.1. Ticari olarak kullanılan değirmenler [72]

4.2.2. SPEX tipi öğütücüler

SPEX tipi çalkalayıcı değirmenler kullanımları diğer türdeki atritörlere göre daha yaygındır. Diğer öğütme cihazlarına göre kapasiteleri (yaklaşık hacmi 10 ml) daha düşüktür. Değirmen, içerisine konan tozları 1200 devir/dakika gibi yüksek hızda belli doğrultularda hareket ettirerek öğütmektedir [68]. Sahip oldukları hazne, tozları ve öğütücü bilyaları muhafaza etmeye ve dakikada birkaç bin defa belli doğrultularda (ileri geri, sağa sola, gibi.) hareket ettirerek öğütme işlemini gerçekleştirmektedir. Haznenin her hareketinde hazne içerisindeki bilyalar tozlara çarparak öğütme ve karıştırma işlemini sağlamaktadır. Resim 4.2.’deki SPEX tipi öğütme cihazlarının yüksek hızda olmasından dolayı çalışma esnasında sıcaklık artışı ve koruyucu atmosfer ihtiyacı karşılaşılan problemlerdendir.



Resim 4.2. SPEX tipi karıştırıcı (a) SPEX 800 tipi değirmen, (b) SPEX’e ait öğütme kabı, kapak, bilya ve conta [72]

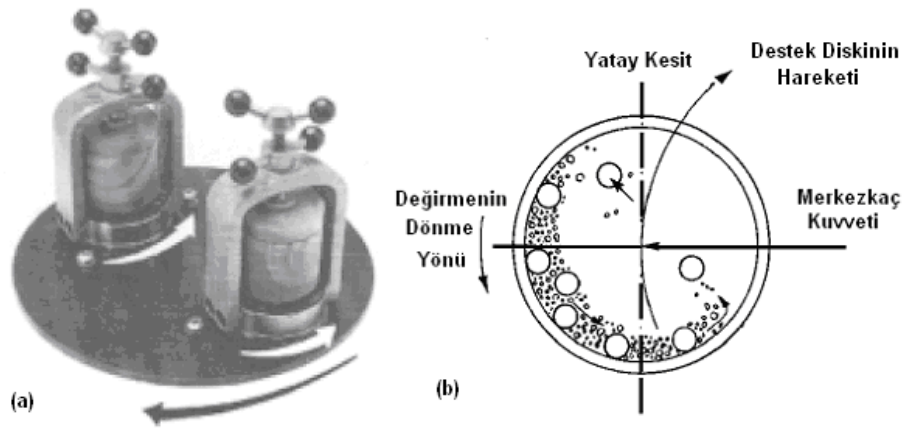
4.2.3. Düzlemsel (Planeter) tip bilyalı değirmenler

MA deneylerini yapmak için diğer bir öğütücü türü “planeter” bilyalı değirmendir (Resim 4.3). Bu değirmende birkaç yüz gram toz bir defada öğütülebilir. Bu değirmenler haznelerinin gezegen gibi hareket etmelerinden dolayı “planetary” ismini alırlar. Bunlar dönen bir destek disk üzerine yerleştirilirler ve kendi eksenleri etrafındaki hareketlerini, özel bir mekanizmadan alırlar. Kendi eksenleri etrafında dönen hazneler tarafından oluşan merkezkaç kuvveti ve dönen destek disk tarafından

oluşturulan ilave kuvvetle beraber, hazne içinde öğütülen malzeme ve öğütme bilyalarına etki ederler. Hazne ve destek diski zıt yönlerde döndüğü için merkezkaç kuvvetler sırası ile benzer ve zıt yönde etkir (Şekil 4.3). Bu öğütme bilyalarının haznenin iç duvarlarından aşağıya doğru kaymasına neden olur. Sürtünme etkisi, öğütülen malzeme ve öğütme bilyalarının serbest kalıp hazne içerisinde, serbest dolaşması ve karşı duvara çarpmasıyla devam eder. Bu tür değirmendeki bilyaların doğrusal hızı, SPEX değirmenlerinkinden daha fazla olsa bile, vuruş frekansı, SPEX değirmenlerinkinden çok daha fazladır. Bu yüzden, SPEX değirmenlere göre daha düşük enerjili değirmenler olarak düşünülebilir [73].



Resim 4.3. Planeter tipi bilyalı değirmen [72]



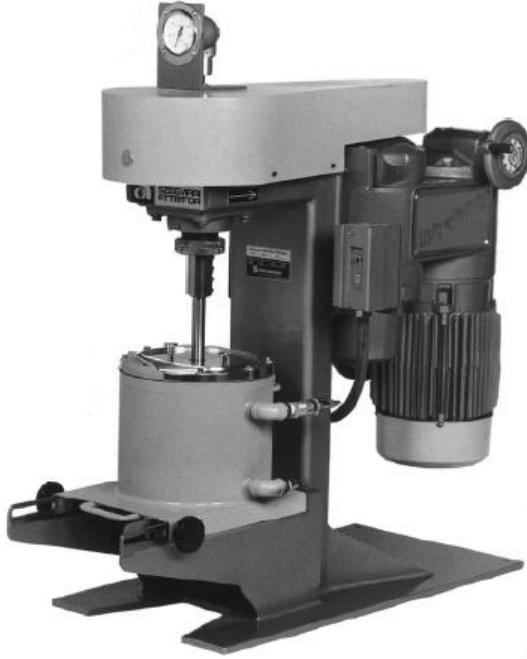
Şekil 4.3. (a)Yüksek Enerjili Planetary Değirmen, (b) Değirmen içerisindeki bilyaların hareketinin şematik gösterimi [68]

4.2.4. Atritör tip değirmenler

Szegvari bu atritör tipini 1922 yılında sanayi için üretti [61]. Bu tip atritörler içerisinde bir kerede büyük oranlarda toz öğütme imkânına sahiptirler (Resim 4.4). İçerisinde bir seri karıştırıcılar bulunan dikey silindirden oluşur. Hazne içerisinde biri diğerine dik olarak yerleştirilmiş birçok karıştırıcı kol bulunmakta ve kollar dönmeye başladığında bilyalara çarparak hareket etmesini sağlamaktadır. Bilyalar duvara çarparak dönmesi ile ve dönen kollarla çarparak hareket etmesi ile birbirleriyle çarpışırlar. Bilyaların arasında kalan tozlar böylece öğütülmeye başlayacaktır. Atritörler, içerisinde bir seferde belli ağırlıklarda (0,5kg'dan ile 40kg'a kadar) tozun öğütülebildiği değirmenlerdir. MA işlemi sırasında oluşan ısınmayı engellemek ve dengede tutmak için kazan ile dış yüzey arasında soğutucu sıvı dolaştırılmaktadır.

Öğütme işleminde kullanılan hazneler; paslanmaz çelik, içi alümina kaplı paslanmaz çelik, silisyum karbür, silisyum nitrür, zirkonya, kauçuk ve poliüretandan yapılmaktadır. Cam, çakıl taşı, steadik, seramik, mullit, silisyum karbür, silisyum nitrür, sialon, alümina, zirkonyum silikat, zirkonya, paslanmaz çelik, sade karbonlu çelik, krom-çelik ve tungsten karbürden üretilen çeşitli öğütücü malzemeler de bulunmaktadır [72].

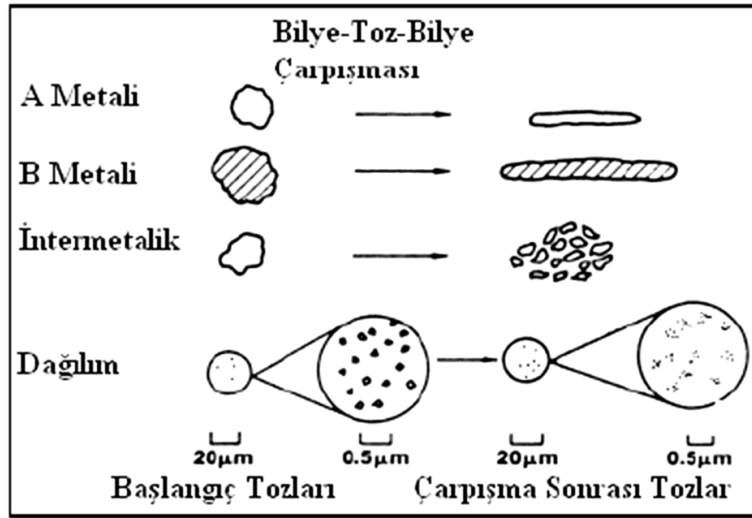
Haznenin doluluk oranı kap hacminin yarısı kadar olmalıdır. Aksi takdirde öğütme işlemi istenilen seviyede olmamaktadır. Kap doluluk oranı kirlenmeye de etki etmektedir. Hazne içerisindeki kolların dönme oranına bağlı olarak öğütme hızı da artmaktadır. Ancak belli bir hızdan sonra merkez kuvvetinden dolayı bilyalar kazan etrafında dönmeye başlayacağından öğütme işlemi oluşmayacaktır. Öğütme hızı belli bir aralıkta olmak zorundadır.



Resim 4.4. Atritör tipi mekanik alaşımlama ünitesi [72]

4.3. Mekanik Alaşımlama Mekanizması

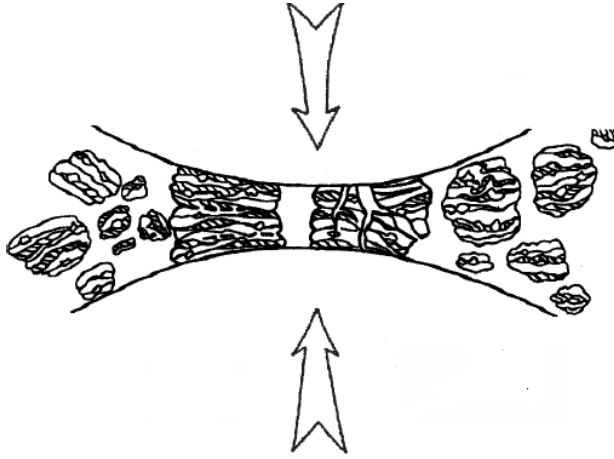
MA, temelinde mekanik olarak indirgenmiş tozlar arasındaki reaksiyonu sağlayan bir katı hal sürecidir. MA işlemi, tozların hem kompozisyonu hem de mikro yapılarının istenilen biçimde değiştirilebildiği veya oluşturulabildiği esnek bir işlemdir [65]. MA işlemi genellikle kuru ve yüksek enerjili öğütme işlemi ile oluşturulan, homojen bir dağılıma sahip, kontrollü ve oldukça ince tozlardan oluşan çoğunlukla bir katı hal reaksiyonudur [74]. MA işlemi esnasında tozun ortalama boyutunu, boyutsal dağılımını, şeklini ve diğer bazı yapısal özelliklerini kontrol etmek mümkündür (Şekil 4.4).



Şekil 4.4. Başlangıç tozları ve alaşımlamaya bağlı olarak deformasyon tavırları [75]

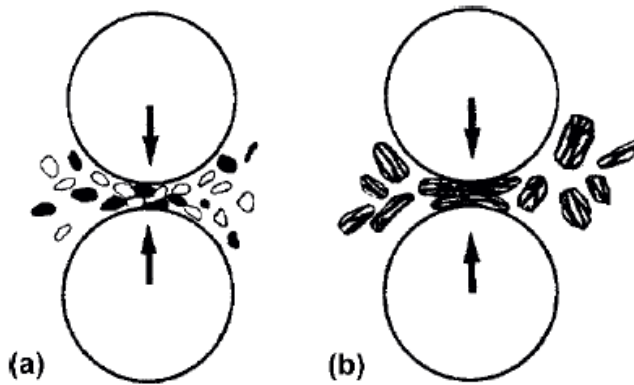
Mekanik alaşımlama işlemi esnasında, toz parçacıkların bilyaların arasında kalarak hızla yassılaşmaya başlar (Şekil 4.5). Yassılaştıran tozlar daha sonra soğuk kaynaklanır, kırılır ve tekrar kaynaklanır. İki bilya çarpıştığında arada bir miktar toz sıkışır. Her çarpışmada, yaklaşık olarak 0,2 mg aralığında yaklaşık 1000 kadar parçacık sıkışır. Çarpma esnasında, bilya-bilya, toz-bilya, bilya-cidar, karıştırıcılar-bilya şeklinde olabilir. Bu çarpma olaylarından en etkilisi bilya-bilya olup, Şekil 4.4’de görülmektedir [76]. Çarpma kuvveti toz parçacıklarını plastik deformasyona uğratar. Deformasyon sertleşmesi belli bir süre sonra kırılmaya neden olur. Kırılma esnasında oluşan yeni yüzeyler parçacıkların birlikte kaynaklanmasını sağlar ve parçacık boyutunda artışa neden olur. Öğütmenin başlangıç aşamasında parçacıklar yumuşak olduğu takdirde (sünek-sünek ya da sünek-kırılgan tozlar kullanıldığında), parçacıkların birlikte kaynaklanması ve büyük parçacıklar oluşturması eğilimi yüksektir. Parçacıkların boyutları başlangıçtaki boyutlarının üç katına kadar ulaşabilir. Kimyasal kompozisyonunda herhangi bir değişiklik oluşmaksızın katmanlı bir yapı oluşur. Devam eden deformasyonla birlikte deformasyon pekleşmesi artar, bunun sonucunda, yorulma mekanizmasıyla ve/veya oluşmuş katmanların ayrılmasıyla kırılma devam eder. Bu mekanizma ile oluşan parçacıklar, birleştirici kuvvetler olmadığı zaman boyut olarak küçülmeye devam ederler. Bu aşamada kırılmaya olan eğilim soğuk kaynaklanmaya olan eğilimden daha etkindir. Darbelere

bağlı olarak parçacıkların kalınlığı sürekli incelirken parçacık boyutu aynı kalmaya devam eder. Bunun sonucunda katmanlar arası mesafe azalır ve parçacık içerisindeki katmanların sayısı artar.



Şekil 4.5. MA işleminde oluşan Bilya-Toz-Bilya çarpışması [61]

Mekanik alaşımlama mekanizması nispeten düşük sıcaklıklarda tozların birbirleri içerisine gömülmesi işlemidir. Toz parçacıkları, çarpışan bilyalar sayesinde sürekli olarak soğuk kaynak oluştururlar (Şekil 4.6) [77]. Bu olay, kompozit toz parçacıklarının mikro yapısal olarak tabakalaşarak şekillenmesidir [78].



Şekil 4.6. MA işleminin şematik gösterimi.
(a) öğütme işleminin başlangıcı ve
(b) birkaç çarpışma işlemi sonrası [77]

Öğütme işlemi esnasında parçacıkların boyutlarındaki küçülme kabiliyeti oldukça düşüktür. Bu oran geleneksel bilyalı öğütücülerde % 0,1 civarında iken, yüksek enerjili bilyalı öğütme işleminde hala % 1'in altındadır. Öğütme esnasında kullanılan enerjinin çoğu ısı olarak ortaya çıkar. Fakat küçük bir miktar enerji toz parçacıklarının elastik ve plastik deformasyonunda kullanılır. MA sırasında aşırı deformasyona maruz kalan parçacıklarda dislokasyonlar, boşluklar, istiflenme hataları ve artan altyapı tane sınırı gibi çeşitli kristal hatalar görülür. Bu hatalı yapı, çözen elementlerin matris içerisinde çözebilme kabiliyetini artırır. İncelen yapıyla birlikte difüzyon mesafeleri de azalır [56].

Bunlarla birlikte, öğütme esnasındaki sıcaklıkta artış difüzyon hızını artırır ve böylece alaşım elementlerinin homojenleştirilmesi artar. Alaşımlama normalde oda sıcaklığında gerçekleşirken, bazı durumlarda alaşımlamanın yapılabilmesi için mekanik alaşımlanmış tozun yüksek sıcaklıkta tavlanması gerekebilir. Bu işlem özellikle metaller arası bileşiklerin oluşumu istendiğinde kullanılır.

Metal tozları nadiren de olsa sıvı ilavesiyle öğütülebilmektedir. Bu öğütme türüne ıslak olarak öğütme denir. Hiçbir sıvı kullanılmadığı takdirde kuru olarak öğütme denmektedir. (Düşük sıcaklıktaki öğütme de eğer kullanılan sıvı düşük sıcaklıkta kullanılırsa ıslak öğütmedir). İnce öğütülmüş ürünler elde etmek için ıslak öğütmenin kuru öğütmeden daha iyi olduğu belirtilmektedir. Bunun nedeni çözücü moleküller parçacıkların yeni oluşan yüzeylerine emilirler ve bu parçacıkların yüzey enerjilerini azaltırlar. Islak durumda toz parçacıkların daha az topaklanmaları durumu da faydalı bir faktördür. Amorf yapı oluşturma hızının ıslak öğütme sırasında kuru öğütmeye göre daha fazla olduğu belirtilmektedir [79]. Ancak ıslak öğütme ile tozlarda kirlenme problemi de ortaya çıkmaktadır. Ayrıca öğütme işlemi sonrası tozların kurutulması da ek bir işlem gerektirdiğinden mekanik alaşımlama işlemi kuru olarak yapılmaktadır.

MA işlemini gerçekleştiren özel ekipmanların yanı sıra pek çok etkin parametre vardır (başlangıç toz karakteristiği, içeriği, zaman v.b.). Ancak, çoğu durumda

içyapının incelme hızı, öğütme hızıyla kabaca bir logaritmik ilişkidir. Bu yüzden başlangıç tozlarının boyutu nispeten önemsizdir. Karışım çeşidine bağlı olarak, lameller arası mesafeler birkaç dakika ile bir iki saatte nanometre boyutlarına inebilir. MA'nın nano-kristalli malzeme üretmek için yaygınca kullanımının nedeni budur [56].

Metal ve metal alaşımlarının MA işlemi üç ana karışımda gerçekleşmektedir. Bunlar sünek-sünek, sünek-kırılgan, kırılgan-kırılgan türleridir.

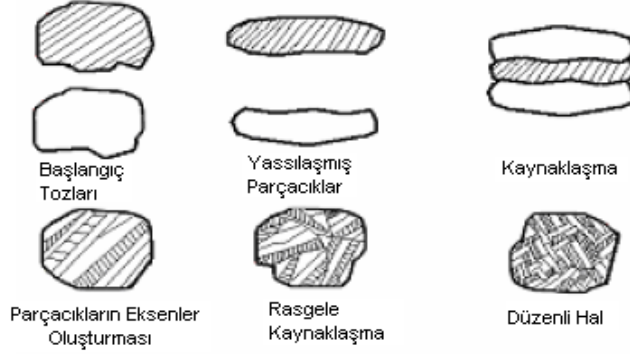
4.3.1. Sünek-sünek alaşımlama sistemi

Sünek malzemelerin mekanik alaşımlama ile güçlendirme mekanizması, Aikin ve Courtney'in [80], Benjamin ve Volin'in [81] yaptığı çalışmalarla daha iyi anlaşılabilir (Şekil 4.7).

Sünek-sünek kırılma mekanizması, kaynaklanmanın soğuk gerçekleşmesinden dolayı oldukça etkindir. Benjamin ve arkadaşları iki farklı sünek tozla yaptıkları çalışmalarda bu oluşumu incelemişlerdir [82]. Benjamin alaşımlamayı başarabilmek için en az %15 sünek toz olması gerektiğini söylemektedir [64]. Bunun nedenini de, toz parçacıklarının tekrar eden soğuk kaynaklanması ve kırılması ile oluştuğundan, parçacıklar sünek değilse soğuk kaynaklanma oluşmayacağı söylenebilir.

MA'nın ilk safhalarında, sünek tozlar mikro dövme işlemine maruz kalarak yassılaşıp ve pul şeklini alır. İlk aşamalarda katmanlaşma olur. Sünek tozlar genellikle işlem esnasında bilya üzerine sıvanarak kirlenmeyi engeller. Sıvanma ayrıca öğütme elemanlarının da aşınmasını önler. Ancak öğütme malzemelerinin üzerindeki toz kalınlığı ileriki safhalarda heterojen bir karışıma neden olabileceğinden minimum seviyede olmalıdır [31,49]. Tozlar katmanlaşmaya devam ederken, toz boyutlarının arttığı gözlenir. MA zamanı ilerledikçe deformasyon sertleşmesine bağlı olarak tozların kırılma eğilimi artar. Artan sertlik ve kırılganlığa bağlı olarak daha homojen bir kompozisyona ve şekle sahip tozlar oluşur. MA işlemine devam edildiğinde, katı

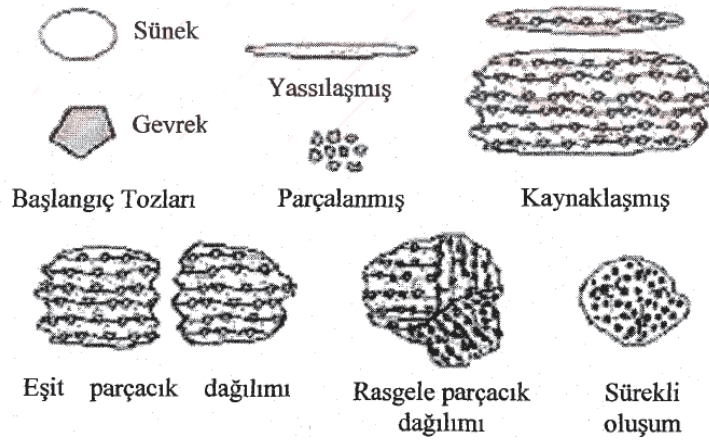
çökeltirler, intermetalikler ve hatta amorf fazların oluşumu söz konusudur. Katmanlar arası mesafe öyle azalır ki optik olarak gözlenemez [56].



Şekil 4.7. MA esnasında sünek-sünek tozların oluşturduğu çeşitli durumlar [56]

4.3.2. Sünek-kırılğan alaşımlama sistemi

Geleneksel Oksit Dağılımla Güçlendirilmiş alaşımlar (ODS) bu kategoriye girmektedir. ODS alaşımlarda kırılğan oksit parçacıkları sünek bir matris içerisinde dağıtılmıştır. Öğütmenin ilk safhasında, sünek metal parçacıkları bilya-toz-bilya çarpışmaları ile yassılaşırken, kırılğan oksit parçacıkları parçalanır. Parçalanan kırılğan parçacıklar ezilen sünek tozlar ve sünek bileşimlerin arasında kalırlar. Kırılğan bileşim, lameller arası boşluklar boyunca sıkıca yerleşir. Daha ileri öğütme ile sünek toz parçacıklar, deformasyon sertleşmesine uğramış, tabakalar karışmış ve incelmış olur. Toz tanelerinin bileşimi, başlangıçtaki toz kompozisyonuna doğru yaklaşır. Eğer bir ODS alaşımında olduğu gibi sünek matriste bu katmanlar çözünemezse, devam eden öğütmeyle daha da incelir. Böylece katmanlar arası boşluklar azalır ve gevrek tozlar üniform olarak dağılır. Diğer yandan, eğer kırılğan faz çözünebilir ise sünek ve kırılğan yapılar arasında alaşımlama da olur ve kimyasal homojenlik elde edilir. Sünek malzeme olarak saf Zr ve kırılğan malzeme olarak da NiZr_2 toz parçacıklarının karışımının öğütülmesi ile amorf bir faz oluşumu bu tip bir sistemin örneklerindendir [84]. Bu oluşumu göstermek için aşağıdaki sünek-kırılğan tozların mekanik alaşımlama işlemindeki oluşumu Şekil 4.8’de gösterilmektedir.



Şekil 4.8. Kırılğan-sünek tozların mekanik alaşımlama esnasındaki oluşumları [56]

Sünek-kırılğan bir alaşımlama sisteminde alaşımlamanın oluşması sünek matris içerisindeki kırılğan parçacıkların katı çözünebilirliğine bağlıdır. Eğer bir element başka bir element içinde ihmal edilebilir katı çözünebilirliğe sahipse alaşımlamanın oluşması muhtemel değildir, mesela demir içerisinde bor gibi. Bu sebepten, MA sırasında sünek-kırılğan parçacıkların alaşımlaması kısa mesafeli difüzyona imkan sağlaması için sadece kırılğan parçacıkların parçalanmasını gerektirmez. Aynı zamanda sünek matris elemanı içinde makul katı çözünebilirliği de gerektirir [66].

4.3.3. Kırılğan-kırılğan alaşımlama sistemi

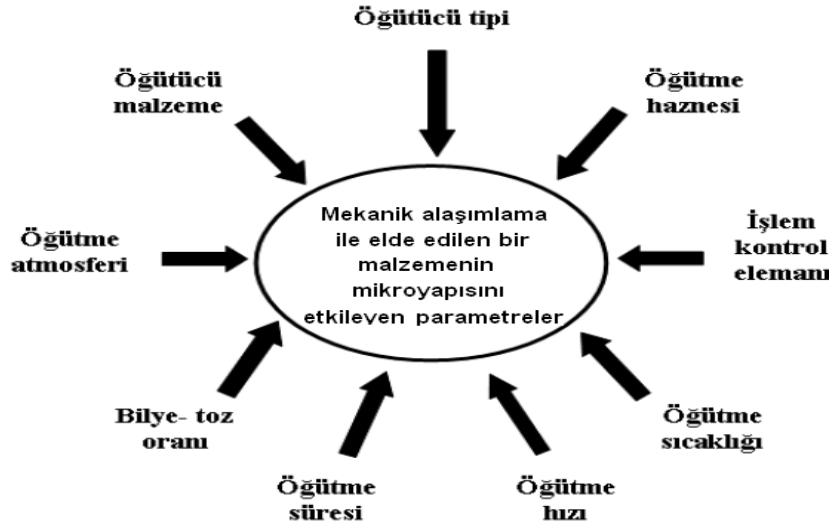
Kırılğan-kırılğan malzemelerden oluşan bir sistemde alaşımlamanın oluşmayacağı düşünülebilir. Çünkü sünek bileşenin olmaması kaynaklanmayı engeller ve bu durumda alaşımlamanın oluşması beklenemez. Ancak Si-Ge ve Mn-Bi gibi bazı kırılğan-kırılğan sistemlerde alaşımlamanın oluştuğu da bildirilmiştir [72]. İntermetaliklerin de üretiminde bu yöneme başvurulmaktadır [85].

Kırılğan malzemelerin öğütülmesinde malzeme transferine katkıda bulunan mekanizmalar sıcaklık atışını, kusursuz hacimlerde mikro deformasyonu, yüzey deformasyonu ve/veya öğütme sırasında tozlarda hidrostatik gerilim durumuyla oluşabilen plastik deformasyonu içerir [86].

Kırılgen tozlar öğütme esnasında parçalanır ve boyutları sürekli azalır. Ayrıca çok küçük boyutlardaki tozlar sünek bir davranış gösterir. Daha fazla boyut azalması mümkün değildir. Bu duruma ufalanma sınırı denilir.

4.4. Mekanik Alaşımlamayı Etkileyen Parametreler

MA işlemi karmaşık bir işlemdir. Bu sebepten istenilen ürün ve/veya mikro yapıyı elde etmek için bazı parametrelerin uygun bir şekilde ayarlanması ve optimizasyonu gerekmektedir. MA işleminde etkin parametreler Şekil 4.9’da görölmektedir.



Şekil 4.9. MA işleminde üretim aşamasını etkileyen parametrelerin şematik gösterimi [68]

Tozun son şeklini, kimyasal ve mikro yapı özelliklerini etkileyen parametreler: Değirmen tipi (Yüksek ve düşük enerji seviyeli), öğütme haznesi, öğütme hızı öğütme süresi, öğütme malzemelerinin şekli, boyutu, yapıldığı malzeme türü, bilya - toz ağırlık oranı, kazan doldurma miktarı, öğütme atmosferi, öğütme sıcaklığı ve İşlem kontrol kimyasalı (İKK).

Tüm bu parametrelerin hepsi birbirinden bağımsız değildir. Örneğin; uygun bir öğütme süresi, öğütücü tipine, işlem kontrol kimyasalına, öğütme sıcaklığına, öğütücü bilyalarının boyutuna, bilya-toz oranına ve benzerlerine bağılıdır.

4.4.1. Değirmen (Öğütücü) tipi

MA işleminde farklı türlerde kullanılan yüksek enerjili öğütme cihazları bulunmaktadır. Bu değirmenler kapasitelerine, işlem hızlarını ve öğütme sıcaklığının değişimlerini kullanarak işlemi kontrol etmede kullanılır. Toz çeşidine, tozun miktarına ve gerekli olan son içeriğine bağlı olarak uygun bir değirmen seçilir. Özellikle, üretilecek olan tozun oksitlenme karakteristiğine bağlı olarak kullanılacak olan atmosfer seçimi önemlidir. Genellikle, laboratuvar çalışmalarında SPEX türü karıştırıcı değirmenler kullanılmaktadır. Tozları karıştırmak için Planeter ve Atritör tip değirmenler, fazla miktardaki tozu alaşımlamada kullanılırlar. Ayrıca ticari amaçlı ve farklı amaçlarda kullanım için değişik tasarımlar mevcuttur [87].

Değirmenlerde çarpışma hızı ve değirmen içi enerji miktarı, toz boyutunu ve özelliklerini etkileyen önemli parametrelerdendir. Bu sebepten dolayı yeni tasarımlarla hem yüksek miktarda toz elde etmeye çalışırken, hem de problem oluşturan kirlenme olayını en aza indirmeye çalışılmaktadır [88].

Değirmen kapasiteleri arttıkça öğütme kabındaki ısı transferi problemleri de artmaktadır. Yaklaşık olarak pratikte limit genellikle 40 kg toz kapasitesidir. Bu oran ticari amaçlı kullanılan MA işleminde ise 1250 kg'a kadar çıkmaktadır [89].

4.4.2. Öğütme haznesi

Öğütme haznesi, MA uygulanacak malzeme için çok önemlidir. Çünkü öğütme malzemesinin haznenin iç duvarlarına çarpması ile bir kısım malzeme hazneden koparak tozun içerisine karışabilir. Bu olay, tozun kirlenmesine ve/veya bileşiminin değişmesine neden olabilir. Eğer kullanılacak malzeme hazne ile aynı malzemeden kullanılırsa, haznede oluşacak kayıp göz önüne alınarak hesaplama yapıldığında problem engellenebilir. Ancak, bu da MA işleminde problemler oluşturabilir. Hazne yapımında çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC-Co çelik ve rulman çeliği kullanılmaktadır. Öğütme malzemesi

ile herhangi bir etkileşimi engellemek için kaplanmış haznelerde kullanılmaktadır. Alaşımlanacak malzeme çeşidine göre kazan türü de değişmektedir [90].

4.4.3. Öğütme hızı

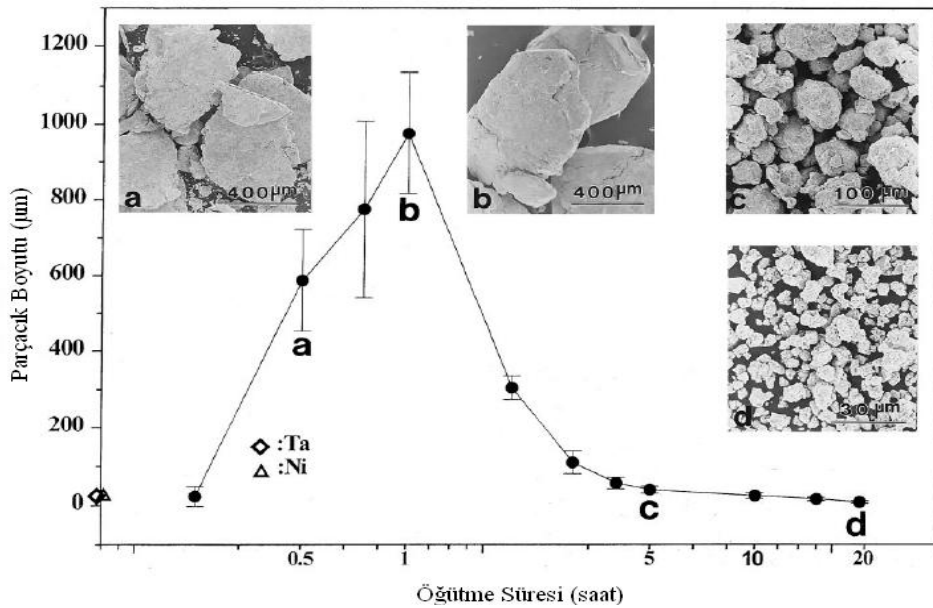
MA işleminin en önemli parametrelerinden biri de öğütme hızıdır. Değirmenin dönme hızı arttıkça toza aktarılan enerji de daha fazla olacaktır. Fakat değirmen tasarımına bağlı olarak elde edilebilecek maksimum hızda belli sınırlamalar olacaktır. Örneğin; geleneksel bilyalı değirmenlerde artan dönme hızına bağlı olarak bilyaların hareket hızları da artacaktır. Kritik hızın üzerine çıkıldığında, bilyalar merkezkaç kuvvetinin artmasından dolayı haznenin iç duvarlarına yapışır ve darbe kuvveti oluşturmak için aşağı düşmezler. Bu sebepten, kullanılacak olan maksimum hız kritik hızdan biraz daha az olmalıdır ki bilyalar etkin bir şekilde çarpışma enerjisini oluşturmak için tepe yükseklikten aşağıya düşebilsinler. Böylece çarpışma süreci etkin olabilsin [72]. Eğer değirmenin dönme hızı çok yavaş olursa bu seferde öğütme işleminin süresi artacaktır. Eğer öğütme hızı kritik hızın çok altında ise MA yerine mekanik bir karışma işlemi gerçekleşeceğinden, MA işlemi gerçekleşmeyecektir. Bu sebeplerden dolayı öğütme hızı bir denge içerisinde olmalıdır.

Maksimum hızda diğer bir sınırlama ise yüksek öğütme hızlarında (veya yüksek öğütme yoğunluklarında) hazne sıcaklığının yüksek değerlere ulaşmasıdır. Bazı sebeplerden dolayı örneğin, tozun homojenleştirilmesini ve alaşımlamayı iyileştirmek için difüzyonun gerektiği yerlerde, sıcaklık artışı faydalı olabilir. Ancak yoğunlukla bu sıcaklık artışı dönüşüm işlemini hızlandırdığı için aşırı doymuş katı çözeltilerin veya öğütme esnasında oluşan kararsız fazların ayrışmasına neden olduğundan dolayı zararlı olabilir [91]. Fakat oluşan yüksek sıcaklık tozu kirletebilir. Nano-kristal oluşumu sırasında ortalama kristal boyutunun arttığı ve artan dinamik yeniden kristalleşmeden dolayı yüksek öğütme yoğunluklarında iç deformasyonun azaldığı gözlenmiştir [92]. Değirmen çeşidine göre ulaşılan maksimum sıcaklıklar da farklı olacaktır. Isının istenmediği durumlarda, soğutma işlemine başvurulmaktadır. Soğutma işleminde sistemin türüne bağlı olarak sıvı ve gaz sistemler kullanılabilir.

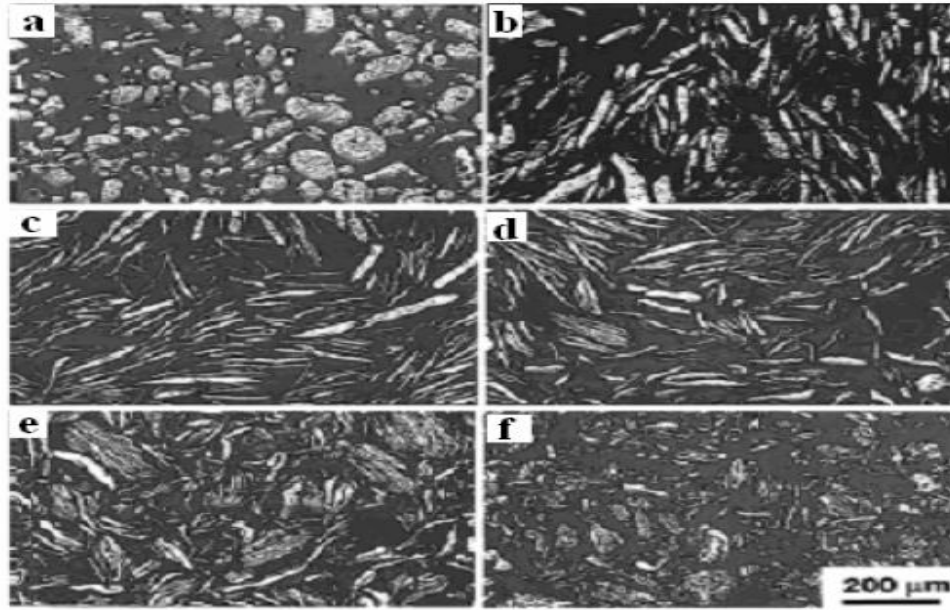
4.4.4. Öğütme süresi

Öğütme süresi en önemli parametredir. Normalde süre, toz parçacıkları arasındaki kırılma ve soğuk kaynaklanmanın sabit duruma eriştiği an olarak seçilir. Kullanılan sistemin hızı arttıkça toz boyutu daha kısa sürede küçülür ve homojen bir dağılım elde edilir (Resim 4.5). Gerekli MA/öğütme süresi kullanılan değirmenin tipine, öğütme yoğunluğuna, bilya-toz oranına ve öğütme sıcaklığına bağlı olarak değişir. Süre belirlenirken yukarıda saydığımız her bir kombinasyon için ve her özel toz için belirlenmelidir. Ancak tozlar gereğinden fazla öğütme işlemine tabi tutulursa kirlenmenin artacağı ve bazı istenmeyen fazların oluşacağı bilinmelidir [93]. Ayrıca kirlenme ile toz kaybının da artacağı unutulmamalıdır. Toz öğütme işleminin süresi gereğinden fazla tutulursa bilya yüzeyine ve hazneye toz yapışabilir. Bu yapışma bilyaların çarpışma esnasında sürtünmelerine ve sürtünmeyle birlikte sıcaklığın da giderek artmasına neden olacaktır. Bu sebeplerden dolayı tozun sadece yeterli miktarda öğütülmesi istenir.

Şekil 4.10'da ki, Ni-Ta sisteminde de görüldüğü gibi parçacık boyutu önce artmakta ve belli bir sınıra (deformasyon sertliği) ulaşan tozlar kırılma eğilimine girecektir. Böylece ortalama tane boyutu da öğütme süresine paralel olarak azalacaktır.



Şekil 4.10. Ni-Ta sisteminde öğütme süresinin parçacık boyutuna etkisi [72]



Resim 4.5. 6061 Alüminyum tozları ile grafit tozlarının mekanik alaşımlama işlemi süresince toz yapısının değişimi (a) Alaşımlama öncesi tozlar, (b) 20 saat MA, (c) 30 saat MA, (d) 40 saat MA, (e) 60 saat MA, (f) 70 saat MA [94]

4.4.5. Öğütme malzemesi

Sertleştirilmiş çelik, takım çeliği, sertleştirilmiş kromlu çelik, temperlenmiş çelik, paslanmaz çelik, WC-Co ve rulman çeliği en çok kullanılan öğütme malzemeleridir. Bunlar dışında özel amaçlı seramik esaslı bilyalar da kullanılmaktadır. Bilyaların, toz üzerine yeterli vuruş kuvveti oluşturabilmesi için yeterli büyüklükte olması gerekmektedir. Hazneden karışabilecek toz kirlenmeye neden olacağından, hazne ile öğütme malzemesinin aynı malzemeden yapılması istenir. Öğütme elemanının boyutu da öğütme verimliliği ile doğrudan etkilidir. Genellikle büyük boyutlu öğütme elemanı daha verimlidir. Bilyaların artan ağırlığı toz parçacıklarına daha fazla vurma enerjisi transfer eder [72]. Ancak aşırı iri bilyalar toz boyutunun incelmesini engelleyebilir. Bilya boyutu küçüldükçe yüzey alanı artacaktır. Yüzey alanı artacağından aynı orandaki tozu daha kısa sürede öğütecektir. Bilyaların seçiminde genellikle yapılacak alaşım tozun cinsine ve bileşimine göre farklılık gösterebilir.

Çoğunlukla yapılan çalışmalar tek bir öğütücü bilya boyutu kullanılmasına rağmen, farklı boyutlardaki bilyaların da kullanıldığı çalışmalarda vardır [95]. Öğütme işleminde, farklı boyutlardaki bilyaların kullanımının çarpışma enerjisini artıracak tahmin edilmektedir [96]. Öğütmenin ilk aşamalarında öğütülmüş tozlar öğütücü bilyaların yüzeyini kaplar ve soğuk kaynak olur. Bu bir avantaj olarak kabul edilebilir. Çünkü öğütücü bilyaların aşınması sırasında tozun kirlenme sakıncası ve öğütme malzemelerinin aşırı aşınmasını engeller. Bununla birlikte bu seviyenin kalınlığı heterojen bir son ürünün şeklini muhafaza etmek için minimum seviyede tutulmalıdır. Fakat bu toz kaplamanın dezavantajı da vardır. Tozun bilya yüzeyinden ayrılması zor bir işlem gerektirir. Büyük ve küçük boyutlu bilyaların kombinasyonu, öğütme sırasında bilyaların yüzeyinde kaplanmış toz miktarı ve soğuk kaynak miktarını minimuma indirir. Bu şartlar altında akmayı iyileştirmek için bilimsel bir açıklama olmamasına rağmen, farklı boyutlardaki bilyaların kesme kuvvetleri üretmesini, bilyaların yüzeyinden tozların ayrılmasına yardım edeceği düşünülmektedir [83].

4.4.6. Bilya – Toz ağırlık oranı

Bilya toz oranı (BTO) öğütme işleminde önemli parametrelerden bir tanesidir. Bu oran 1:1 gibi düşük bir değerden 220:1 gibi yüksek değerlerde değişen aralıklarda kullanılmaktadır [83]. Genellikle SPEX tipi değirmenler küçük kapasitedeki tozların öğütülmesinde yaygın olarak 10:1 oranında kullanılırlar. Ancak öğütme işlemi attritör gibi kapasite olarak geniş bir değirmende yapıldığında bu oran 50:1 veya 100:1 gibi yüksek değerlere kullanılmaktadır. Bu oranlardaki artış elde edilen toplam enerjiye bağlı olarak alaşımlama zamanını azaltır. Ancak bilya toz oranındaki artış tozun kirlenme problemi oluşturabilmektedir.

Kullanılan bilya malzemesi genellikle yüksek dayanımlı, aşınma direnci yüksek olan malzemelerdir. Kullanılan bilyalar tek tip olabileceği gibi farklı boyutlara sahip bilyalar da kullanılabilir. Farklı boyutlardaki bilyaların kullanımı, enerji miktarını artırabileceği rapor edilmiştir [96]. Bilya seçiminde genellikle kullanılacak olan tozun yapısına ve kimyasal özelliklerine bağlıdır. Bilyalar farklı malzemelerden

yapılabilmektedir. Ancak kullanılan malzeme ve aynı özelliklerde bilya seçimi ile kirlenme ve oluşabilecek herhangi bir alaşım farklılaşması giderilebilir.

4.4.7. Öğütme haznesi doldurma miktarı

Bilyaların metal tozlara etkili bir şekilde çarpma kuvvetinin oluşabilmesi için kullanılan hazne içerisinde yeterli bir boşluğa ihtiyaç vardır. Bu sebepten haznenin bilya ve tozlarla dolma oranını önemli bir yer tutmaktadır. Eğer bilya ile toz miktarı oranı çok düşük ise üretilen alaşım miktarı da çok düşük olacaktır. Eğer bilya ve toz miktarı çok fazla olursa, bu seferde üretim hızı çok yavaşlayacaktır ve bilyaların hazne içerisinde dolaşımı için yeterli alan bulamayarak tozlara etkin bir şekilde çarpma kuvveti oluşturamayacaktır. Eğer kabın doluluk oranı az ise, enerji artışından dolayı kirlenme problemi oluşabilir. Bu nedenle, genellikle haznenin doluluk oranı %50 olarak alınır [72].

4.4.8. Öğütme atmosferi

Mekanik alaşımlama işleminde öğütme işlemi sırasında kullanılan atmosferin en önemli etkisi tozun kirlenmesidir. Ayrıca kullanılan malzemeye göre direkt olarak oksitlenme ile de ilişkilidir. Bu sebepten kullanılan haznenin, oksitlenme tavrını ve kirlenmeyi önlemek için ya havası boşaltılarak ya da argon, helyum gibi asal gazlar ile kontrol altında tutulmalıdır. Yüksek saflıktaki argon ve helyum tozların mekanik alaşımlama işlemi esnasında oksitlenmesini ve kirlenmesini önlemede yaygın olarak kullanılan atmosfer ortamıdır. Ancak azotun azda olsa elementel tozlarla reaksiyona girdiği bilinmektedir. Ancak azot atmosferi kullanılarak tozların oksidasyonunu önlemek veya en aza indirmek mümkündür.

Özel amaçlar için öğütme sırasında farklı atmosferler de kullanılmıştır. Nitrür oluşturmak için azot ve amonyak yaygın olarak kullanılmaktadır. Hidrojen atmosferi ise hidrid üretmek için kullanılmıştır. Haznenin içerisinde havanın olması toz içerisinde oksitlerin ve nitrürlerin oluşmasına neden olur. Özellikle tozlar, yapıları itibari ile reaktiflerse, öğütme esnasında asal bir atmosferin kullanılması doğru

alaşımlamanın yapılabilmesi için önemlidir. Reaktif malzemelerde, oksit türevi takviye elemanlarının alaşımlama sırasında kendiliğinden oluşturulması da mümkündür. Ancak, oluşturulan oksidin büyüklüğünün ve miktarının kontrol edilmesi güçtür [56].

Kullanılan atmosfer türü öğütme işleminde kullanılan metal tozunun faz yapısını etkileyebilir. Örneğin, Cr-Fe toz sistemi farklı türdeki atmosfer altında öğütüldüğünde üretilen malzemenin yapısının farklı olduğu ortaya çıkmıştır. Argon gazı ile öğütme ortamında öğütülen tozlarda amorf faz oluşmazken, hava veya azot gazı kullanıldığında yapının tamamen amorf hale dönüştüğü belirlenmiştir [97].

4.4.9. Sıcaklık etkisi

Öğütme ısısı üretilmek istenen alaşımın mikro yapısını etkileyen diğer önemli bir parametredir. Sıcaklık değişimi ile üretilen alaşımda meydana gelen intermetaliklerde, katı çözelti oluşumunda, difüzyon işleminde, nano-yapı oluşumunda ve bir amorf fazın oluşumunda önemli bir etkiye sahiptir olduğu söylenebilir.

MA işleminde metal toz parçacıklarının öğütülmesi sırasında yüksek difüzyon hızıyla birlikte oluşan sıcaklık fazla ise oluşan alaşımın yeniden kristalize olmasına neden olur ve kararlı intermetalik fazlar oluşur. Sıcaklıktaki artış az ise yeniden kristalleşme söz konusu olamayacağından amorf veya nano-kristal yapıların oluşumu mümkündür. Metal toz parçacıklarındaki bu sıcaklık artışının başlıca iki nedeni vardır. Bunlardan ilki, bilyaların hareketinden dolayı oluşan kinetik enerji diğeri ise öğütme sırasında oluşan ekzotermik reaksiyonlardır. Ayrıca öğütme haznesinin yapıldığı malzemenin de sıcaklık artışına sebep olacağı söylenebilir [72]. Bu sorun belli bir seviyeye kadar kullanılan soğutma sıvısı veya gazı ile durdurulabilir. Ayrıca cihaz belli bir süre durdurularak soğutma işlemi yapılabilir.

4.4.10. İşlem kontrol kimyasalı (İKK)

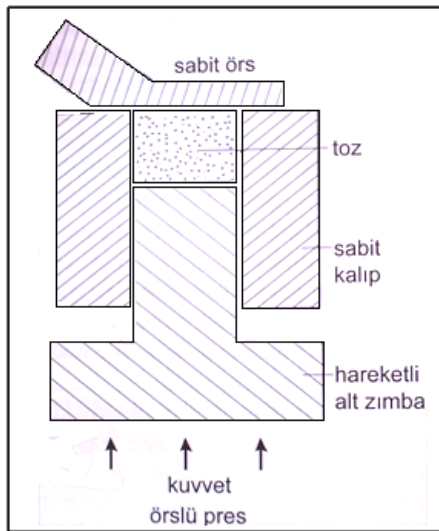
MA işlemi esnasında tane boyutunu küçültmek ya da kontrol edebilmek için çeşitli işlem kontrol elemanları kullanılmaktadır. Metal olmayan bu organik maddelerin ilavesi ile öğütme davranışı önemli bir derecede etkilenir. Bu gibi maddelerin ilavesi sayesinde tanelerin yüzeylerinde film tabakası oluşturularak soğuk kaynaklanmayı kontrol altına alabilir, tane büyümesini ve safsızlıkların topaklaşmasını engelleyebiliriz. İşlem kontrol kimyasalı olarak çeşitli yağlar, sabunlar, alkoller ve bazı asitler (stearik asit gibi) yaygın bir şekilde kullanılmaktadır [98].

Sünek tozların kaynaklanma ve sıvanmaya olan eğilimi yüksektir. Bu tozların kırılmaya olan direncinden dolayı incelmeleri gecikir. MA işlemi esnasında ilave edilen kimyasallar yardımıyla kaynaklanmanın yanı sıra kırılmada etkin hale gelir. Kullanılan kimyasallar da katı, sıvı ve gaz halde olabilmektedirler (hegzan, heptan, oktan, etanol, etil asetat, grafit metanol, sodyum klorür, stearik asit, çinko stearat gibi). İlave edilen kimyasallar genellikle kırılmayı hızlandırırken, yağ türevleri de tozlar tarafından emilebilir. Genellikle ilave edilen işlem kontrol kimyasalı %1,5 civarında olmaktadır. İlave edilen kimyasal, yapı içerisinde sürekli olarak kalabildiği gibi, işlem sonrası sinterleme gibi ilave işlemler sırasında bünyeden atılabilirler. İlave edilen bazı kimyasallar bileşik oluşturup (hidrokarbonlar, karbonhidratlar, oksitler, karbürler gibi.) matris içerisinde homojen ya da heterojen olarak dağılırlar. Oluşan bu ince parçacıklar genellikle dayanım ve sertlik üzerinde olumlu yönde etki yapmaktadır [99]. Sinterleme sonrasında uzaklaşan İKK ilaveleri yoğunlukta düşüşe neden olabilmektedir. Yoğunluk hesapları yapılırken bu faktör göz ardı edilmemelidir.

İşlem kontrol kimyasalının kullanılan tozun hacmine oranlanarak katılması gerekmektedir. İşlem esnasında oluşabilecek bileşiklerine dikkat edilmelidir. Özellikle sinterleme esnasında bünyeden uzaklaştırılacak olan İKK'larının gaz dönüşümlerinde ekstra gözenek oluşturmamasına dikkat edilmelidir. Gözenek oluşumunun yoğunluğa etkisi olacağından, sinterleme sonrası malzeme içerisinden uzaklaştırılan kimyasalın yoğunluğa etkisi olacağı bilinmelidir.

4.5. Presleme

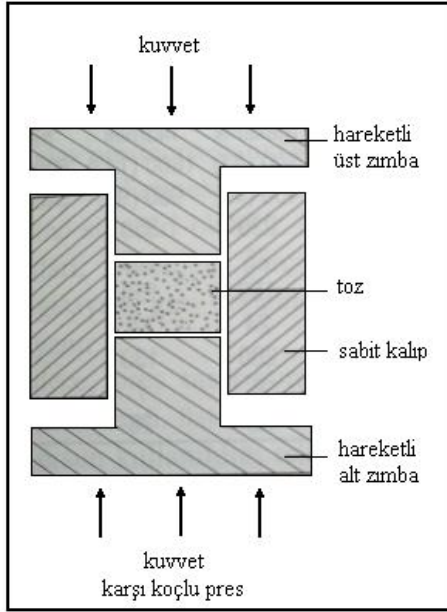
Presleme; tozun kalıp boşluğuna beslenmesi, toza basınç uygulanması ve ham parçanın kalıptan çıkartılması işlemlerinden oluşur. En basit olanı; dişi ve alt erkeğin sabit kalarak, üst erkeğin ilerlemesi ile yapılandır. En basit halde tek zımba hareket eder, alt zımba ve dişi kalıp sabittir. Düz parçalarda üst zımbanın yerine sabit bir plaka konarak presleme yapılabilir ve buna örs tipi presleme denir. Bu presleme tekniği şematik olarak Şekil 4.11’de gösterilmiştir. Burada alt zımba tozu bir plakayla üst kısmı kapatılmış dişi kalıp içinde sıkıştırmaktadır. Örs tipi presleme, basit parçaların çok sayıda üretimi için kullanılmaktadır [62].



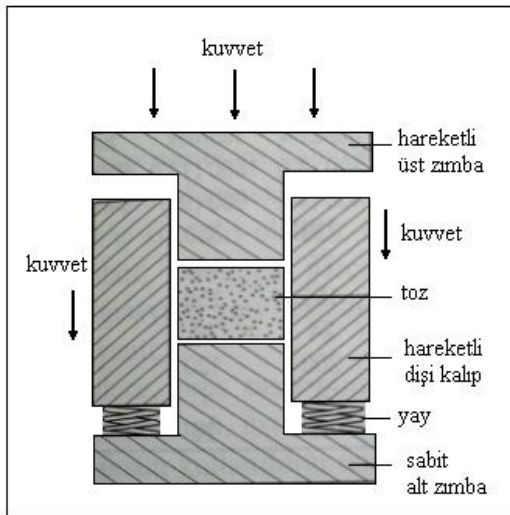
Şekil 4.11. Örslü presleme tek hareketli sıkıştırmanın en basit şekli [62]

Kalıpta sıkıştırmanın çoğu en az iki presleme hareketi ile yapılmaktadır. Genellikle alt ve üst zimbalar dişi kalıp merkezine doğru hareket eder. Bu hareketler Şekil 4.12 de çift hareketli pres için gösterilmiştir. Presleme sırasında her iki zımba da dişi kalıbın merkezine doğru hareket eder. Çıkartma için alt zımba parçayı dişi kalıbın üstüne iter. Çok kullanılan bir alternatif ise sabit bir alt zımba ve yüzer (hareketli) dişi kalıp ile yapılan preslemedir. Üst zımbaya basınç uygulandıkça, dişi kalıp duvarlarındaki sürtünme kuvveti, dişi kalıbın bir yaya karşı hareketlenmesine sebep olur. Böylece, sabit olan alt zımba dişi kalıbın merkezine doğru relatif hareket

yapmış olur. Bu tip kalıp Şekil 4.13’de gösterilmiştir. Çıkartma için dişi kalıbın sabit zımbaya doğru hareketlenmesi gerekir [62].



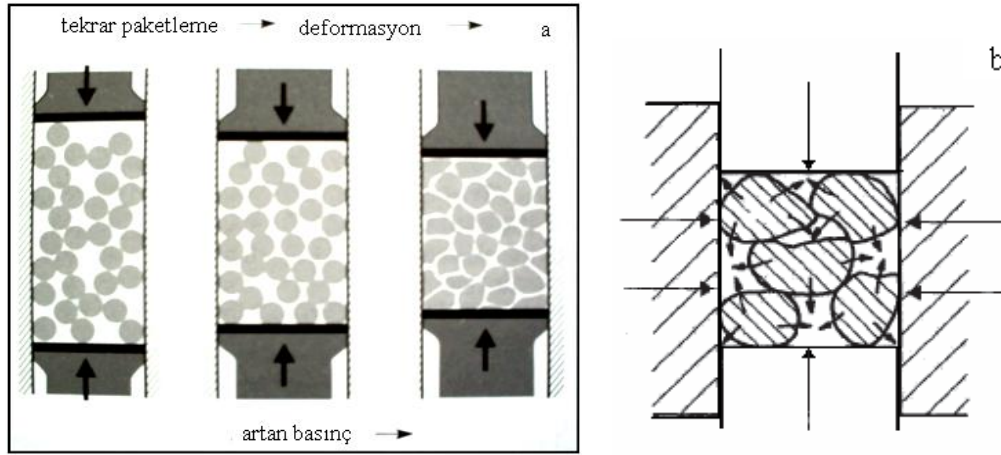
Şekil 4.12. Çift hareketli sıkıştırma ile sıkıştıran zımba [62]



Şekil 4.13. Yüzer dişi kalıplı presleme ile çift hareketli zımba etkisi oluşturma [62]

Yüksek performanslı tam yoğunlukta mamul üretmek için hızlı katılaştırılmış tozlar, şerit malzemeler veya MA uygulanmış tozlar kullanılabilir. Hızlı katılaştırılmış veya MA ile üretilmiş tozların birleştirilmesinde genellikle, sıcak presleme, sıcak haddeleme, sıcak dövme ve izostatik presleme kullanılır. Tüm bu işlemler preslenecek malzeme türüne bağlı olarak soğuk şartlarda veya oda sıcaklığının

üstünde yapılabilir. Ancak, bazı soğuk şartlarda presleme basıncının yüksek olması kullanılan kalıp ve malzemeye uygun olmayabilir [56]. Şekil 4.14’de çift yönlü preslemede basıncın artması ile tozlara uygulanan basıncın etkisi gözlemlenmektedir.



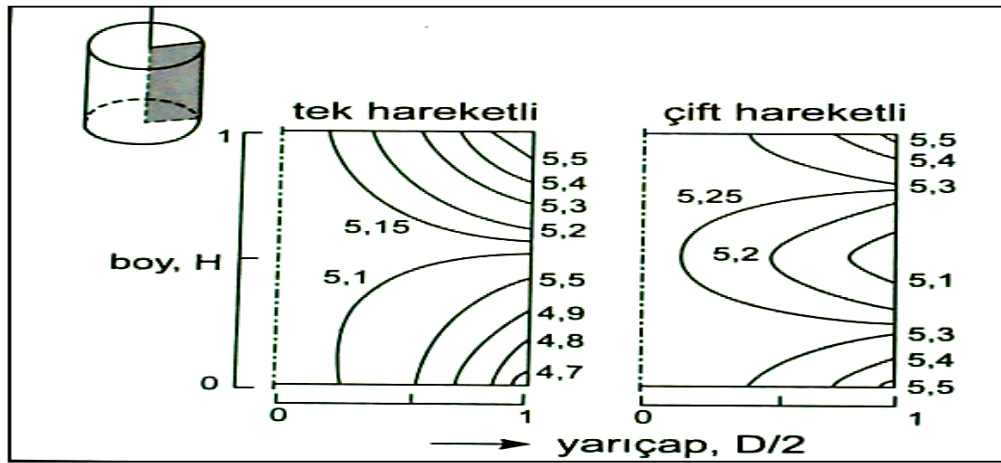
Şekil 4.14. a) Çift yönlü soğuk preslemenin şematik gösterimi [62]

b) Presleme basıncına bağlı toz ve kalıp etkileşimi [56]

Kalıp içerisine doldurulan tozlar basıncın etkisi ile sıkışır ve deforme edilebilme özelliğine bağlı olarak son şeklini alır. Genellikle, soğuk presleme aşamalarında tam yoğun kütle elde etmek için, tozların sıkışabilirliğini ve akışkanlığını artıran yağlayıcılar kullanılabilir. Kullanılan bu yağlayıcılar, kalıptan kütlenin çıkarılmasını kolaylaştırır, tozlar arasında sürtünmeyi azaltır ve enerji kayıplarını minimuma indirir. Bazı işlem kontrol kimyasalları hem MA sırasında hem de presleme aşamasında işlevsel rol oynar. Kullanılan bazı yağlayıcıların sinterleme sonrası gözenekliliğe ve istenmeyen kimyasal tepkimelere yol açması başlıca problemlerdir. Bu nedenle kullanılan kimyasalların malzemeye uygunluğu önemlidir. Sıcak presleme işlemine tabi tutulan numunelerin yoğunlukları, soğuk olarak üretilmiş olanlara göre daha iyidir. Aynı zamanda sıcak işleme tabi tutulan malzemelerin, sinterleme süresi ve sıcaklıkları aşağılara çekilebilir [56].

Soğuk presleme teorisine bakıldığında, kullanılan presleme çeşidine göre (tek taraflı zımba, yüzer kalıp, izostatik presleme, titreşimli presleme vb.) yoğunluklarında farklılıklar oluşmaktadır. Şekil 4.15’de gözlemlendiği gibi tek yönlü kalıbın eş

basınç eğrileri ile, çift yönlü kalıp karşılaştırılmıştır. Gözlemlendiği gibi çift taraflı preslemede, presleme yüzeylerinin iki tarafında da presleme sonrası yoğunluklar aynı ancak tek taraflı preslemede presin bastığı nokta ile sabit kısımdaki yüzey arasında yoğunluk farkı vardır. Preslenen yüzeyin alt kısımlarına doğru inildikçe yoğunluk giderek azalmaktadır.



Şekil 4.15. Bakır tozundan sıkıştırılmış silindirlerde sabit yoğunluk çizgileri. Çizgiler g/cm^3 olarak gösterilmiş olup, tek ve çift hareketli sıkıştırmalarda boy ve yarıçapa göre çizilmiştir [62]

4.6. Sinterleme

Preslenerek sıkıştırılan tozlar, ergime sıcaklığının altındaki bir sıcaklığa kadar ısıtılarak difüzyon yolu ile kimyasal bağlanmasını sağlamak ve böylece gözenek miktarını azaltma işlemine tozların sinterlenmesi denir [100]. Ergime sıcaklığının altındaki bir sinterleme işlemi sayesinde TM parçalarına çalışma şartlarında dayanabilecek özellikler kazandırılabilir.

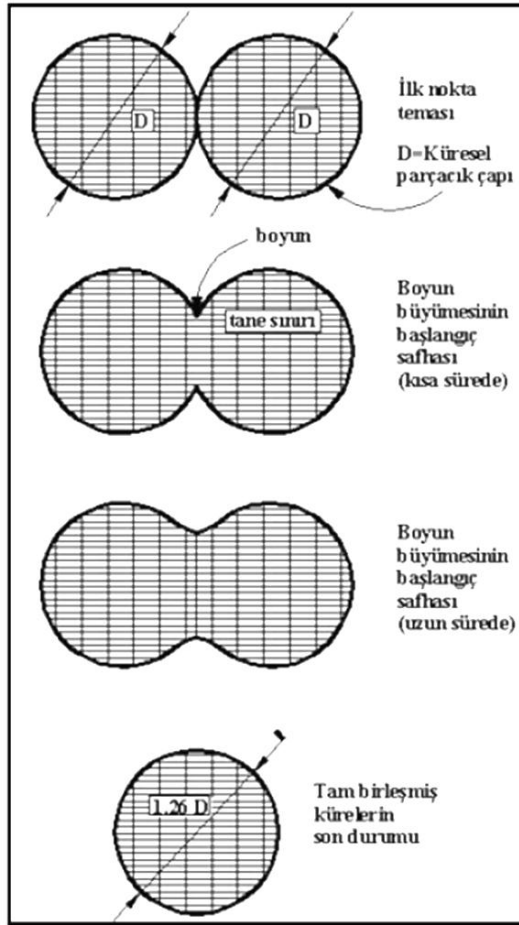
Tek bileşenli sistemlerde sinterleme sıcaklığı genellikle metalin ergime sıcaklığının 2/3 veya 4/5 alınarak tespit edilirken, birden fazla bileşenli sistemlerde ise sinterleme sıcaklığı, ergime sıcaklığı düşük olan bileşenin ergime sıcaklığının üzerinde, ergime sıcaklığı yüksek olan bileşenin ergime sıcaklığının altında seçilir. Sinterleme süresi kullanılan malzemeye göre değişir. Sinterleme süresi ile sinterleme sıcaklığı arasında

ters orantılı bir ilişki vardır. Sinterleme sıcaklığı yükseldikçe sinterleme süresi azalır [64].

Sinterlemeyi etkileyen pek çok faktör vardır. Bunlar; Toz boyutu, sıcaklık, alaşım elementleri, ham yoğunluk, sinterleme atmosferi, vb. Sinterleme mekanizmasının etkin olabilmesinde en önemli etken preslenecek ve sinterlenecek tozların yüzeyinde oksit veya sinterlemeyi olumsuz etkileyecek tabakaların oluşmamasıdır. Eğer oksit tabakaları oluşmuşsa ve presleme sırasında kırılmamışsa sinterleme hiç olmaz ya da çok verimsiz gerçekleşir [56].

Sinterleme, yüksek sıcaklıkta atomların yayınımları ve küçük parçacıkların yüzey enerjisinin azalmasıyla gerçekleşir. Toz üretiminde malzeme yüzeyine belli bir enerji verilerek yüzey alanı veya yüzey enerjisi oluşturulur. Sinterleme ile bu yüzey enerjisi giderilir. Birim hacimdeki yüzey enerjisi parçacık boyutu ile ters orantılıdır. Bu nedenle, daha yüksek özgül yüzey alanına sahip olan küçük boyuttaki parçacıklar daha yüksek enerjiye sahiptir ve daha hızlı sinterlenir. Fakat yüzey enerjisinin tamamı sinterlemeye harcanmaz [62].

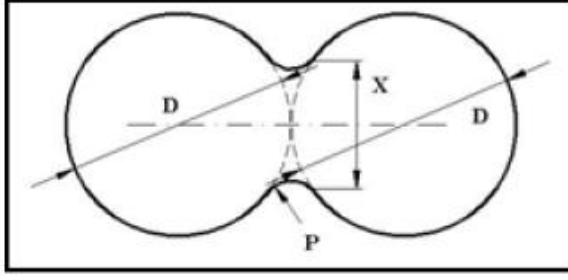
Sinterleme işleminde, yüksek sıcaklıklarda parçacıklar birbirine kaynaşır. Katı hal atomik geçiş olaylarının görüldüğü sinterleme işlemi, ergime noktasının altındaki sıcaklıklarda uygulanmasına rağmen birçok durumda sıvı-faz oluşumu gerçekleşir. Mikro yapı boyutundaki kaynaklaşma, parçacıkların birbirine değdiği temas noktalarında yapışma boyunlarının büyümesi şeklinde oluşur. Bu şekildeki boyun büyümesi toz özelliklerinin değişmesine de neden olur. Sinterleme işlemi esnasında, nokta teması ile başlayan, ara parçacık bağının gelişmesi ile devam eden mekanizmaya çift-küre sinterleme modeli denmektedir (Şekil 4.16.). Bu modelde, parçacık temasının sonucunda oluşan boyun büyümesiyle yeni tane sınırı oluşur. İki parçacık ilk çapın 1.26 katı olan bir son çapla tek bir parçacık oluşturacak şekilde birleşir.



Şekil 4.16. Çift-küre sinterleme modeli [101]

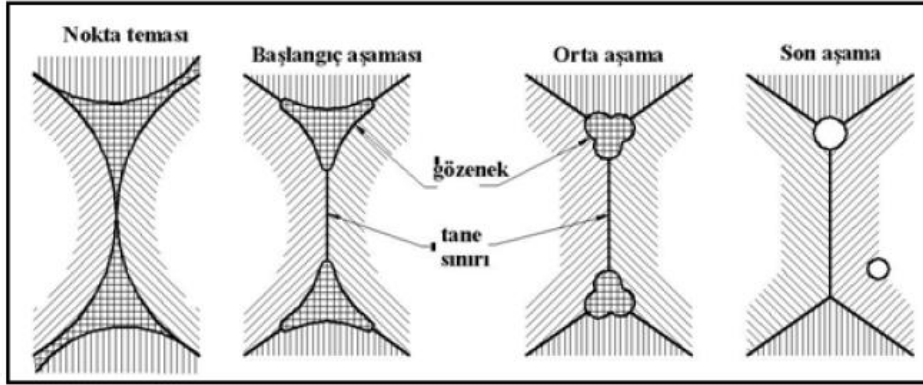
Sinterleme esnasında numunede bazı aşamalar oluşmaktadır. Bunlar;

- Sinterleme esnasında yağlayıcılar giderilir
- Oksitlerin indirgenmesi olur (Fırın atmosferindeki indirgeyici gazlar sayesinde)
- Difüzyon oluşur: Tozlar arası atomsal yayılım sonucu kaynaklaşma
- Gözenek küreselleşmesi ve küçük gözeneklerin kaybolması
- Yoğunlaşma: Sinterlenmiş parça yoğunluğu ham parça yoğunluğundan yüksek
- Ayrıca sinterleme esnasında (yağlayıcıların, bağlayıcıların giderilmesi ve bazı alaşım elementlerinin buharlaşması nedeniyle) kütle kaybı olabilir.



Şekil 4.17. Boyun çapı X olan iki küresel parçacığın sinterleme profili.
(X = boyun çapı, D = parçacık, P = boyun yarıçapı) [62]

Sinterleme sırasında atom hareketi görülmez, ancak hacim değişimleri meydana geldiğinden, işlem genelde bu değişimler ile izlenir. Boyun büyümesi bunlardan bir tanesidir. Sinterlemenin temel ölçülerinden biri, Şekil 4.17’de tanımlandığı gibi boyun büyüklük oranıdır. X/D , boyun çapının parçacık çapına oranıdır [62]. Şekil 4.18’de ise sinterleme işlemi esnasında parçacıklar arasındaki bağlar ve gözeneklerdeki değişimler şematik olarak gösterilmektedir.



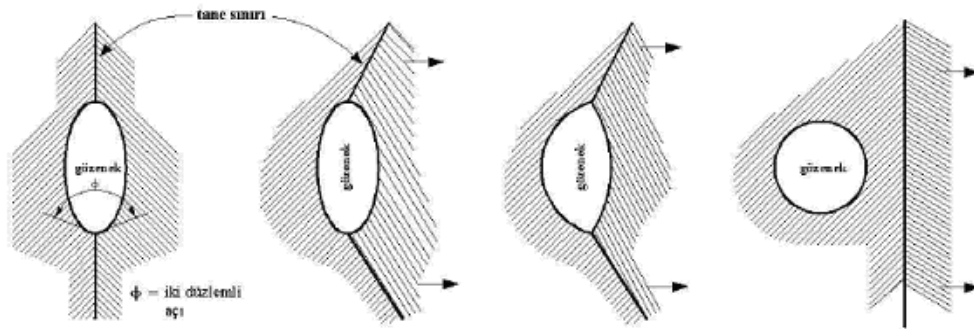
Şekil 4.18. Sinterleme basamaklarına göre gözenek yapısındaki değişim [62]

Sinterleme sonrası malzemelerin mekanik ve tüm işlevsel özelliklerine en etkin sonuç parça içerisinde oluşan boşluk ya da gözenek miktarıdır. Her ne kadar bu oluşumlarda presleme basıncı ve malzemenin özellikleri etkinse de, sinterleme sonrası gözeneklilik miktarı da çok önemlidir. Sinterleme sırasında her ne kadar ebatlarda değişiklik istenmese de, boşlukların giderilmesi için katı transfer işlemlerinin olması beklenir. Bunlar; hacimsel difüzyon, tane sınırı difüzyonu, plastik akış ve sıvı akışı şeklindedir [56].

Sinterleme ilerledikçe, gözenek-tane sınır etkileşimi üç şekil alabilir:

- Gözenekler tane sınırlarında kalarak tane büyümesini engeller,
- Gözenekler hareket eden tane sınırları tarafından sürüklenerek tane büyümesini yavaşlatır.
- Tane sınırları gözeneklerden koparak ayrılır.

Son durumda, tane içinde izole edilmiş gözenekler oluşur ve yoğunlaşma ilerlemez. Tipik sinterleme sıcaklıklarında, malzemelerin çoğu orta veya aşırı düzeyde tane büyüme hızları gösterir. Yüksek sıcaklıklarda, Şekil 4.19’da gösterildiği gibi tane sınırı hareketi gözenekten ayrılmaya yol açar. Düşük sıcaklıklarda, tane büyümesi yavaş olduğundan gözenekler tane sınırına bağlı kalır. Gözenek hareketi yüzey yayılımı ve buharlaşma-yoğunlaşma ile mümkündür. Sonuç olarak, sinterlemede mikro yapı gelişiminin ana belirleyicisi sıcaklıktır [62].



Şekil 4.19. Sinterlemenin son aşamasında gözenek izolasyonu ve küreselleşmesi [62]

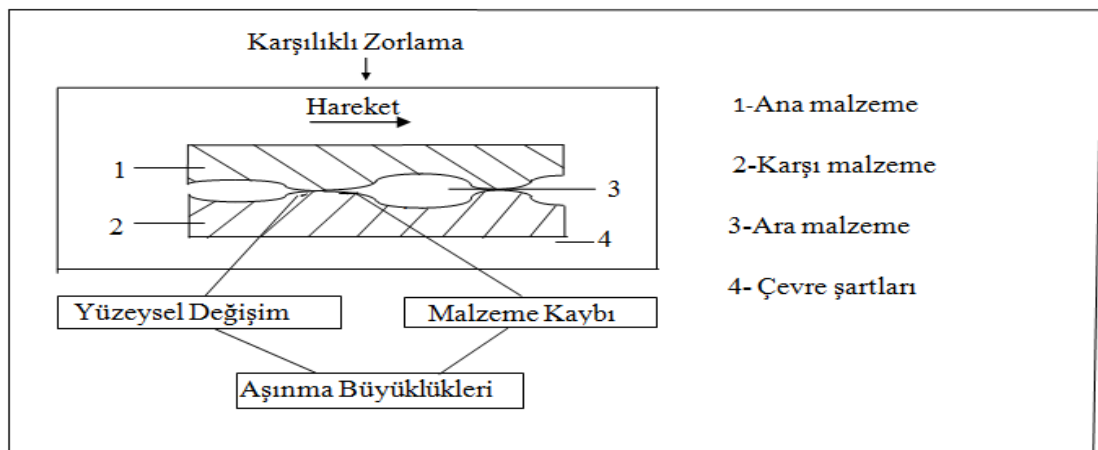
Son zamanlarda tam yoğun malzeme elde etmek için sıkça kullanılan bir metotta sıvı faz sinterlemesidir. Bu işlemde, katı fazların yanı sıra sıvı faz da oluşur. Sıvı faz difüzyon hızını büyük ölçüde artırarak parçacıklar arası bağ oluşum hızını artırır. Bu oluşum gözenek yapısı, mukavemeti, iletkenliği, manyetik özellikleri korozyon dayanımını büyük oranda etkiler [102].

Sinterleme işleminde en önemli parametrelerden biri de sinterleme atmosferidir. Sinterleme için gerekli olan atmosfer prensip olarak parçaların ve fırının oksitlenmesini önlemek, yüzey oksitlerini indirgemek, fırında buharlaşan yağlayıcı gazları dışarı atmak ve demir karbon alaşımlarında olduğu gibi blok parçanın bileşimini kontrol etmek için kullanılır. Endüstride, genellikle oksitlenmeyi minimuma indirmek için koruyucu atmosfer olarak Ar, H veya N gazları kullanılır [103].

5. AŞINMA

Aşınma, genellikle önceden bilinen bir hasar tipidir. Birbiriyle temasta olan malzeme yüzeyleri, oksit filmleri ve yağlayıcılar ile korunmaktadır. Fakat mekanik yüklemeler altında oksit tabakasının veya yağlamanın bozulması, iki yüzeyin birbiriyle temasına neden olur. Bu temasla oluşan sürtünme, malzemelerin çalışma şartlarındaki ömrünü ve performansını sınırlayan aşınmaya neden olur [104]. Sürtünerek çalışan bütün makine elemanlarında kaçınılmaz ve karmaşık (kompleks) olan bir sistem özelliği gösteren aşınma, büyük miktarlarda malzeme ve enerji kaybına neden olmaktadır [105]. Oluşan hasar, uygun malzeme seçimi, yağlama ve yerinde yapılan tasarım ile en aza indirilebilir.

Aşınma genellikle temas eden yüzeylerden mekanik etkilerle malzeme kaybı olarak tanımlanır. Alman DIN 50320 normuna göre aşınma, “Kullanılan malzemelerin başka malzemelerle (katı, sıvı, gaz) teması neticesinde mekanik etkenlerle yüzeyden küçük parçacıkların ayrılması sonucu meydana gelen ve istenmeyen yüzey bozulmasıdır” şeklinde tanımlanmaktadır. Aşınma olayını analiz edebilmek için aşınma olayını oluşturan temel unsurların bilinmesi gerekir. Tribolojik sistemi oluşturan bu unsurlar Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tribolojik sistemin şematik gösterimi [105]

Aşınma, çeşitli yönleri ile korozyona benzer. Bu iki hasar tipi de zamanla kendiliğinden gelişir, her ikisinin de oluşumu önceden bir derecede bilinebilir, her

ikisinin de çeşitli tipleri vardır. Aşınma da korozyon gibi bir yüzey olayı olduğundan, yüzeyi etkileyen her şey aşınma davranışını da etkiler.

Aşınma, temelde bir yüzey hasarıdır. Aşınma hasarları kapsamına giren yüzeyden malzeme kaybı kayma, kırılma, talaş oluşumu, yorulma, kimyasal çözünme ve difüzyon yoluyla gerçekleşebilir.

Aşınma olayında, oluşan hasarı değerlendirmek oldukça önemlidir. Yüzeyde oluşan hasar tipleri ve her bir hasarı önlemek amacıyla kullanılacak koruma yöntemi, uygulamadan uygulamaya farklılık gösterir. Örneğin tüketilebilir veya zamanla tüketilmesi fazla önem taşımayan parçalarda önemli olan, sistemde baskın durumda bulunan aşınma mekanizmasını önlemektir. Bu durumda, yüzeyde oluşan aşınma parçaları çok fazla önem taşımaz. Fakat dönen yataklar, baskı silindirleri gibi yüzey topografyasının öneminin yüksek olduğu uygulamalarda, yüzeyde oluşan parçacıklar hatta yüzey çatlakları bile, çalışan parçanın verimini olumsuz yönde etkilerler. Ayrıca aşınma, dış etkiler altında temas yüzeylerinde meydana gelen fiziki değişimlerin sonucu gerçekleşir. Mühendislik malzemesinde görülen yıpranmanın aşınma sayılabilmesi için bazı şartların gerçekleşmesi gerekir. Bunlar;

- 1) Mekanik bir etken olması,
- 2) Sürtünmenin (bağlı hareketin) olması,
- 3) Yavaş ve devamlı olması,
- 4) Malzeme yüzeyinde değişiklik meydana getirmesi,
- 5) İsteğimiz dışında meydana gelmesidir.

İstenmeden meydana gelen aşınma olayı, çeşitli makine ve teçhizatın kullanımı sırasında çok büyük ekonomik kayıplara (enerji, işgücü, malzeme vs.) neden olmaktadır. Örneğin; 1987 yılında yüksek işleme maliyeti 70 milyar dolar/yıl ve takım maliyeti ise 900 milyon dolar/yıl gibi çok yüksek değerlere ulaşmıştır [106].

Aşınma rejimleri: (Hafif Aşınma), (aşınma parçacıkları: küçük ($0.01 - 0.02 \mu m$), (yüzey: parlak), (bu aşınmanın hasarı), (işletme koşullarında kabul edilebilir boyuttur), (şiddetli Aşınma), (aşınma parçacıkları: büyük ($>1 \mu m$), (yüzey: pürüzlü ve çizikli).

Bu aşınmanın hasarı, işletme koşullarında kabul edilemez boyuttur. Aşınma, ne bir malzeme ve ne de bir malzemenin yüzey özelliğidir. Bir sistem özelliğidir. Bu nedenle çok değişkenli bir fonksiyon olan aşınmanın sürekli incelenmesi gerekir.

5.1. Tribolojik Sistem

Triboloji, “bir izafî hareket içinde bulunarak birbirlerine etki eden yüzeylerin ve bunlarla ilgili olayların bilimi veya tekniği” olarak tanımlanmaktadır. Triboloji; sürtünme, aşınma ve yağlamanın bilimsel incelenmesini ve tribolojik bilgilerin teknik uygulanmasını içermektedir [107].

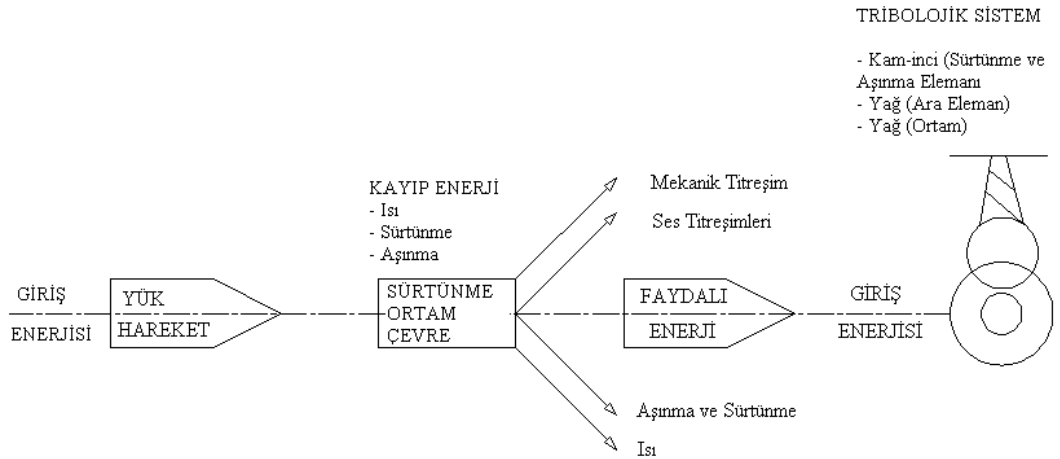
İçinde aşınma ve sürtünme olaylarının gerçekleştiği teknik sistemlere tribolojik sistem denilmektedir. Mühendislik malzemelerinin aşınma davranışlarının araştırılmasında mekanik sistemleri bir tribolojik sistem olarak dikkate almak gerekir. Yani aşınma olayı bir sistem bütünlüğü içinde ele alınmalıdır [108,109]. Şekil 5.2’de bir tribolojik sisteme giren enerji dağılımı görülmektedir.

Tribolojik sistemi oluşturan unsurlar, ana malzeme (aşınan), karşı malzeme (aşındıran), ara malzeme, yük, hareket ve çevreden oluşmaktadır. Bir tribolojik sistem bu unsurların birçoğunu içinde bulundurur. Aşınma çiftini oluşturan ana malzeme ve karşı malzeme aralarında belirli bir ara malzeme varken az veya çok yük altında hareket ettiklerinde aşınma başlar. Ana malzeme; metal, mineral, plastik, kauçuk, ağaç, deri v.s. gibi aşınma karakteristiğine önem verilen katı cisimdir. Aşındıran malzeme ise metal, mineral, plastik, ağaç v.s. şeklinde katı olabileceği gibi sıvı veya gazlarla karışım durumunda da olabilir. Ara malzeme ise yağlar, aşınma parçacıkları v.b. olabildiği gibi bazen hiçbir madde olmayabilir. Endüstride çoğu

zaman aşınma parçacıkları yüzeylerden temizlenememektedir. Böyle durumlarda arada yağlayıcı da yoksa teknik de kuru sürtünmeden söz edilir. Çevre, çalışma ortamıdır. Yükleme darbeli, darbesiz, sabit, değişken v.s. şeklinde veya bunların birden fazlasının bir arada bulunması halinde olabilmektedir. Hareket ise kayma, yuvarlanma, kaymalı yuvarlanma, darbe şeklinde olabilir [110-112].

Tribolojik sistemde ortaya çıkan aşınma mekanizmaları da farklıdır. Adhesiv aşınma, abrasiv aşınma, yorulma aşınması, triboksidasyon aşınması gibi mekanizmalarla tanımlanan aşınma, tribolojik sistem içerisinde genellikle tek başlarına bulunmazlar ve etkin oranları kesin olarak belirlenemez. Ancak etken olan aşınma mekanizmasına göre önlemler yoğunlaştırılabilir [113,114].

Tribolojik test cihazları, gerçek sistemlerde etkenlerinin analiz edilebilmesinin zorluğu ve ölçümlerin uzun sürelerde ve güçlükle yapılabilmesinden dolayı model sistemlerinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Araştırmacılar genellikle inceledikleri sistemi dikkate alarak çalışmalarında kullanacakları aşınma test cihazlarını seçerler ve tasarlarlar. Bu seçim veya tasarımlarda, gerçek sistemi oluşturan tribolojik unsurları sağlayabilen ve sonuçları büyük oranda tekrarlayabilen cihazların belirlenmesi önemlidir. Aşınma test cihazları kısmen standartlaştırılmıştır [113,114]. Ancak standart test cihazlarında her sistemin şartlarını bulmak mümkün olmamaktadır.



5.2. Aşınma Mekanizmaları

5.2.1. Adhesiv (Yapışmalı) Aşınma Mekanizması

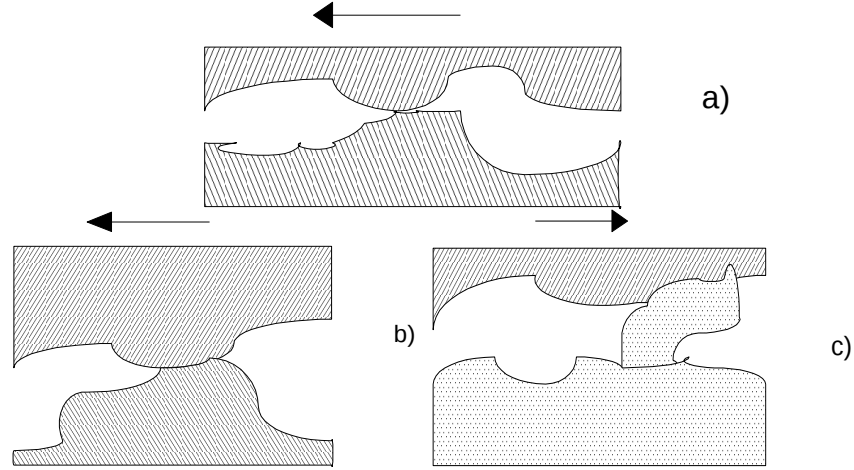
Kayarak sürtünme yapan, metalografik yapıları birbirine benzeyen iki metalin yüzeyleri arasında adhesiv çekim kuvveti söz konusudur. Bu kuvvetin oluşması moleküllerin yaklaştırılmasına bağlıdır. Temas halindeki yüzeyler pürüzlerle etkileştiklerinden, metal ağırlığı veya etkiyen bir kuvvet, temasla olan çok küçük pürüz tepelerine çok yüksek basınç olarak etkir. Bu basınç, bu noktalardaki gerilme pürüzlerin akma sınırını aşınca plastik deformasyona, pürüzlerin birbirini çizmesine, yarmasına ve sıvanıp kaynaklaşmalarına neden olurlar. Ayrıca pürüzlerin deformasyonu ile oluşan mikro adhesiv temas yüzeyi boyunca yayılır. Çiftin karşılıklı hareket etmesi halinde de yüzeyde bulunan absorbe olmuş sıvı veya gaz molekülleri ve oksit tabakaları parçalanarak aşınma çiftinde soğuk kaynaklaşmayı oluşturur. Kayma hareketi sırasında bu noktalar koparak yenme ve aşınmaya neden olurlar. Bu tip malzeme kaybı adhesiv aşınmayı oluşturur [116,117-119].

Aşınma çiftinin yüzeyleri arasındaki tutunma kuvvetleri (adhesiv bağ mukavemetleri) eşit büyüklükte ise veya adhesiv bağ mukavemeti, büyük ise pürüz kopar ve malzeme kaybına neden olur. Eğer adhesiv bağ kuvveti pürüz mukavemetinden küçükse, pürüz kaynak noktasından kopar ve hiç bir malzeme kaybına neden olmaz. Adhesiv aşınması sırasında iki sürtünme yüzeyi orasında üçüncü bir cisim meydana gelmektedir. Özellikle adhesiv aşınmada kırılan parçalar ara yüzey de serbest kalabileceği gibi metallerden birine bağlı kalarak da taşınabilirler [111,119-121].

Adhesiv aşınma sırasındaki oksitlenme olayını, koroziif aşınma karıştırmamak gerekir. Yukarıda bahsedilen parçalanma malzeme moleküllerinin direk temasa geçmelerine imkân verir. Bunun neticesinde de bölgesel kaynak bağları oluşur (soğuk kaynaklanma). Bu sırada eğer izafi hareket de varsa yüzeydeki sıcaklık yükselir ve ergime noktasına kadar ulaşabilir. Böylece kaynama yerinden veya metal yüzeyinden bir miktar parça kopar. Bu metalik parçacıklar, ara yüzeyde serbest

parçacıklar halinde kalabilecekleri gibi metallere birine bağlı şekilde de bulunabilirler. Her iki durumda da malzeme kaybı (aşınma) meydana gelmekle beraber, ikinci durumda malzemelerin birinden diğerine malzeme transferi söz konusudur [122].

Kristalografik olarak benzer kafes yapılı malzemelerde adhesiv aşınma mekanizmasını açıklanabilmesine rağmen farklı yapıdaki malzemeler arasındaki aşınma, adhezyonla başlamaz. Bu gibi malzemelerde Şekil 5.3' de görüldüğü gibi yüksek gerilme ve basıncın etkisiyle pürüzler birbirine geçerek plastik şekil değiştirir. İzafi hareket başladığında zayıf olan malzemenin pürüzleri kopar ve serbest tanecikler meydana gelir. Eğer sıcaklık yükselirse atomik difüzyonla bölgesel kaynak bağları meydana gelir, Difüzyon az ise kaynama olmayacağından kırılan parçacıklar serbest hale geçerler.



Şekil 5.3. Adhesiv aşınmanın meydana gelişinin şematik olarak gösterimi. a) İki çıkıntının buluşması ve bağ oluşturması b) Bağı koparak bir yüzden diğerine malzeme transferinin oluşumu c) Uzanmış olan çıkıntının diğer yüzeydeki çıkıntıyla etkileşimi sonucunda da yüzeyde kırıntı oluşumu[122]

5.2.2. Abrasiv Aşınma Mekanizması

Abrasiv aşınma, uygulanan yük ve hareketin etkisiyle, sürtünen iki cisimden daha sert olanının, pürüzleri veya taneleri vasıtasıyla diğerini çizerek üzerinden mikro talaş kaldırması olayıdır. Bu tarif, katı/katı, katı/mineral, katı/sıvı gibi birçok sürtünme elemanlarında meydana gelen abrasif aşınmayı kapsar.

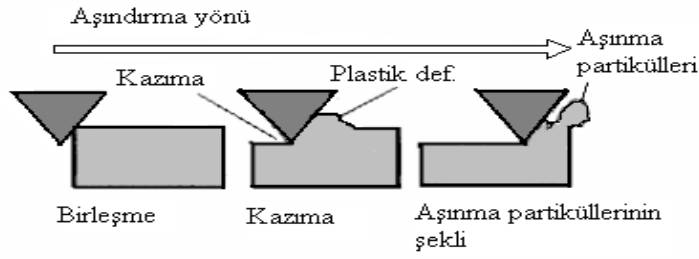
Sürtünen cisimlerin, doğrudan olarak karşılıklı etkileşimleri sonunda meydana gelen abrasiv aşınma, iki cisimli abrasiv aşınma olarak tanımlanmaktadır. Eğer ara yüzeyde sürtünme elemanlarını çizerek tahrip eden sert tanecikler de bulunuyorsa bu tür aşınmada ‘Üç Cisimli Aşınma’ denir. Bu tanecikler ara yüzeye dışarıdan girebilecekleri gibi aşınma enkazları da olabilirler [123,124].

Genellikle aşınma mekanizmaları, metal/metal sürtünmelerinde iki cisimli abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp üç cisimli abrasiv olarak devam eder. Üçüncü cisim olarak ortaya çıkan toz, mineral taneleri, çizilme sonunda serbest hale gelen mikro talaşlar ve parçalanmış oksit parçacıkları olabilir. Üçüncü cisim abrasiv aşınma, aşınmayı hızlandırır. Bir sistem içinde yüksek hızlı parçacıkların akışı, erozyon olarak bilinen abrasiv aşınmanın özel şeklini ortaya çıkarır [124,125].

Khrushov ve Babichev, aşındırıcı parçacıklara temas eden yüzeyde iki durumun meydana geldiğini teşhis etmişlerdir [126]. Bunlar;

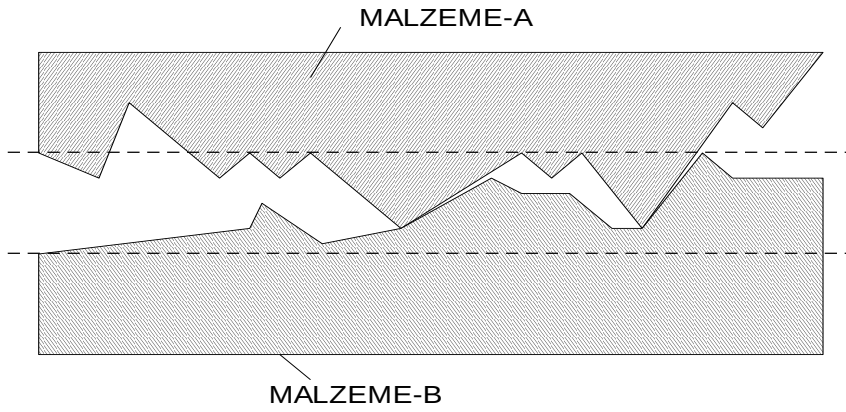
- 1-Basıncın etkisiyle plastik şekil değiştirme sonucu çiziklerin oluşması (Metal kalkmadan, yüzeyin plastik şekil değiştirmesi),
- 2-Mikro talaş şeklinde metal parçacıkların ayrılması (Yüzeyden mikro talaşların ayrılması)

Abrasiv aşınma, kesilme, kazınma ve tekrarlanan deformasyon gibi yüzeyi tahrip eden çeşitli mekanizmalar ile meydana gelir. Abrasiv aşınma için en önemli şart, sürtünme sırasında, abrasivin sertliğinin aşınma malzemesi sertliğinden daha fazla olması gerekir. Abrasiv Aşınma şeması şekil 5.4’de gösterilmektedir [126].

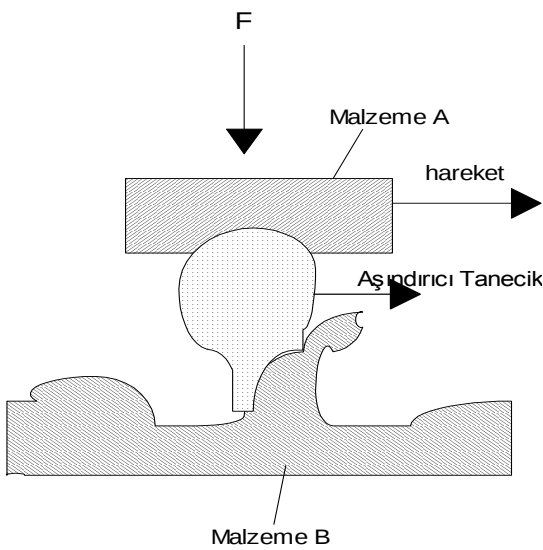


Şekil 5.4. Abrasiv aşınma şeması [127]

Bu tip aşınmada sert ve keskin parçacık, malzeme yüzeyinden mikron boyutlu talaş kaldırma etkileri gösterirler. Bu aşınma, iki elamanlı ve üç elamanlı olmak üzere ikiye ayrılır. Bu mekanizma Şekil 5.5 ve 5.6'da gösterilmektedir.



Şekil 5.5. İki elamanlı abrasiv aşınma [128]



Şekil 5.6. Üç elamanlı abrasiv aşınma [128]

İki elemanlı abrasiv aşınma, sürtünen elemanların doğrudan birbiriyle etkileşimleri sonucu meydana gelir. Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, aşınan ve aşındıran malzeme arasında serbest ara malzeme olması söz konusu olabileceği gibi, aşınma sonucu yüzeylerden ayrılan parçacıkların birer ara malzeme gibi davranmaları da üçüncü eleman olarak görev yapabilir.

Metal-metal sürtünmelerinde aşınma iki elemanlı abrasiv veya adhesiv olarak başlayıp, üç elemanlı abrasiv olarak devam eder. Bu durumda araya giren toz, mineral taneleri, çizilme sonucu serbest hale geçen mikro taşlar ve parçalanmış oksit parçaları üçüncü elemanı (ara malzemeyi) oluşturabilir. Serbest hale geçen mikro talaş parçaları, genellikle ana malzemeden daha sert olduklarından dolayı aşınmayı hızlandırır.

5.2.3. Yorulma Aşınması

Mühendislik malzemelerinde yorulma olayı, tekrarlanan zorlanmalar altında ve zamanla meydana gelir. Yorulma aşınması mekanizması malzemenin yüzeyinden başlar. Yüzey bölgesi titreşimli bir zorlanmaya maruz kaldığında veya sürtünme elemanları tekrarlanan gerilimlerle etkileştiklerinde bu gerilmelerin sebep oldukları mikro çatlaklar vasıtasıyla yorulma aşınması denilen pulcuklar şeklinde malzeme ayrılmaları meydana gelir. Bu olay esnasında içyapıda parçalanmalar ve yırtılmalar meydana gelerek yüzeyden kısmi kopmalar olur [129].

Maksimum kopma gerilmelerinin bulunduğu yerde plastik deformasyon ve dislokasyon olaylarına bağlı olarak çok küçük boşluklar meydana gelmektedir. Bu boşluklar zamanla yüzeye doğru ilerlemekte, büyümekte ve nihayet yüzeyde küçük çukurlar meydana gelmektedir. Pitting adı verilen bu aşınma tipi, daha çok dişli çarklarda, rulmanlı yataklarda ve kam mekanizmaları gibi yuvarlanma hareketi yapan elemanların yüzeylerinde meydana gelir [130].

5.2.4. Eroziyon aşınma

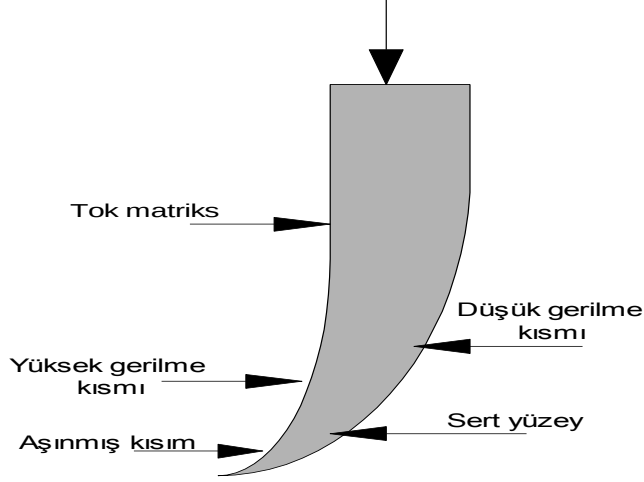
Erozyon ortamı ile malzeme yüzeyi arasındaki hızın çok yüksek olması nedeniyle meydana gelen bozunma olayı olarak tarif edilebilir. Gaz veya sıvı ortamında taşınan abrasiv tanelerin yüzeye belirli bir açıda çarpması ile oluşan enerji, katı cismin basınç mukavemetini aştığı zaman, cismin yüzeyinde plastik deformasyon meydana gelerek yüzeyde kırılmalara sebep olur ve yüzeyde aşınma meydana gelir. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya erozyon aşınması denir. Yumuşak malzemeler erozyon aşınmasına çok elverişlidir. Aşındırıcı parçaların büyüklüğü, hızı, şekli, sertliği ve çarpma açısının değeri erozyon aşınma mekanizmasını etkileyen önemli faktörlerdir. [131-133].

5.2.5. Öğütmeli aşınma

Öğütmeli aşınma, yüksek basınçlar altındaki parçacıkların metal yüzeyleri ile düşük hızlarda karşılaşmaları sonucunda, metal yüzeyinde parçacıkların kesilerek veya çok sayıda ufak çizikler açılarak kopartılması ile meydana gelir. Bu yüksek basınç ve düşük hız kombinasyonu, genellikle hafriyat çalışmalarında kullanılan buldozer ve kepçe gibi ağır iş makinelerinin çalışma koşullarında meydana geldiği için, bu araçların kesici uç yüzeylerinde bu hasar türü meydana gelir. Kepçelerde kullanılan kesici ve batıcı uçların, öğütmeli aşınma sonucunda şekil değişimi meydana gelerek körlenme oluşur.

Bu tip aşınmayı engellemek için yapılan girişimlerin başarısızlığa uğraması nedeniyle, malzemenin kontrollü olarak aşındırılması yoluna gidilmeye çalışılmıştır. Kontrollü aşınma ile malzeme kendi kendine bilenerek, körlenme sebebiyle meydana gelen performans düşüklüğü önlenabilir. Bu mekanizma ile meydana gelen kendi kendine bilenmenin oluşumu, Şekil 5.7’de şematik olarak gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, kesici takım malzemesinin düşük gerilmeli yüzeyine sert metal takviyesi yapılarak aşınma hızı azaltılmıştır. Diğer yüzeyde ise hem malzeme sertliğinin düşük olması, hem de yüksek gerilme etkisinde kalması nedeniyle aşınma

hızı, diğer yüzeye göre daha fazladır. Meydana getirilen bu farklı aşınma hızları nedeniyle, malzeme kendi kendine keskinleşir [134].



Şekil 5.7. Bir kesici uçta meydana gelen kendi kendine bilenmesinin oluşum mekanizması [134]

5.2.6. Oymalı aşınma (Gouging Wear)

Oymalı aşınma, malzeme yüzeyinin çok yüksek gerilmelerdeki çarpma durumlarında, yüzeyden bir parçanın kesilerek veya oyularak kopmasıyla meydana gelir. Bu tip aşınmaya genellikle hafriyat, madencilik, petrol kuyularını delme işlemi ve benzeri koşullarda çalışan malzemelerin kesme ve delme görevi yapan kısımlarında görülür. Bu işlemler sırasında sert abrazif parçacıkların çok yüksek gerilmeler altında malzeme yüzeyine çarpmaları ile yüzeylerde hızlı bir şekilde hasar oluşumu meydana gelir. Oymalı aşınma diğer aşınma türlerine göre çok daha hızlı olarak geliştiğinden, bu aşınmaya uğrayan parçaların yenileriyle değiştirilerek kullanılması daha ekonomik olmaktadır [135].

5.2.7. Kazımalı aşınma (Fretting wear)

Kazımalı aşınma, karşılaşan yüzeylerde mikro kaynaşmanın meydana geldiği adhezif aşınmaya bir miktar benzemektedir. Aralarındaki fark ise, şu şekilde açıklanabilir: Adhezif aşınma, birbirleri üzerinde kayan yüzeylerde meydana gelirken, kazımalı aşınma birbirlerine göre hareket etmeyen yüzeylerde meydana gelir. Ancak kazımalı

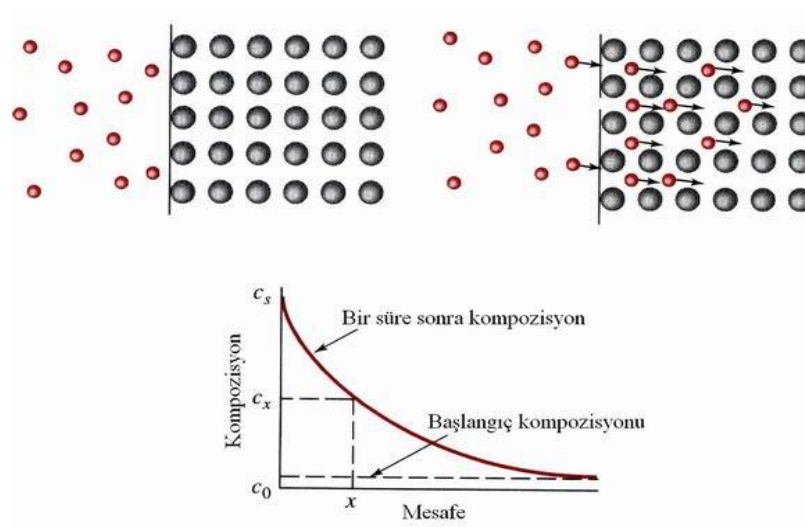
aşınma, hareketin az olduğu (vibrasyon) meydana geldiği sistemlerde, mikro kaynaşmanın oluşmasıyla meydana gelir.

Kazımalı aşınma vibrasyonlu ortamlarda çalışan somun, perçin gibi bağlantı elemanlarıyla gelişmiş sistemlerde, otomobil şaftlarının birleşme noktalarında ve yataklarda en yaygın olarak kullanılan hasar oluşum mekanizmasıdır. Kazımalı aşınma, temas yüzeylerinde yorulma otomobil şaft gibi parçalarda önemli bir problemdir. Gerçekte, şaftlarda meydana gelen yorulma kırılmalarının nedeni kazımalı aşınma meydana getirmektedir [133-135].

5.2.8. Tribosüblimasyon ve difüzyon aşınması

Sürtünme ısısı ile yüzey bölgesi sıcaklığının çok yükselmesi halinde ortaya çıkar. Yüksek sıcaklıkta atom veya moleküllerin malzeme içine girmesi difüzyon esasına ve çevreye transferi tribosüblimasyon esasına dayanan aşınma mekanizmalarıdır [135].

Birbirleriyle temas halinde bulunan yüzeyler arasında, sürtünmeden dolayı sıcaklık yükselmesi ile birlikte, temas yüzeyinde bulunan atomların kristal kafes içinde atom yoğunluğu yüksek olan bölgelerden düşük olan bölgelere doğru hareket etmeleriyle meydana gelir. Şekil 5.13’de yüzeyler arası malzeme transferi görülmektedir [136].



Şekil 5.8. Yüzeyler arası malzeme transferi [136]

Sistem çalışırken uygulanan kuvvetle yüzeylerin teması sağlanarak, malzeme yüzeylerinde gerilme yığılmaları ve sıcaklığın artışı ile birlikte temas noktalarında akma ve sürünme başlar. Bunun sonucunda temas noktaları plastik şekil değiştirmeye maruz kalır ve bunun sonucunda da temas alanları büyür.

Yüzeyler arası atom alışverişi meydana gelerek mukavemeti düşük olan bir yüzey tabakası meydana gelir. Bu tabaka, sürtünme ve izafi (bağıl) hareketin devam etmesiyle birlikte esas malzeme yüzeyinden koparak malzeme kaybına sebep olur. Bu şekilde meydana gelen aşınmaya difüzyon aşınması denir. Bu aşınma mekanizması fren balatalarında, uzay ve havacılıkta kullanılan araçlar ve takım tezgâhlarında görülür. Demiryollarında kullanılan fren pabuçları ile tekerlek arasındaki sürtünmeden dolayı difüzyon aşınması meydana gelebilir. Sıcaklığın yükselmesi ve yeterli zaman sonunda sürtünme yüzey bölgesinde atom veya moleküllerin çevreye transfer olması ile “tribosüblimasyon aşınması” meydana gelir [136].

5.2.9. Termal aşınma (Termal etkenler)

Mekanik ve kimyasal aşınma mekanizmalarının oluşumunu kolaylaştıran ve bu mekanizmalarla eş zamanlı işleyen bir oluşumdur. Bu mekanizmada sıcaklık etkisi ile atomik hareketler hızlanır. Malzemenin yumuşaması ile atomik aşınma gerçekleşir. Termal şok ve yüksek sıcaklıkta ki oksidasyonda termal aşınmaya sebep olur [137].

5.3. Aşınma Testleri ve Ölçüm Yöntemleri

Aşınma deney yöntemlerini genel olarak iki grupta toplamak mümkündür. Bunlar;

A) Yağlamalı ve yağlamasız bir ortamda ana ve karşı malzemenin (metal-metal) aşınma değerlerinin ölçüldüğü testler.

B) Katı, sıvı ve gaz halinde ki maddelerin etkisi altında yalnız karşı malzemenin aşınma değerinin ölçüldüğü testler.

ASLE (Amerikan Society Of Lubrication Engineers, 1978) tarafından yüz kadar test sistemi belirlenmiştir. Bu aşınma testlerinde, aşınma ölçüm yöntemleri olarak bilinen ağırlık farkı, kalınlık farkı, iz değişimi ve radyoizotop metotları gibi metotlar kullanılmaktadır. Bu metotlar aşağıda sırayla açıklanmaktadır [138]. Bir sürtünme sisteminde, aşınma miktarlarını ölçmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Sürtünme elemanlarının malzeme özelliklerine ve sistemin yapısına bağlı olarak yöntem seçimi yapılmalı veya beklenenleri yerine getirecek şekilde yöntem kombinasyonu geliştirilmesi yoluna gidilmelidir [139].

Bir ölçme yönteminden beklenen temel özellikler; Yüksek hassasiyet, Kolay, seri uygulama ve Ekonomik olmasıdır.

Aşınma testlerinin uygulanmasında farklı metotlar uygulanmaktadır. Bunlardan en yaygın olarak kullanılanları aşağıda açıklanmıştır.

5.3.1. Ağırlık farkı metodu

Ekonomik olması ve ölçülen büyüklüğün alet duyarlılık kapasitesi dâhilinde bulunması sebebiyle en çok kullanılan yöntemdir. Deney numunelerinin her ölçüm için yerinden çıkartılıp ölçme yapılması, yani numune yerindeyken üzerinden ölçü alınamaması bu yöntemin dezavantajıdır.

Ağırlık kaybının ölçülmesi 10^{-3} veya 10^{-4} gr hassasiyetinde oldukça duyarlı bir terazi ile yapılır. Aşınma miktarı gram (g) veya miligram (mg) cinsinden ifade edilirse, metre veya kilometre (km) olarak tespit edilen sürtünme yoluna göre birim sürtünme yoluna karşılık gelen ağırlık kaybı miktarı (g/km), (mg/m) ile ifade edilebilir. Ağırlık kaybı birim alan için hesap edilecekse (g/cm^2) gibi bir birim kullanılabilir. Ağırlık kaybı hacimsel aşınma miktarı olarak belirtilmek istendiğinde, yine ağırlık kaybından hareketle kullanılan malzemenin yoğunluğu ve deney numunesi üzerine etki eden yükleme ağırlığı hesaba katılmak suretiyle birim yol ve birim yükleme ağırlığına karşılık gelen hacim kaybından da gidilerek de bulunabilir. Bu

tanımlamalara göre ağırlık farkı ölçme metodunda en çok kullanılan bağıntılar şunlardır [138];

Burada;

W_a : Aşınma oranı ($\text{mm}^3/\text{N.m}$)

ΔG : Ağırlık kaybı (mg)

P : Yükleme ağırlığı (N)

S : Kayma yolu (m)

d : Yoğunluk (gr/cm^3)

olarak verilmiştir. Aşınma oranının (W_a) ters değeri de aşınma direnci (W_t) olarak gösterilir.

Başka bir bağıntı olarak da, bir kilometre kayma yoluna tekabül eden yükseklik kaybı bağıntısı vardır ki genellikle iki elemanlı abrasiv aşınmanın hesaplanmasında kullanılır.

Burada;

W_a : Bir kilometre aşınma yoluna karşılık gelen yükseklik kaybı (μm)

ΔG : Ağırlık kaybı (gr)

A : Aşınma yüzeyi (cm^2)

d : Yoğunluk (gr/cm^3)

S : Kayma yolu (km) olarak alınır.

Deney malzemesi yükseklik kaybının, referans malzemesinin (örneğin Fe 37 çeliği) yükseklik kaybına oranı, aşınma orantı sayısını (W_a) verir.

Bu orantı sayısının ters değeri de bağıl aşınma direnci (R) olarak kullanılır.

Üç elemanlı abrasiv aşınmada ise, genellikle DIN 50320’de verilen boyutsuz aşınma oranı formülü yaygın olarak kullanılır [138].

Hassas bir terazi yardımı ile test başındaki ve sonundaki ağırlık farkı (ΔG) ölçülerek aşınma sonucu oluşan malzeme kaybı bulunur. Sürtünme elemanın özgül ağırlığı (d) ve sürtünme yüzeyinin büyüklüğü (A) üzerinden bu yöntemle bulunan aşınma miktarı diğer metotların sonuçları ile karşılaştırılabilir. Burada;

Şeklindedir [139].

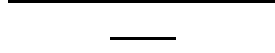
5.3.2. Kalınlık farkı metodu

Aşınma esnasında oluşacak boyut değişikliğinin başlangıç değeriyle karşılaştırılması sonucu elde edilir. Kalınlık farkı olarak tespit edilen bu değerden gidilerek hacimsel kayıp ve birim hacimdeki aşınma miktarı hesaplanır. Kalınlık, hassas ölçüm aletleriyle $\pm 1 \mu\text{m}$ duyarlılıkta ölçülmelidir [138,139].

5.3.3. İz değişiminin ölçülmesi metodu

Sürtünme yüzeyi bölgesinde geometrisi belli bir iz (küre, daire vb.) oluşturulur ve test boyunca bu izin boyutunun (çapının) değişimi ölçülür. Uygulamada en çok

kullanılan alet vickers sertlik ölçme cihazıdır. Elmas piramit (tepe açısı 136°) bıraktığı izin köşegenlerinin değişimi mikroskop yardımı ile büyütülerek ölçülebilir (51,52). Aşınma sonucu kalınlık farkı;



Şeklinde bulunur.

Burada; Do_1 ve Do_2 aşınmadan önceki köşegenler, D_1 , D_2 ; aşınma sonrası köşegen ölçülerine, α ; tepe açısıdır [139].

5.3.4. Aşınmanın radyo-izotoplarla ölçülmesi yöntemi

Diğerlerine göre daha yeni, fakat hassasiyeti çok fazla olan bir yöntemdir. Sürtünme yüzey bölgesinin proton veya yüklü α parçacıkları ile bombardıman edilerek radyoaktif hale getirilmesi esasına dayanır. Aşınma sonucu radyoizotopların yüzey bölgesinden ayrılmasıyla ortaya çıkacak aktivite değişimi ölçülür. Diğer yöntemlere göre yaklaşık olarak 1000 kat daha fazla hassas oluşu yöntemin en önemli özelliğidir. Test süresi ve masraflarının çok yüksek olduğu teknik sistemlerde (otomobil endüstrisinde) ve diğer yöntemlerin uygulanmadığı “açık” sistemlerde (normal işletmelerdeki ray-tekerlek aşınması gibi) radyo metrik yöntemlerle ölçme ekonomik, hatta tek yöntemdir. Fakat bu yöntem belirtilen örnekler gibi özel problemlerin çözümü dışında kullanılacak kadar ucuz ve teknik uygulama bakımından yaygın değildir [139].

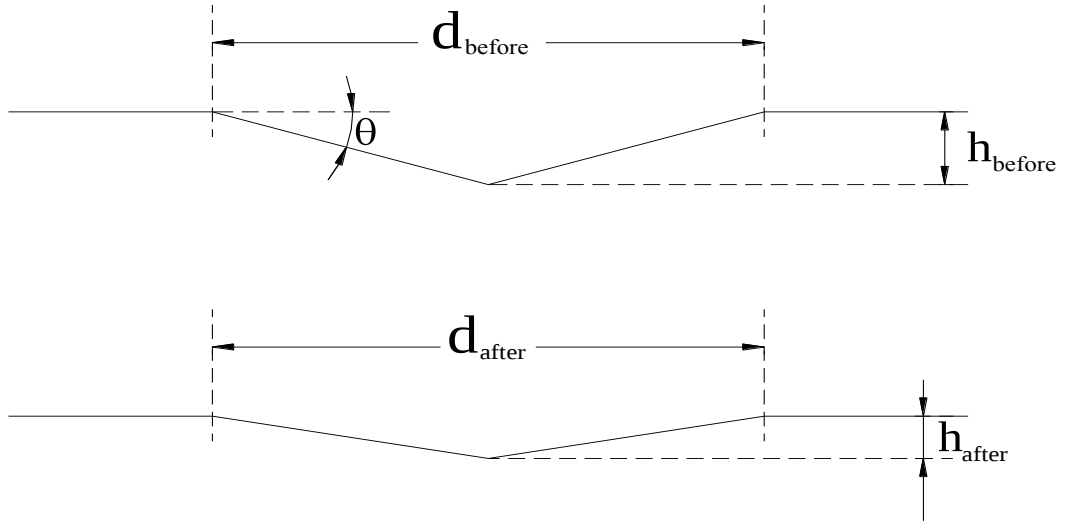
5.3.5. Ultrasonik yöntemle aşınmanın tespiti yöntemi

Ultrasonik aşınma yöntemi, bölüm kalınlığı ölçülecek malzemeye yüksek frekansta ses dalgaları gönderilmesiyle yapılmaktadır. Dalgaları gönderme ve alma arasında geçen zaman kalınlığı belirler. Bu yöntem aşağıdaki belirtilen özelliklere ve avantajlara sahiptir: Parçaları temizleme büyük zaman kaybına yol açar (özelliklerde kovanlarda ve pabuçlarda). Bu yöntem parçaların etrafında biriken kirlenmelere bağlı

olarak ölçme hatalarını önler, Teknik elemanlar arasında ki ölçme tekniği farklılıklarına bağlı olarak hataları giderir, Çok sayıda parça için bilgi depolar ve Otomatik aşınma yüzdesi ve tasarlanmış ömür hesapları için bilgisayar programları mevcuttur [140].

5.3.6. Optik yöntemle aşınmanın tespiti

Optik yöntemle aşınmayı ölçmenin birçok yöntemi vardır. Bunlardan biri yüzey üzerine boyutu belli olan bir mikro sertlik çukuru oluşturularak, aşınma sonrasında bu çukurun boyutundaki azalmayı incelemekten ibarettir. Optik yöntemin yatay saptanabilirlik sınırı 10^{-4} cm civarında olup 1/5 meylinde bir çukur (iz) için 10^{-5} cm'lik bir derinlik sınırı söz konusudur. Böylece de yukarıda sözü edilen profilometre yönteminin sınırlamalarıyla aynı sınırlamalarda aşınma ölçümü yapılabilir [140].



Şekil 5.9. Aşınmayı belirlemek için oluşturulan çukur [140]

Bu metodla aşınma miktarı eşitlik 5.8 ile belirlenir.

Radyoaktif izleyicilerle aşınmanın ölçümü, aşınmanın meydana geldiği anda ölçüm olanağı sağlar. Bu ölçüm 10^{-9} ile 10^{-12} gr mertebesinde saptanabilirlik sınırı vermektedir [140].

5.3.7. Mekanik ölçüm yöntemiyle aşınmanın tespiti

Genellikle mekanik ölçüm büyük boyutlu kayar parçalara (örneğin otomobil motoru silindirleri) uygulanır ve saptanabilen minimum aşınma miktarı çok daha büyük olur. İş makinelerinin büyük ve sürekli aşınmaya maruz kalan parçalarının kontrolünde işletme şartlarında en uygun yöntemdir [140].

Aşınmayı ölçmenin yöntemi ise, özellikle aşınmanın dar bir bantta meydana gelmesi halinde, bir profilometre ile şeridin bir profilini çıkartmak ve kazınmış malzeme miktarını tahmin etmekten ibarettir. 3 cm uzunluk, 10^{-2} cm genişlik ve 10 mikro inçlik bir şeritte 10^{-5} gr. bir ağırlık kaybı saptanabilir [140].

6. MALZEME VE METOD

Bu çalışmada, ZA alaşımlarının (ZA-8, ZA-12 ve ZA-27) toz metalurjisi yöntemi ile üretimi, karakterizasyonu, aşınma özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır.

6.1. Deneysel Malzeme

Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilen ZA alaşımları, Gazi Üniversitesi Kimya Mühendisliği laboratuvarlarında yapılmıştır. Bu çalışmada kullanılan farklı ZA alaşımlarının kimyasal bileşimleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. Çizelgede verilen % oranları ağırlıkça olup, mekanik alaşımlama için elemental toz şeklinde ilave edilmiştir. Mekanik alaşımlama yöntemi ile üretilmiş olan bu ZA alaşımları, saf olarak ağırlıkları tartılarak hazırlanmıştır.

Çizelge 6.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan ZA alaşımlarının kimyasal bileşimi

Kimyasal bileşim (ağırlıkça %)			
Alaşım	Al	Cu	Zn
ZA-8	8,4	1	90,6
ZA-12	11	0,87	88,13
ZA-27	27,5	2,2	70,3

6.2. Deneysel Yöntem

6.2.1. Karışım toz hazırlama işlemleri

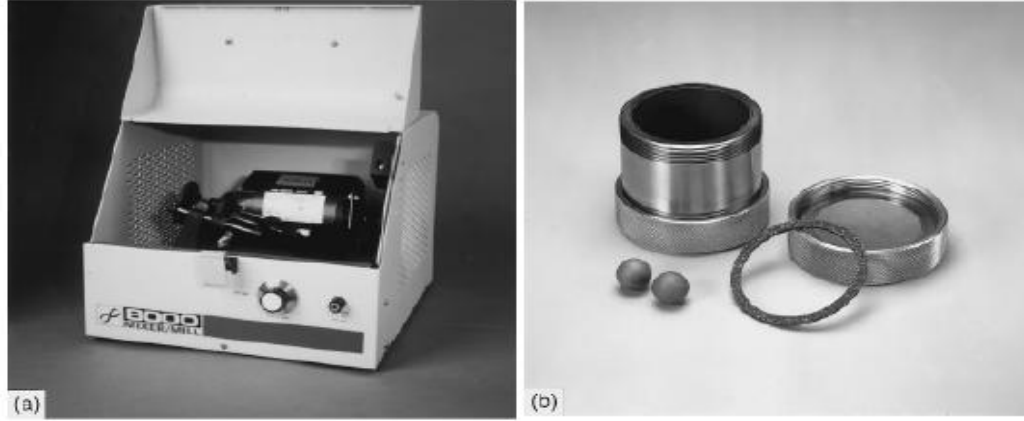
Mekanik alaşımlama için ZA alaşımlarının tozların saf olarak ağırlıkları tartılarak yapılmıştır. Toz tartımı işlemleri, Gazi Üniversitesi, Teknik Eğitim Fakültesi,

Malzeme laboratuvarındaki Precisa XB200h marka 1/10000 hassasiyetteki elektronik terazide gerçekleştirilmiştir.

6.2.2. Mekanik alaşımlama cihazının optimizasyonu

MA işlemi, Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği bölümü laboratuvarlarında bulunan SPEX tipi MA cihazında yapılmıştır. Çalışmalarda kullanılan SPEX cihazının şematik görünümü Şekil 6,1’de gösterilmiştir. Cihazda yapılan tüm çalışmalarda öncelikli olarak tüm parametreler (atmosfer, bilya-toz oranı, işlem kontrol kimyasalı, kabın doluluk oranı, öğütme hızı, öğütme süresi, sıcaklık) ayrı ayrı ele alınarak deney için en uygun parametreler yapılan ön çalışmalarla belirlenmiştir.

MA işleminde hazne içerisinde optimum doluluk oranı kullanılarak alaşımlama işlemini daha az bir sürede gerçekleştirebilmektedir. Toz bilya etkileşiminde daha hızlı bir alaşımlama oluşabilmesi için çalışmada bilya-toz oranı 10:1 oranında kullanılmıştır.



Resim 6.1. SPEX tipi karıştırıcı (a) SPEX 800 tipi değirmen, (b) SPEX’e ait öğütme kabı, kapak, bilya ve conta [72].

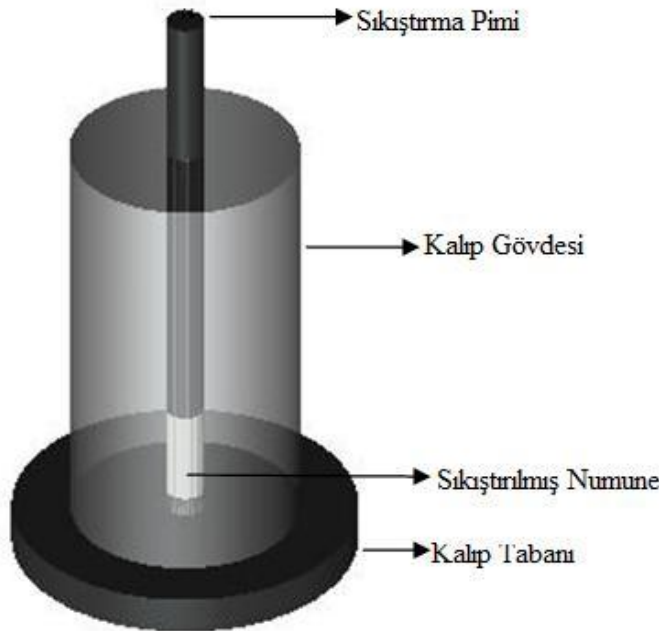
MA işleminde kullanılacak sürenin belirlenmesi için ZA-8 alaşımı için 1 saatten en fazla 10 saate kadar, ZA-12 alaşımı için 1 saatten en fazla 9 saate kadar ve son olarak ZA-27 alaşımı için 1 saatten en fazla 8 saate kadar alaşımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Süre belirlenirken cihazın çalışma performansı ve tozların tane

boyutları göz önüne alınmıştır. Bu sürelerden daha fazla çalışma sürelerinde cihazda bazı problemlerle karşılaşmıştır.

6.2.3. Mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının preslenmesi

Bu çalışmada MA yapılmış ZA alaşım tozları sıcak olarak 625 MPa basınçta preslenmiştir. Sıcak presleme işlemi Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme Laboratuvarlarında bulunan 160 tonluk ‘Hidrolik San’ marka preste yapılmıştır.

Tozlarımızın soğuk preslenmesi işlemlerinde 12 mm iç çapında 40 mm dış çapında ve 120 mm yüksekliğinde takım çeliğinden yapılarak sertleştirilmiş metal zımba kullanılmıştır. Yağlayıcı olarak (%1 çinko stearat) ilave edilen tozlar metal kalıp içerisine konularak ön şekillendirildikten sonra (320°C sıcaklıkta) fırın içerisinde 2 saat bekledikten sonra sıcak olarak preslenmiştir.



Şekil 6.1. ZA alaşımlarının preslenmesinde kullanılan metal kalıp

6.2.4. Sinterleme İşlemleri

Sıcak preslenen numuneler yine Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi Malzeme laboratuvarında bulunan ve 1600 °C sıcaklık kapasiteli Protherm marka fırında yapılmıştır (Şekil 6.3). Sinterleme işlemleri ZA alaşımları yine 320°C de 10 °C/dak ısıtma hızında ve bu sıcaklıkta 2 saat bekletilerek yine fırın ortamında soğutulularak yapılmıştır.



Şekil 6.2. Sinter ve yaşlandırma ısıtma işlemi yapılan fırın

6.3. Metalografik Çalışmalar

Metalografik işlemler için numunelere, klasik zımparalama ve polisaj işlemleri uygulanmıştır. Bu işlemler G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalı laboratuvarında bulunan PRESİ MECAPOL P 262 model polisaj cihazında

yapılmıştır. Daha sonra numuneler %10 Nital dağlayıcısı kullanılarak dağlanmış ve mikroyapıları taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile belirlenmiştir. Ayrıca SEM çalışmaları MA işlemleri sonrası toz morfolojisini belirlemede ve aşınma sonrası numunelerin aşınma yüzey durumunu incelemek amacıyla da kullanılmıştır. Bunun için G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü Malzeme Anabilim Dalı laboratuvarında bulunan ‘ JEOL JSM–6060 ‘ tarama elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.

6.4. Yoğunluk Ölçümleri

Sıcak presleme sonrasında elde edilen ZA alaşımlarının yoğunluk ölçümleri, Arşimet prensibine göre çalışan, hassasiyeti 0,1 mg olan dijital terazide ve mikrometre ile matematiksel hesaplamalarla yapılmıştır. İki ölçüm sonucundaki değerlerde farklılıklar fazla olmadığından dolayı ölçümler mikrometre ile yapılmıştır. Ölçümler, G.Ü.T.E.F. Metal Eğitimi Bölümü laboratuvarlarında yapılmıştır.

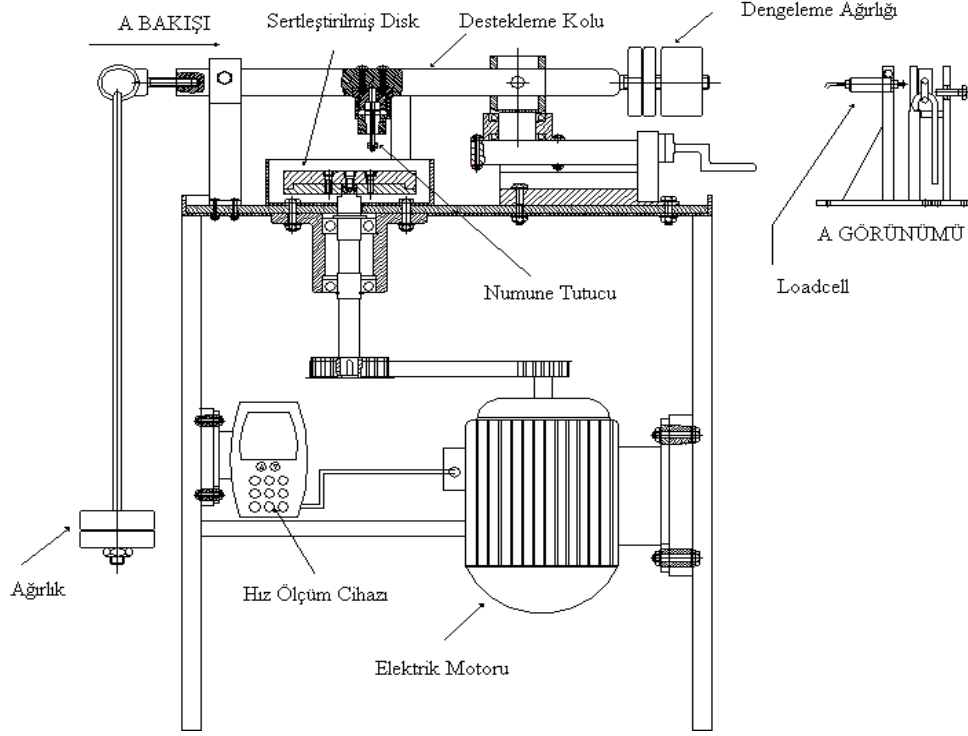
6.5. Aşınma İşlemleri

Aşınma deneylerinde kullanılan pin-on-disk tipi standart deney sisteminin görüntüsü şematik olarak Şekil 6.4 ‘de verilmiştir. Bu cihaz her türlü yük, kayma hızı ve farklı devirlerde çalışabilme kabiliyetine sahiptir. Yapılan bu deney cihazında aynı kayma hızında ve değişik yükleme şartlarında numuneler test edilir.

Deney aparatının başlıca önemli parçaları şunlardır; 1,5W’ lık 3 faz AC motor, hız kontrol cihazı, düşey dönel hareketi sağlayan sertleştirilmiş disk, destekleme kolu, numune tutma mekanizması, yük hücresi (ESİT STCS 50 kg Cs Loadcell) tablo dengeleme parçası ve ağırlıktır. Şekil 6.4’de görüldüğü gibi numune ile kayış kaskak sistemi 1/3 oranında çalışacak döner disk 1,5 KW’lık 1500 D/DK AC motor ile tahrik edilmektedir. Diskin salgısız dönebilmesi için motordan hareketi alan mil 2 noktadan rulman ile yataklanmıştır.

Numunelerin bağlandığı ve yükün asılacağı taşıyıcı kol tek noktadan yataklanmıştır. Numune bağlama aparatı kol üzerine monte edilmiştir. 2 ucundan ağırlık bulunan

taşıyıcı kolun bir tarafındaki ağırlık sisteme ağırlık asılmadan önce numune üzerine gelen yükü sıfırlamaktadır. Taşıyıcı kolun diğer ucuna asılan ağırlıklar ile de numune üzerine istenilen kuvvet uygulanabilmektedir.



Şekil 6.3. Aşınma test cihazının şematik görüntüsü

Taşıyıcı kolun bağlandığı yatak hem kendi eksenini etrafında dönebilmekte hem de ileri geri hareket edebilmektedir. Hareketli yatağın ileri geri hareketi ile disk üzerine gelen numune disk merkezinden uzaklaşıp yaklaşabilmektedir. Diski döndüren elektrik motoruna bağlanan hız kontrol cihazı motorun değişken devirlere ayarlanabilmesini sağlayabilmektedir.

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

Döner disk malzemesi Ç 4140 çeliğinden imal edilmiş ve 230 mm çapında 20 mm kalınlığındadır. Diskin sertlikleri 58 HRC'dir. Sertleştirme işleminden sonra disklere düzlem taşlama işlemi yapılmıştır.

Test cihazının devrinin ölçülmesi için ' COMPACT' MARKA (Advent optical tach meter) takometre (0–1000 dv/dk, 0-5 V çıkış marka) kullanılmıştır. Aşındırılan numuneler 1/10000 hassasiyetindeki ' PRESİCA ' marka terazide tartılarak ağırlık kayıpları belirlenmiştir.

Aşınma miktarının ölçümü ise, deney numunelerinin testten önceki ağırlığı ile testten sonraki ağırlığı arasındaki fark kütle kaybını ($\Delta m, mgr$), kütle kaybının yoğunluğu ($\rho, mgr/mm^3$) bölünmesi ile hacim kaybını (V, mm^3), hacim kaybının da alınan yola (t, km) bölünmesi ile hacimsel aşınma miktarı ($W, mm^3/km$) bulunur.

—

şeklinde yazılır.

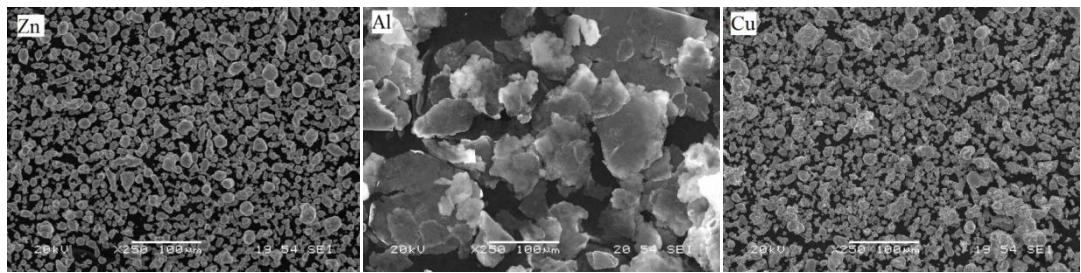
7. DENEYSEL BULGULAR VE DEĞERLENDİRME

7.1. MA İşlemleri

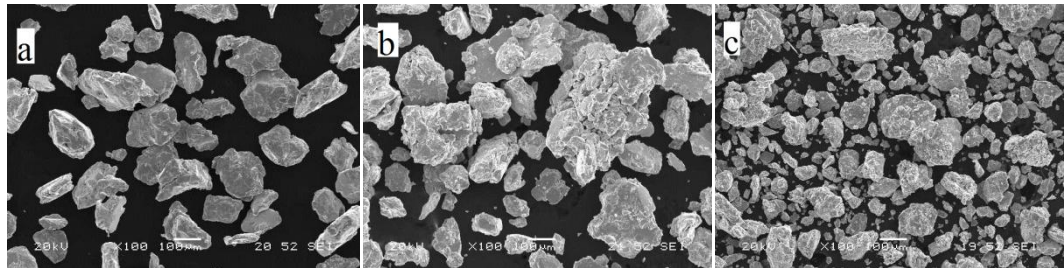
7.1.1. MA sonrası toz karakterizasyonu

MA deneyinde kullanılan tozların özellikleri Çizelge 6.1’de verilmiştir. ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımı olarak hazırlanmak istenen karışım tozların daha önce belirtildiği gibi 10:1 bilya toz oranı kullanılarak Spex de mekanik alaşımlama/öğütme işlemine tabi tutulmuştur. MA işlemi yapılmamış tozların SEM yapıları Resim 7.1’de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi Zn küresel, Al yapraksı ve Cu’da düzensiz şekillidir. MA işlemi en fazla 8 saat olarak gerçekleştirilmiştir. Her farklı süre için tozların özellikleri ayrı olarak incelenmiştir.

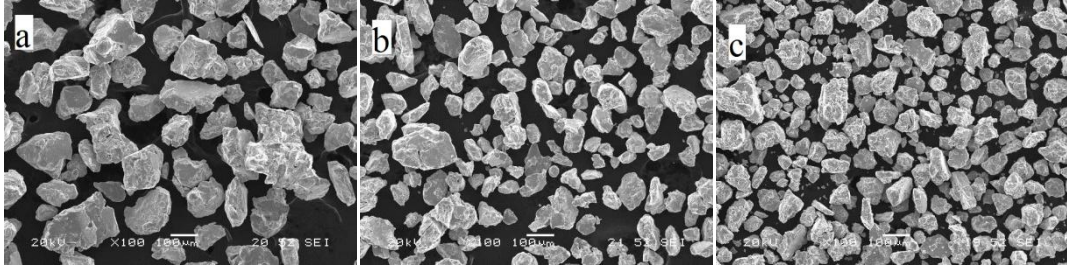
MA işleminde çinko stearat veya karbon gibi yağlayıcı kullanılmamıştır. Yağlayıcısız yapılan çalışmalarda tozlar, MA parametrelerine uygun olarak pulsulaşma olmadan kırılmaya başladığı görülmüştür. Kırılan tozlar daha sonra birleşerek farklı boyutlara sahip tozlar oluşturmıştır. Resim 7.2-7.9’da mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının toz morfolojisi gösterilmiştir.



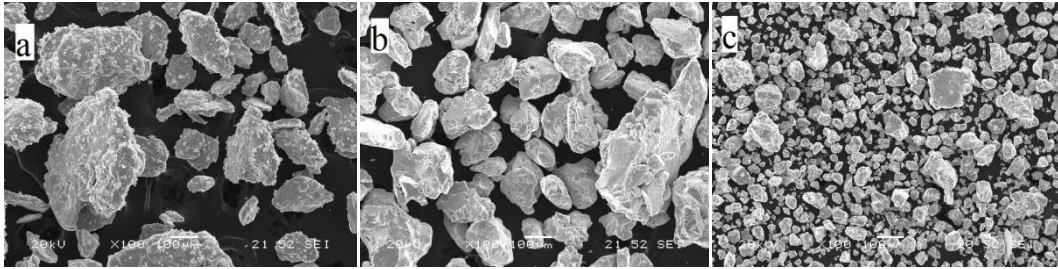
Resim 7.1. MA işlemi yapılmamış tozların SEM yapıları



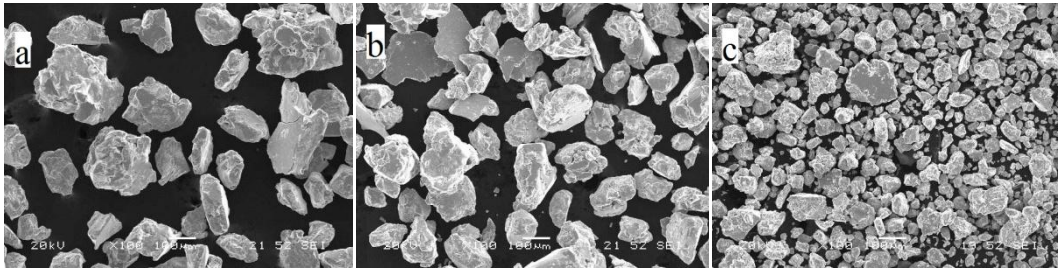
Resim 7.2. 1 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



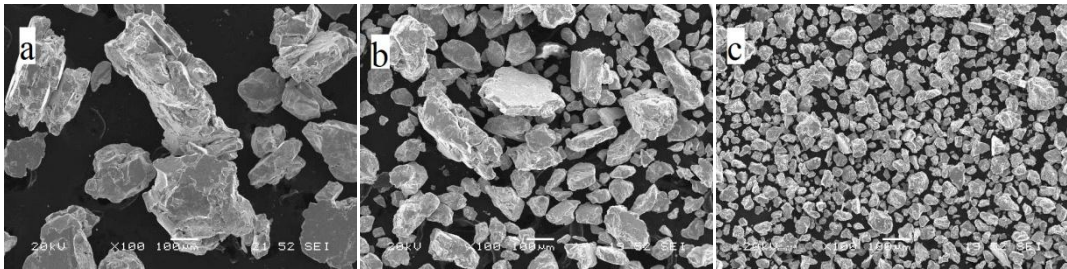
Resim 7.3. 2 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



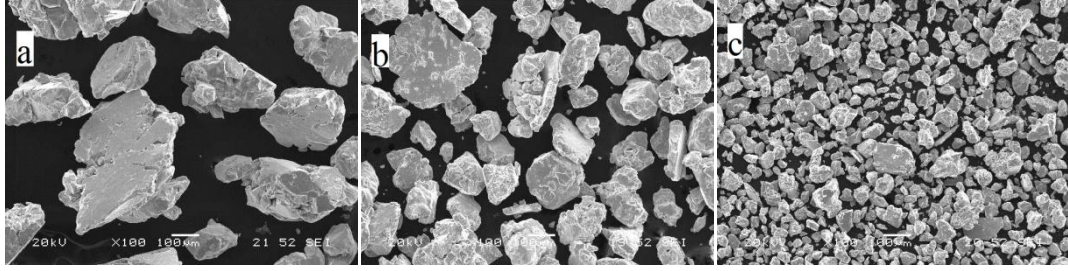
Resim 7.4. 3 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



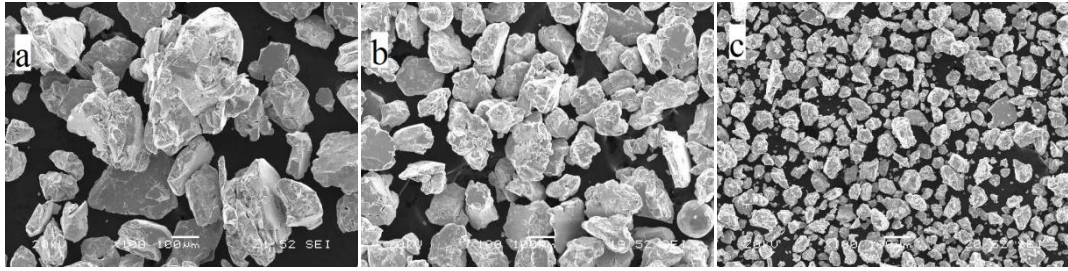
Resim 7.5. 4 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



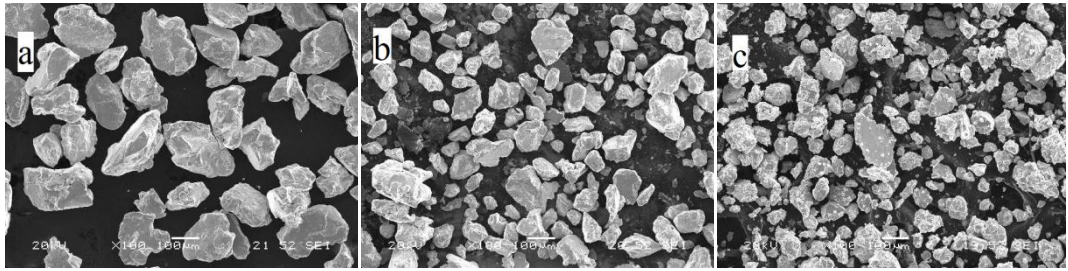
Resim 7.6. 5 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



Resim 7.7. 6 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



Resim 7.8. 7 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



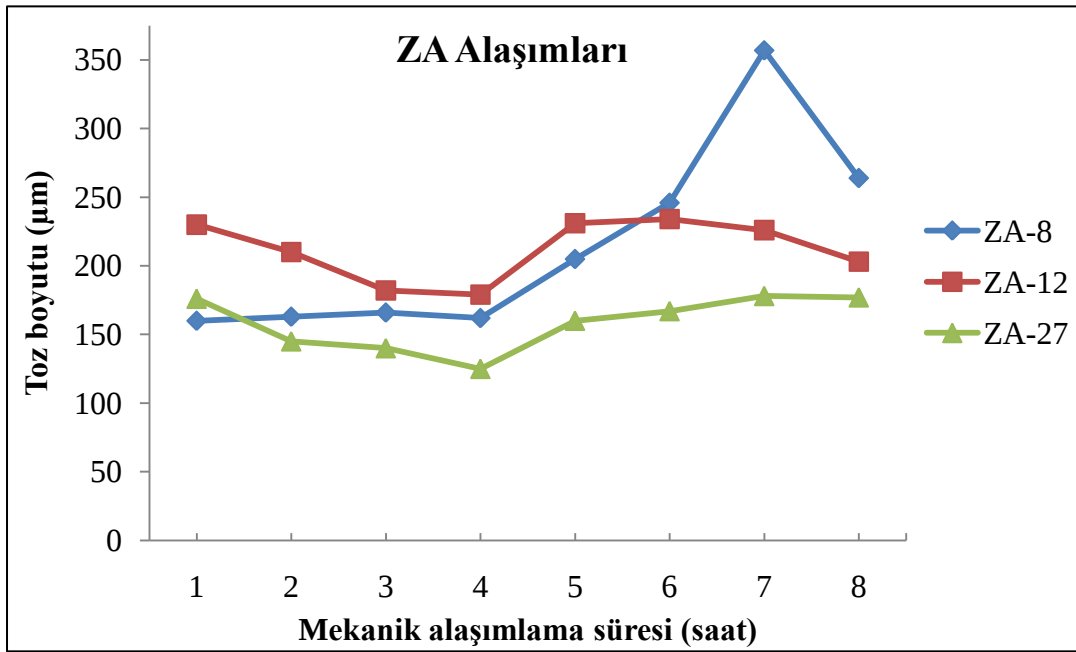
Resim 7.9. 8 saat mekanik alaşımlanmış ZA tozları a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27

MA'nın ilk evrelerinde, sünek tozların genel karakteristiği olan pulsulaşma, ilk toz boyutunun birkaç katına ulaşabilir. MA'da kullanılan Al'in sünek olması pulsulaşma eğilimini artırmıştır.

Yapılan MA işlemi esnasında çinko stearat kullanılmadığı takdirde tozlar önce MA işlemi gereği pulsulaşma gerçekleşirken, pulsulaşma meydana gelmeden tozlarda kırılma gerçekleştiği söylenebilir. Bununla birlikte, ZA alaşımlarında Zn'nun azalmasıyla tüm MA sürelerinde toz boyutunda azaldığı söylenebilir.

7.1.2 Toz boyut analizleri

MA işlemi uygulanmış tozların boyut analizleri MA süresine bağlı olarak incelenmiştir. Bu çalışmada toz boyutu belirlenmesinde SEM kullanılmıştır. Kullanılan SEM görüntüleri Ek-1'de verilmiştir. MA işlemi uygulanan ZA alaşımlarının mekanik alaşımlama sürelerine göre ortalama toz boyutları Şekil 7.1'de ki gibi kullanılmıştır.



Şekil 7.1. ZA alaşımlarının MA süresine göre ortalama toz tane boyutu grafiği

Şekil 7.1'de görüldüğü tüm ZA-8 alaşım tozlarında 1 saatten 7 saate kadar MA süresine kadar toz boyutlarının genellikle artma eğiliminde olduğu görülmektedir. 7 saatten sonra azalma eğilimine girmiştir. Ancak ZA-12 ve ZA-27 alaşımı tozlarının boyutları 4 saate kadar nispeten azalmış, bu saatten sonra yine nispeten artma eğilimine girmiştir. Burada dikkati çeken en önemli durum; MA işlemlerinde hem alaşımlama gerçekleştirilirken hem de alaşımlanan toz boyutlarında belli bir MA süresine bağlı olarak azalması gerekirken, bu çalışmadaki ZA alaşım tozlarında 8 saat MA işlemine kadar etkili bir azalma olmamıştır. Diğer taraftan 8 saatten sonraki çok uzun MA işlemleri, alaşım tozlarının Spex haznesine aşırı sıvanması nedeniyle gerçekleştirilememiştir.

Mekanik alaşımlamada, öğütme zamanı önemli parametrelerden biridir. Normalde bu zaman toz parçacıklarının kırılması ve soğuk kaynaklaşması arasında gerçekleşen bir katı hal alaşımlama durumunu gerçekleştireceği kadardır.

Gereken MA zamanı, kullanılan öğütücünün tipine, öğütme şiddetine, bilya toz oranına ve öğütme sıcaklığına kuvvetle bağlıdır. Bu MA zamanını, yukarıda belirtilen parametrelerin tümüne birden belirlemek zor olup, gerekenden fazla öğütme zamanı da tozlarda kirlenmelere ve istenmeyen yeni fazların oluşumuna neden olmaktadır [141].

Bu çalışmada, seçilen MA yönteminde BTO'nın uygun olmaması ve sıcaklığın kontrol edilememesi toz parçacık boyutlarının etkili bir şekilde düşmemesine yol açmış olabilir. Şekil 7.1 incelendiğinde ZA alaşımlarında Zn oranı düşerken ve Al oranı artarken toz parçacık boyutlarının kısmen daha inceltiltiği söylenebilir.

7.2. ZA Alaşımlarının Sinterleme Sonrası Mikroyapı Karakterizasyonu

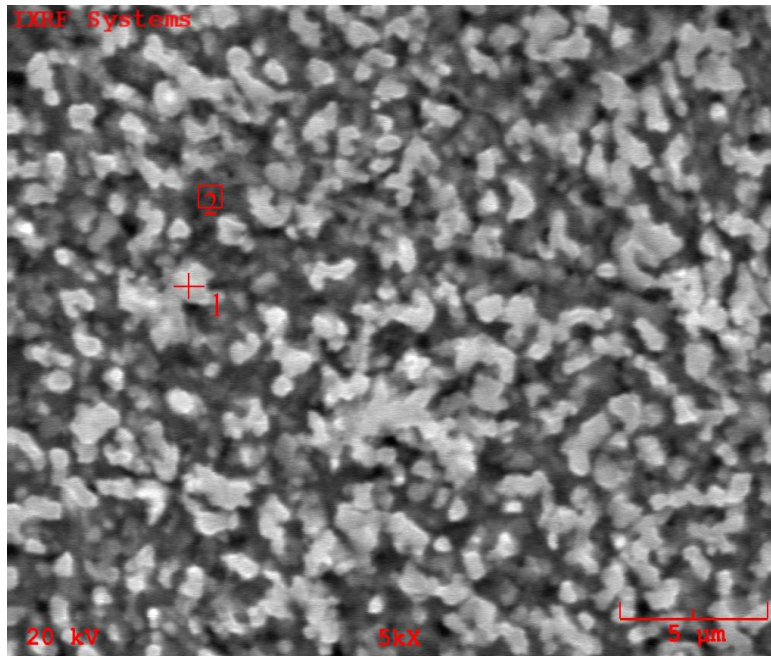
MA uygulanmış tozlara ve presleme sonrası numunelerde EDS analiz yöntemiyle Zn, Cu ve Al'un dağılımları belirlenmeye çalışılmıştır. MA işlem sonrasında, tozlarda bölgesel ve noktasal analizler yapılarak alaşımlamanın olup olmadığı araştırılmıştır. Yapılan EDS çalışmalarında belli bölgelerde element dağılımı ve oranları incelendi. Yapılan çalışmalarda ZA alaşımlarının genel olarak alüminyum (Al), bakır (Cu) ve çinko (Zn) elementleri bölgesel olarak bulunduğu bölgeler araştırıldı.

MA işlemine tabi tutulan ZA alaşımlarının toz boyut analizlerine bakıldığı zaman, 4 saatten sonra toz boyutlarında artma tespit edildiğinden dolayı EDS çalışmaları tüm ZA alaşımlarında 4 saat MA yapılan numunelerden yapıldı. Diğer MA sürelerinin EDS sonuçları Ek-2, Ek-3 ve Ek-4'de verilmiştir.

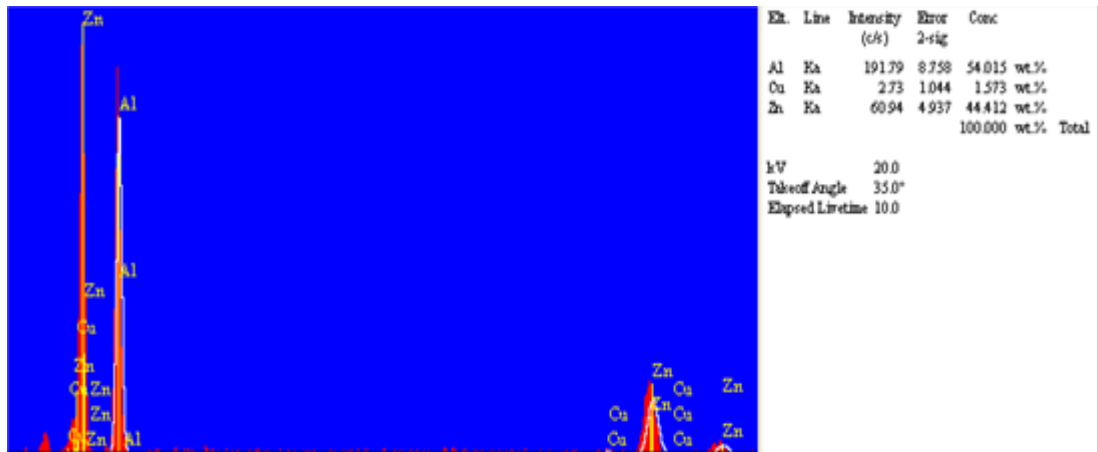
7.2.1. ZA-8 alaşımlarının EDS sonuçları

Resim 7.10'da, 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımlarının SEM görüntüsü üzerinde belli bölgelerde analizler yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde SEM görüntüsünde

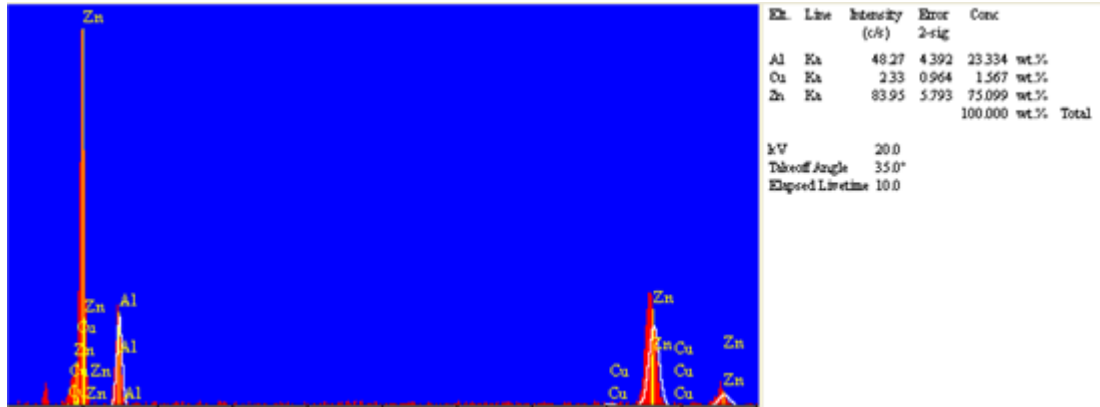
1. noktada EDS sonuçlarına göre beyaz bölgelerin Al'ca zengin bölge olduğu anlaşılmaktadır (Resim 7.11). SEM üzerindeki 2. Noktanın EDS sonuçlarına göre ana matris elementi olan Zn'ca zengin olduğu görülmektedir (Resim 7.12). SEM üzerinden alınan 1. ve 2. noktanın EDS sonuçlarına bakıldığında Cu'da kimyasal olarak bir farklılık görülmemektedir. Genel olarak alınan EDS sonuçları incelendiğinde, ZA-8 alaşımının kimyasal kompozisyonu göz önüne alınırsa (Çizelge 6.1) Al oranı yüksek bulunmuştur (Resim 7.13).



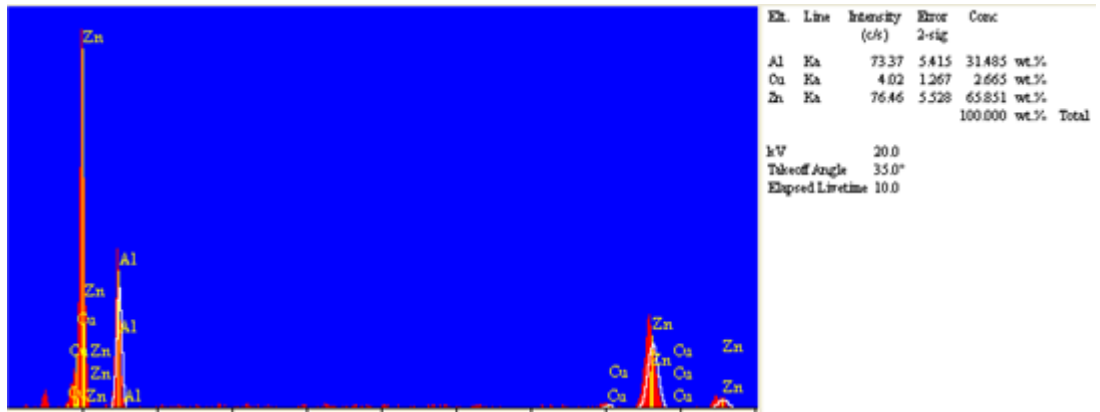
Resim 7.10. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımının SEM görüntüsü



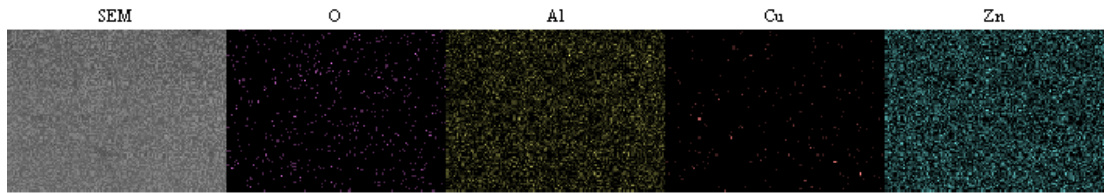
Resim 7.11. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımının SEM görüntüsündeki 1. noktanın EDS analizi



Resim 7.12. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımının SEM görüntüsündeki 2. noktanın EDS analizi



Resim 7.13. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımının SEM görüntüsündeki genel EDS analizi



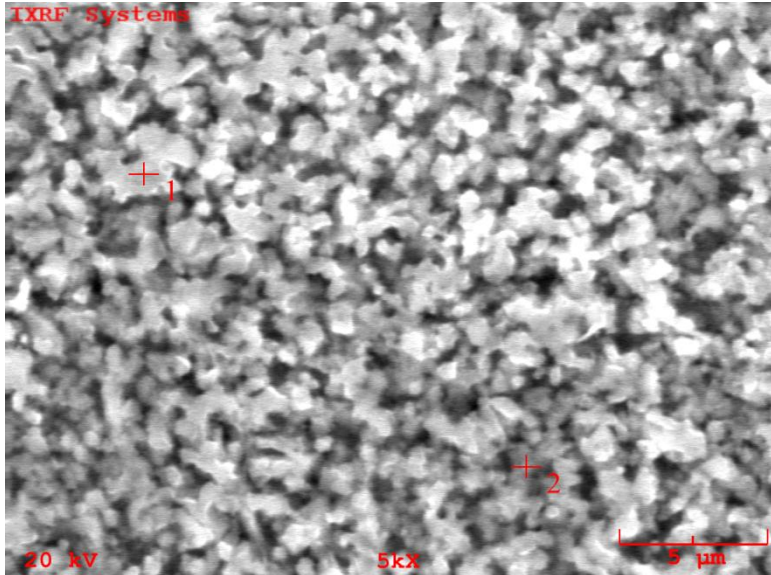
Resim 7.14. 4 saat MA yapılmış ZA-8 alaşımının Element Dağılım Haritası

EDS incelemeleri sadece Al, Cu ve Zn elementleri seçilerek yapılmıştır. Zn ana matris elementi olup, Cu ve Al yapıdaki dağılımları analiz edilmiştir. EDS resimleri incelendiğinde beyaz bölgelerin Al'ce zengin olduğu görülmektedir. Daha koyu renkli bölgeler ise ana matris elementi Zn olarak görülmektedir. Cu ise element dağılım haritasına göre mikroyapıda hem Al'da ve Zn'da homojen bir şekilde dağıldığı görülmektedir (Resim 7.14).

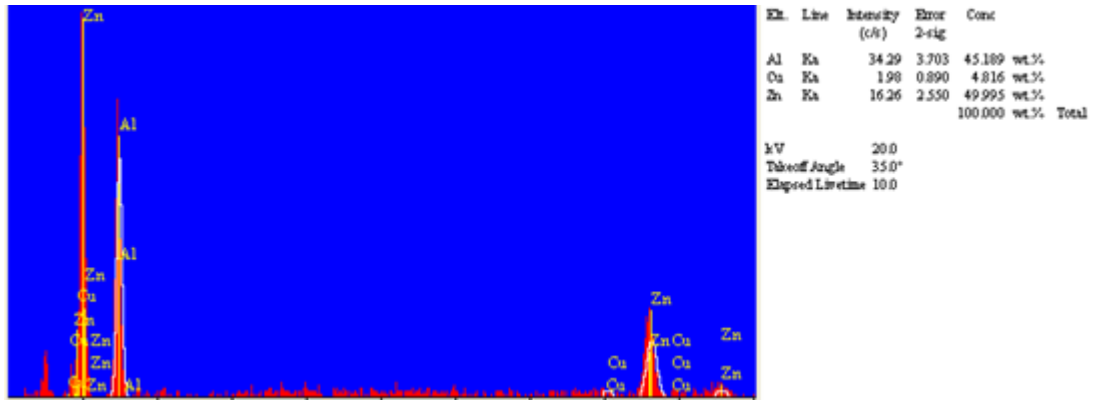
Farklı MA sürelerine sahip ZA-8 alaşımının EDS analizlerine bakıldığında (Ek. 2), yine beyaz bölgelerin Al, koyu bölgelerin ise ana matris elementi olan Zn olarak görülmektedir. Bu numunelerde de Cu, yapıya homojen bir şekilde dağıldığı ve Al'un oksitlendiği görülmektedir. Farklı MA sürelerine sahip ZA-8 alaşımları arasında EDS ve Element dağılım haritalaması olarak fazla bir fark görülmemiştir.

7.2.2. ZA-12 alaşımının EDS sonuçları

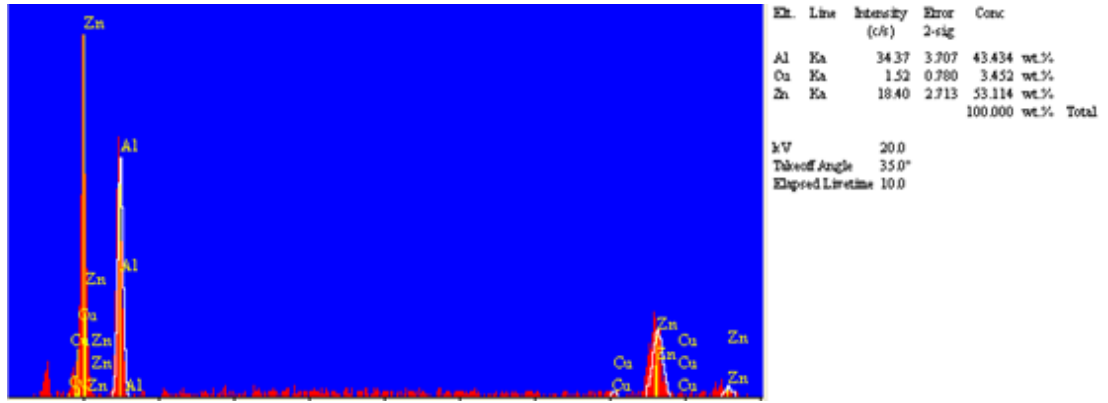
Resim 7.15' de, 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımının SEM görüntüsü üzerinde belli bölgelerde EDS analizleri yapılmıştır. SEM üzerindeki 1. noktanın EDS sonuçlarına göre yine beyaz bölgelerde Al'ca zengin bölgeye rastlanmıştır (Resim 7.16). SEM üzerindeki 2.noktanın EDS sonuçlarına göre ana matris elementi olan Zn'ca zengin olduğu anlaşılmaktadır (Resim 7.17). SEM üzerinden alınan 1. ve 2. noktanın EDS sonuçlarına bakıldığında Cu'da kimyasal olarak bir farklılık görülmektedir. ZA-12 alaşımının kimyasal kompozisyonu göz önüne alınırsa (Çizelge 6.1), Cu'ın yüksek olduğu görülmektedir. Resim 7.18'de ki genel EDS sonucuna göre Cu ve Al oranının yüksek, Zn'un düşük olduğu anlaşılmaktadır.



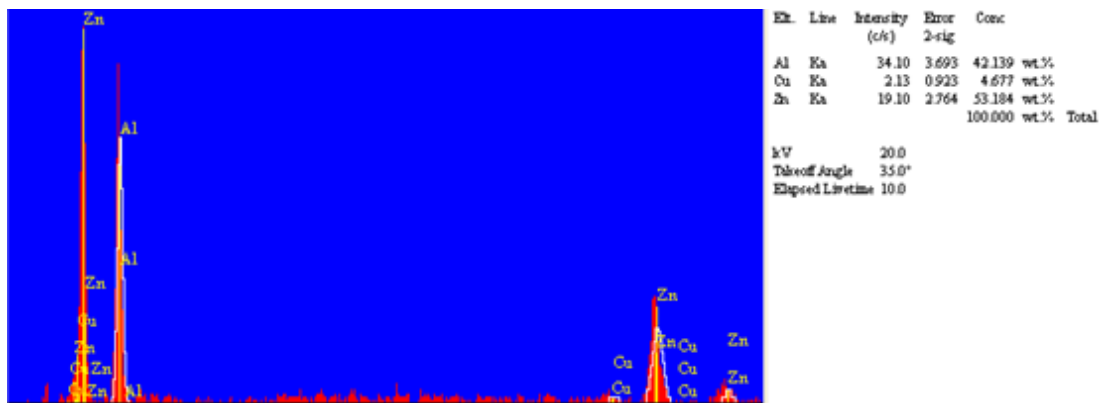
Resim 7.15. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımının SEM görüntüsü



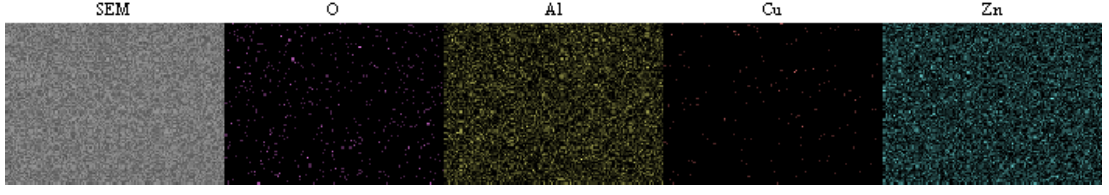
Resim 7.16. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaışımının SEM görüntüsündeki 1. noktanın EDS analizi



Resim 7.17. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaışımının SEM görüntüsündeki 2. noktanın EDS analizi



Resim 7.18. 4 saat MA yapılmış ZA-12 alaışımının SEM görüntüsündeki genel EDS analizi



Resim 7.19. 4 saat MA'nmiş ZA-12 alaşımlarının Element Dağılım Haritası

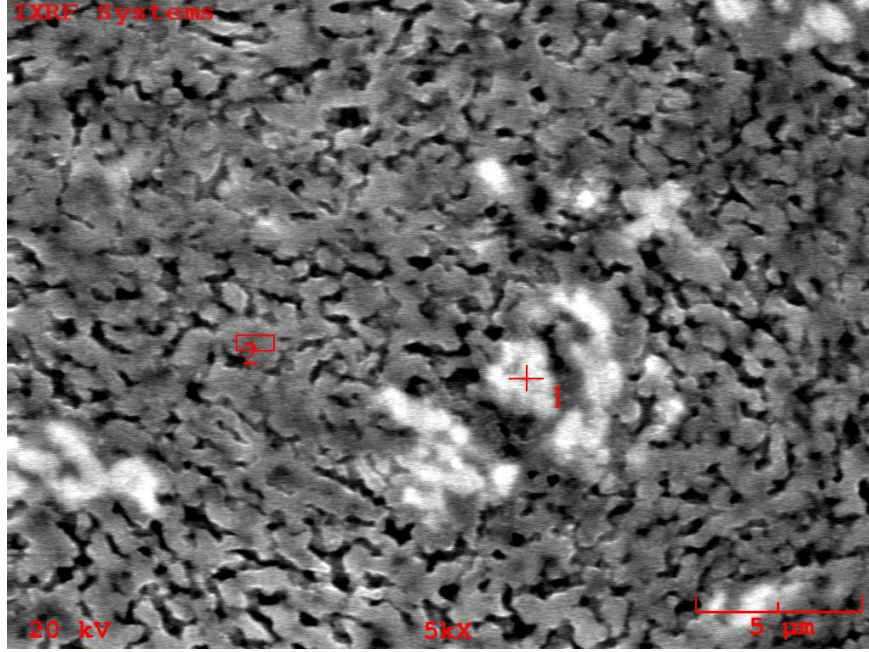
ZA-12 alaşımlarının EDS ve Element dağılım haritalaması sonuçlarına bakıldığında, ZA-8 alaşımlarına göre beklendiği gibi Al ve Cu miktarlarının daha fazla olduğu görülmektedir. Bu iki alaşımların hazırlanan kimyasal kompozisyonlarına göre (Çizelge 6.1), ZA-12 alaşımlarındaki Al oranı ZA-8 alaşımlarındaki Al oranından yüksek iken, Cu oranı düşüktür. Yapılan MA sonrasında ZA-12 alaşımlarında hem Al hem de Cu oranı ZA-8 alaşımlarına göre daha yüksek çıkmıştır.

Farklı MA sürelerine sahip ZA-12 alaşımlarının EDS analizlerine bakıldığında (Ek. 3), beyaz bölgelerin Al, koyu bölgelerin ise ana matris elementi olan Zn olarak görülmektedir. Element dağılım haritalamasına bakıldığında ise Cu'nun yapıya homojen olarak dağıldığı ve Al'un oksitlendiği görülmektedir (Resim 7.19). Farklı MA sürelerine sahip ZA-12 alaşımları arasında EDS ve Element dağılım haritalaması olarak fazla bir fark görülmemektedir.

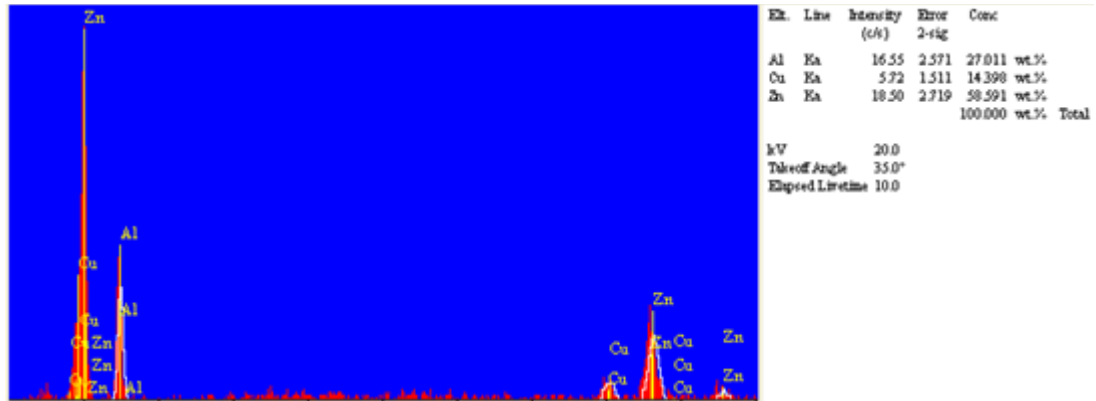
7.2.3. ZA-27 alaşımlarının EDS sonuçları

Resim 7.20'de görüldüğü gibi, 4 saat MA yapılmış ZA-27 alaşımlarının SEM görüntüsü üzerinde yine belli bölgelerinde EDS analizleri yapılmıştır. Analiz sonuçları incelendiğinde SEM üzerindeki 1. noktanın EDS sonuçlarına göre beyaz bölgelerde ana matris elementi olan Zn ve Cu'ca zengin bölgeye rastlanmıştır (Resim 7.21). SEM üzerindeki 2. noktanın EDS sonuçlarına bakıldığında Al'ca zengin bölgeler görülmüştür (Resim 7.22). SEM üzerinden alınan 1. ve 2. noktanın EDS sonuçlarına bakıldığında Cu' da kimyasal olarak bir farklılık görülmektedir. Resim 7.20'de ki 1. Noktanın EDS sonuçlarına bakıldığında Cu'nun beyaz bölgelerde biriktiğini görülürken, 2. Noktanın EDS sonuçlarına göre Cu oranının beklenen düzeyde olduğu görülmektedir. Genel olarak alınan EDS sonuçları incelendiğinde, ZA-27

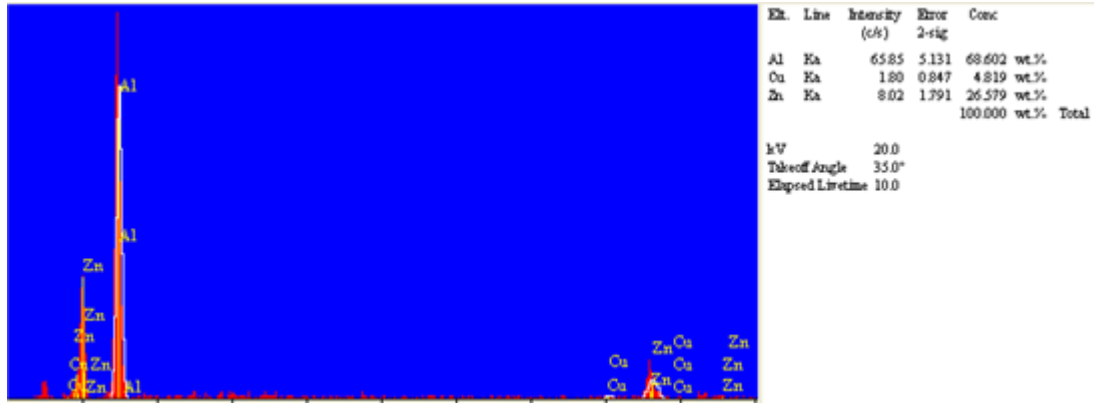
alaşımının kimyasal kompozisyonuna göre olduğu görülmektedir (Çizelge 6.1). Al beklenilenden çok fazla, ana matris elementi Zn ise çok az çıkmıştır (Resim 7.23).



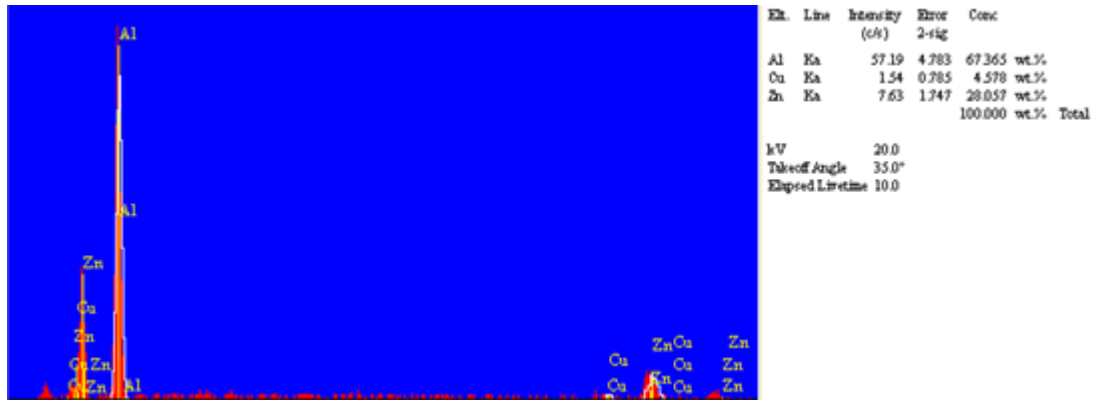
Resim 7.20. 4 saat MA yapılmış ZA-27 alaşımlarının SEM görüntüsü



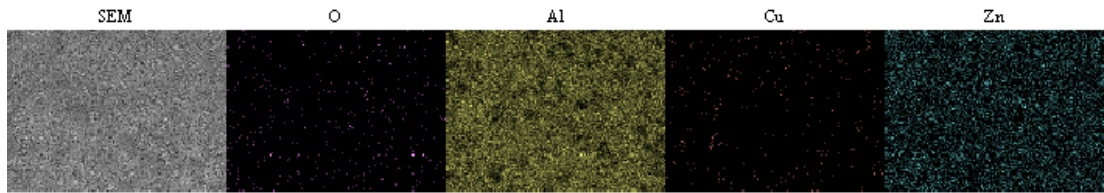
Resim 7.21. 4 saat MA yapılmış ZA-27 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 1. noktanın EDS analizi



Resim 7.22. 4 saat MA yapılmış ZA-27 alaşımlarının SEM görüntüsündeki 2. noktanın EDS analizi



Resim 7.23. 4 saat MA yapılmış ZA-27 alaşımlarının SEM görüntüsündeki genel EDS analizi



Resim 7.24. 4 saat MA yapılmış ZA-27 alaşımlarının Element Dağılım Haritası

ZA-27 alaşımı, ZA-8 ve ZA-12 alaşımları ile karşılaştırıldığında; ZA-27 alaşımlarının EDS ve Element dağılım haritalaması sonuçlarına göre, ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarına nazaran Al miktarında daha fazla olduğu, ana matris elementi olan Zn'nin daha az olduğu görülmektedir. Alaşımların kimyasal kompozisyonlarına bakıldığında (Çizelge 6.1), her üç alaşımda da ana matris elementi olan Zn'nin fazla çıkması gerekli iken, en az oranlarda ZA-27 alaşımlarında çıkmaktadır. ZA-27 alaşımlarında Cu oranı, ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarına göre fazladır (Çizelge 6.1). Element dağılım

haritalamasına bakıldığında, Cu'ın yapıya homojen dağıldığı ve Al'un oksitlendiği görülmektedir (Resim 7.24).

Farklı MA sürelerine sahip diğer ZA-27 alaşımının EDS ve Element dağılım haritalaması sonuçlarına göre (Ek. 4), ana matris elementi olan Zn olması gereken kimyasal kompozisyonda olmadığı görülmektedir. Element dağılım haritalamasına göre Cu'ın yapıya homojen dağıldığı görülmektedir (Ek. 4). Farklı MA sürelerine sahip ZA-27 alaşımları arasında EDS ve Element dağılım haritalaması olarak fazla bir fark bulunmamaktadır.

7.3. Yoğunluk

Yoğunluk ölçümleri MA işleminden ve sinterleme işleminden sonra yapılmıştır. Yoğunluk ölçümleri hem Arşimet yöntemi hem de ağırlık/hacim olarak yapılmıştır. Yapılan her iki ölçüm de herhangi bir fark olmadığından Arşimet yöntemi kullanılmamıştır.

MA işleminden sonraki ZA alaşımları sıcak presleme sonrası yoğunlukları ve sinterleme işlemi sonrası yoğunlukları karşılaştırılmıştır. Çizelge 7.1'de görüldüğü gibi presleme sonrası numunelerin yoğunlukları ile Çizelge 7.2'de görüldüğü gibi sinterleme sonrası numunelerin yoğunlukları verilmiştir.

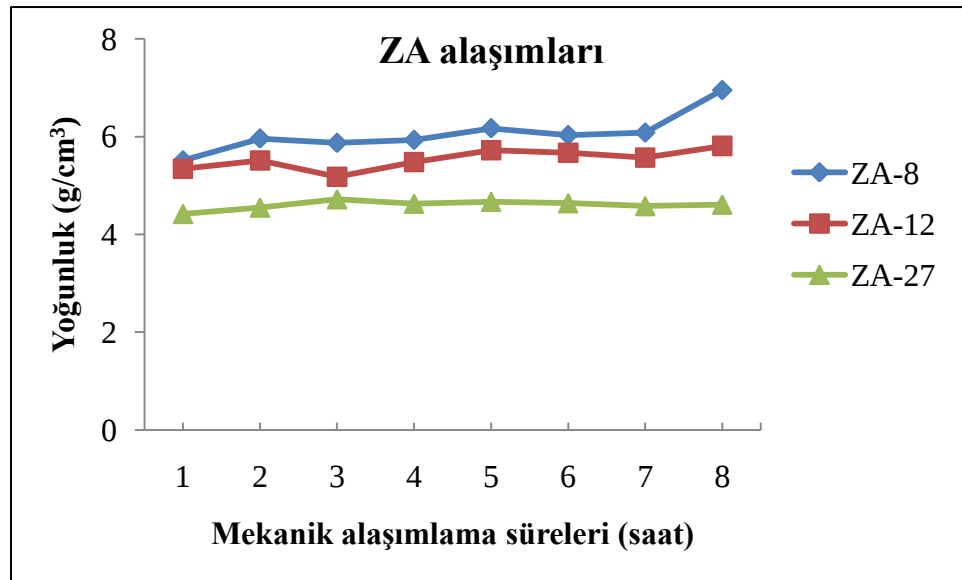
Aynı zamanda hem ZA alaşımlarının kendi aralarında hem de presleme sonrası ve sinterleme sonrası yoğunluk değişimlerini görebilmek için, presleme ve sinterleme sonrası yoğunluk değişimi sırasıyla Şekil 7.2 ve Şekil 7.3'de verilmiştir.

Çizelge 7.1. ZA alaşımlarının sıcak presleme sonrası yoğunlukları

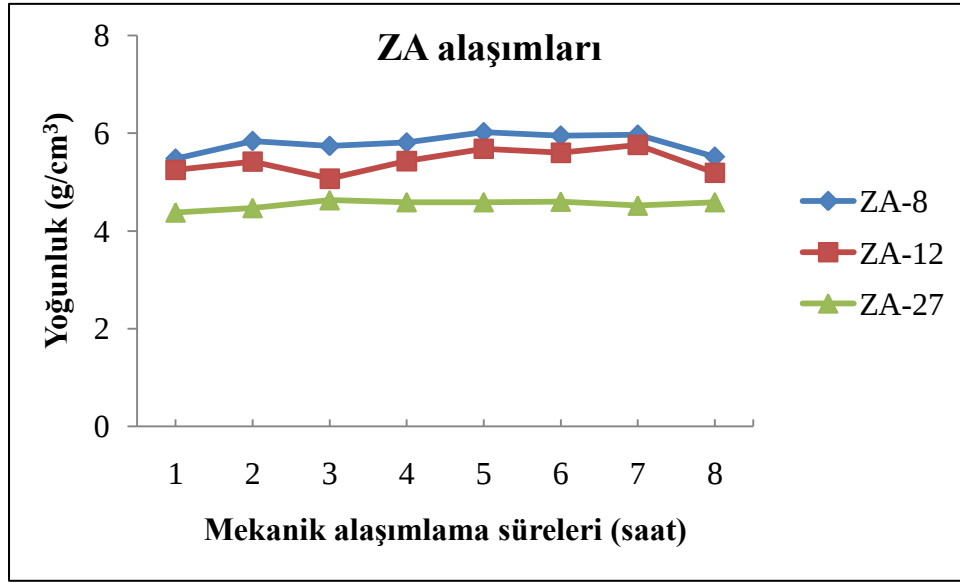
Mekanik alaşımlama süresi (saat)	Yoğunluk (g/cm ³)		
	ZA-8	ZA-12	ZA-27
1	5,51	5,34	4,42
2	5,96	5,51	4,55
3	5,87	5,18	4,72
4	5,93	5,48	4,63
5	6,17	5,72	4,67
6	6,03	5,67	4,64
7	6,08	5,57	4,58
8	6,95	5,81	4,61

Çizelge 7.2. ZA alaşımlarının sinterleme sonrası yoğunlukları

Mekanik alaşımlama süresi (saat)	Yoğunluk (g/cm ³)		
	ZA-8	ZA-12	ZA-27
1	5,48	5,25	4,38
2	5,84	5,42	4,47
3	5,74	5,07	4,63
4	5,81	5,43	4,59
5	6,02	5,68	4,59
6	5,95	5,60	4,60
7	5,97	5,76	4,52
8	5,52	5,19	4,59



Şekil 7.2. MA işlemi sonrası preslenmiş ZA alaşımlarının yoğunluk grafiği



Şekil 7.3. Sinterleme işlemi sonrası ZA alaşımlarının yoğunluk grafiği

En yüksek yoğunluk ZA-8 alaşımında gerçekleşirken, en az yoğunluk ZA-27 alaşımından sağlanmıştır. Bu ZA alaşımlarında bileşenlerinden en az özgül ağırlığa sahip Al'un miktarının artmasının bir sonucudur. MA sonrası preslenmiş ZA alaşımlarının yoğunlukları, sinterleme sonrası yoğunluklardan biraz fazladır. Bu durumun sinterleme sonrası alaşımlarda hacimsel genişmeden kaynaklanan bir durumdur. Bazı alaşım sistemlerinde sinterleme işlemi ile hacimsel daralma olduğu gibi, bu çalışmada ki gibi bazı alaşım sistemlerinde hacimsel genişleme olabilir [142].

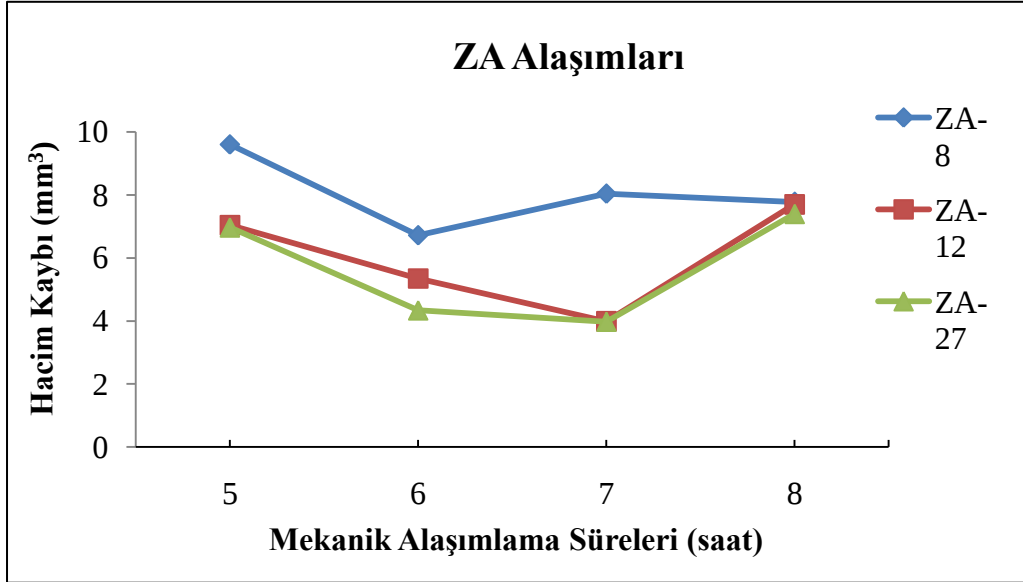
7.4. Kuru Sürtünme Aşınma Davranışları

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemiyle hazırlanan üç farklı bileşime sahip ZA alaşımlarının kuru sürtünmeli aşınma davranışları incelendi. Aşınma işleminde, numuneler pin-on disk üzerinde kayma hızı 1m/sn olacak şekilde, 10N yük ve toplam 600 metre kaydırma mesafesi seçilmiştir. Aşınma oranları tüm numunelerde hacim kaybı olarak belirlenmiştir.

Şekil 7.4'de tüm alaşımların 600 m kaydırma sonunda hacim kayıpları MA sürelerine bağlı olarak verilmiştir. Kaymalı yatakların ömrü mil ile yatak arasında

meydana gelen boşluk miktarı ile belirlendiğinden, hacim kaybı ağırlık kaybından daha önemli bir aşınma parametresi sayılmaktadır. Bu nedenle, ölçülen ağırlık kayıpları alaşımların yoğunluklarına bölünerek aşınma ile ortaya çıkan hacim kayıpları belirlenmiştir.

Uygulanan yük ve aşınma mesafesi sabit tutulmuştur. Şekil 7.4’de görüldüğü üzere MA sürelerine göre aşınma miktarlarında sürekli bir artış ya da azalış söz konusu değildir. En az aşınma ZA-27 alaşımında gerçekleşirken, en fazla aşınma ZA-8 alaşımında meydana gelmiştir.

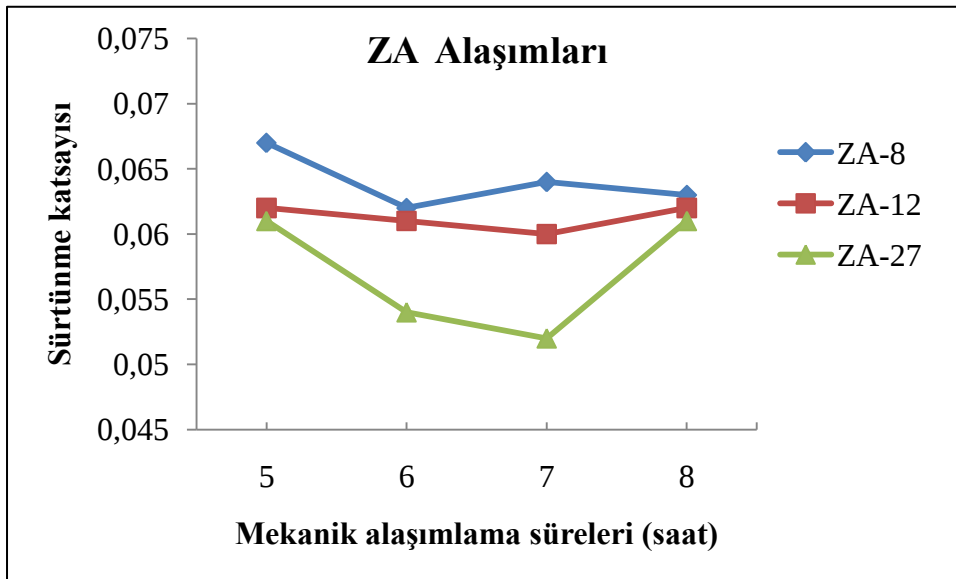


Şekil 7.4. ZA alaşımlarının mekanik alaşımlama sürelerine göre aşınma oranları

Şekil 7.4’de görüldüğü üzere tüm ZA alaşımlarında aşınma oranı MA süresinin artmasıyla azalmış ancak, ZA-8 alaşımında 6. Saatten sonra ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarında 7. Saatten sonra aşınma oranları artış göstermiştir. Bu çalışmada MA yöntemiyle hazırlanan ZA alaşımlarında aşınma özelliklerinin alaşımların kimyasal bileşimiyle etkilendiği gibi MA süresi ile de önemli ölçüde etkilendiği belirgin bir şekilde ortaya çıkmıştır. Diğer taraftan, bir alaşımda aşınma özelliklerinin belirlenmesinde tribolojik etkileşimler oldukça karmaşık ve daha detaylı bir çalışma gerektirir. Ancak bu alaşımlarda sabit tribolojik parametre şartlarına göre değerlendirme ileride daha ayrıntılı bir şekilde tartışıldığı gibi alaşımların sürtünme katsayısı ve aşınan yüzeylerin morfolojisine göre yapılmıştır.

Öncelikle aşınma davranışları alaşım kendi arasında değerlendirildiğinde ZA-27 alaşımının en az oranda aşınma davranışı sergilemesi alaşımda bulunan Al oranının yüksek miktarda olmasına bağlanmaktadır. Çünkü Al gibi YMK metaller daha tok ve kırılması daha zor olmaktadır. Kuru sürtünmeli aşınma esnasında da dinamik sürtünme etkisinden yorularak ve/veya darbeli kırılarak kütle kaybı daha az olacaktır. Aşınma oranı daha fazla olan ZA-8 alaşımında da Zn oranının fazla olması neden olarak gösterilebilir. Çünkü Zn HSP kristal yapısından dolayı anizotropik özelliğe sahip olup YMK yapıya göre daha fazla ihtimalle hasara uğrayabilir. Tüm bu durumların tartışılabilmesi için sürtünme katsayılarının ve aşınma yüzeylerinin ayrıntılı olarak incelenmesi gerekir.

Şekil 7.5’de ZA alaşımlarının ortalama sürtünme katsayılarının değişen MA sürelerine göre değişimleri verilmiştir. Şekil 7.5’de görüldüğü üzere en az sürtünme katsayısı ZA-27 alaşımında iken, en fazla sürtünme katsayısı ZA-8 alaşımında gerçekleşmiştir. Ancak sürtünme katsayıları ile aşınma oranları ile doğrudan bir uyum vardır. Sürtünme katsayılarının, değişen MA sürelerine göre sürekli bir artış ya da azalış göstermemektedir. Çinko esaslı alaşımların aşınma direncinin artan Al oranı ile arttığı, aşınma katsayısının azaldığı belirlenmiştir [143].



Şekil 7.5. ZA alaşımlarının mekanik alaşımlama sürelerine göre sürtünme katsayıları

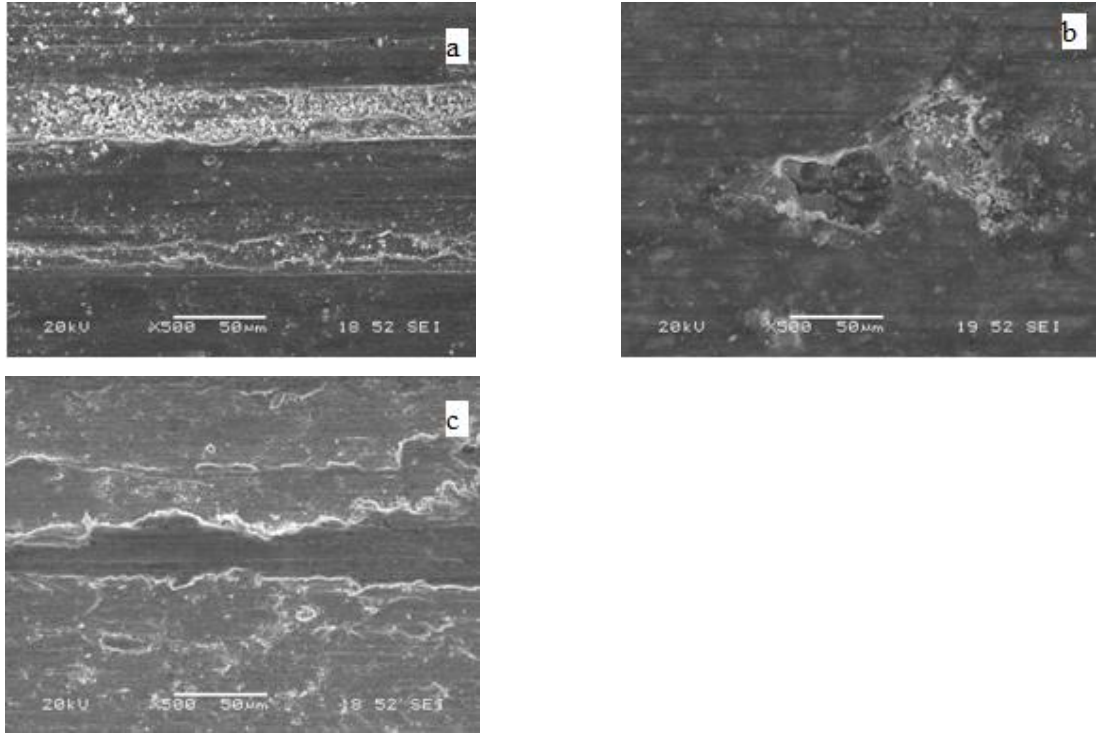
Şekil 7.5’de gösterilen sürtünme katsayıları her bir alaşımın 600 m aşınma mesafesi sonunda elde edilen ortalama değerleridir. Ancak MA parametrelerinin fazla olması tüm grafiklerinin ayrı ayrı tartışılması yerine özellikle aşınma yüzeylerinin incelenmesinde çarpıcı olan sürtünme mesafesine göre aşınma katsayılarının grafiğini tartışmak tribolojik özellikler bakımından daha yararlı olacaktır.

Çinko-Alüminyum esaslı alaşımlardan imal edilen kaymalı yataklar, yetersiz yağlama ve aşırı yükleme şartlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır. Kalay esaslı yatak malzemelerinin yağlanmış durumda ki ortalama sürtünme katsayıları 0,1 civarında iken, çinko-alüminyum esaslı alaşımların aynı durumdaki sürtünme katsayıları 0,04-0,07 değerleri arasında yer aldığı literatürden belirlenmiştir [144]. Bu çalışmada belirlenen aşınma katsayılarıyla da uyumlu olduğu görülmüştür.

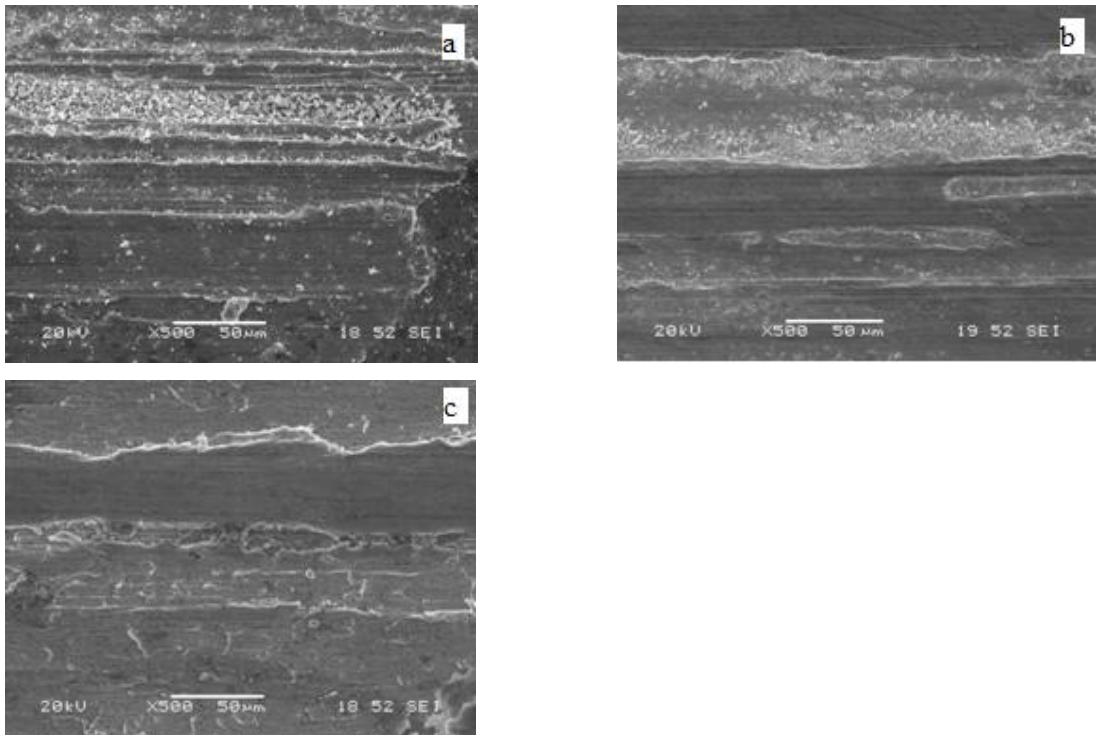
Çinko esaslı alaşımların üstün tribolojik özellikler sergilemesi bu alaşımların aşınma yüzeylerinde oluşan çinko ve alüminyum oksit tabakalarına dayandırılarak açıklanmaktadır [145-148]. Söz konusu alaşımların içyapıları sert ve yumuşak fazlardan oluşmaktadır. Bu alaşımdaki sert fazlar yük taşıma görevi yaparken, yumuşak fazlar katı yağlayıcı gibi davranarak kaymayı kolaylaştırmaktadır. Yani çinko esaslı alaşımlarda sert alüminyum oksit tabakası uygulanan yükü taşıırken, daha yumuşak olan çinko oksit tabakası özellikle sınır ve karışık yağlama durumlarında yağlayıcı görevi yapmaktadır. Bu nedenle, söz konusu alaşımlar yetersiz yağlama ve aşırı yükleme gibi ağır çalışma şartlarında başarılı bir şekilde kullanılmaktadır [149,150].

7.4.1. Aşınma Yüzeyleri

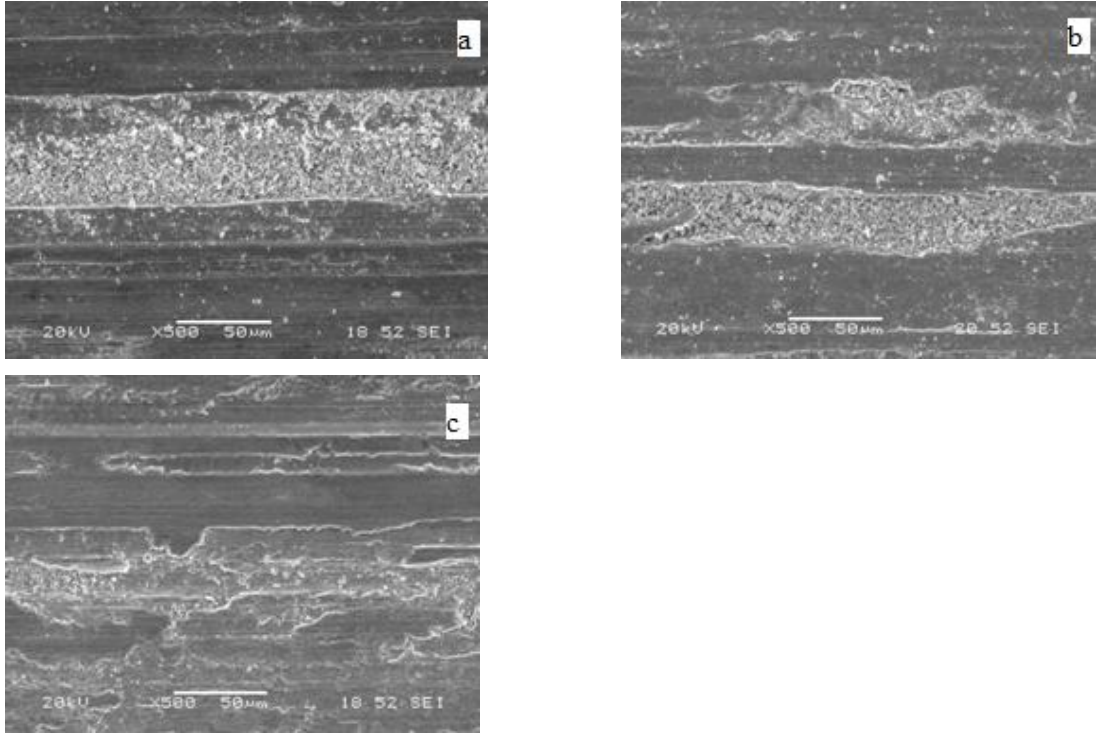
Aşınma testleri sonunda ZA alaşımlarının aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri Resim 7.25-7.28’de verilmiştir. Anlaşılağı üzere, ZA alaşımlarının aşınma yüzeylerinde çizikler, sıvama tabakaları ve pulcuklaşma, kavlamalar, yırtılmalar gibi aşınmaya neden olan hasarların bulunduğu görülmektedir.



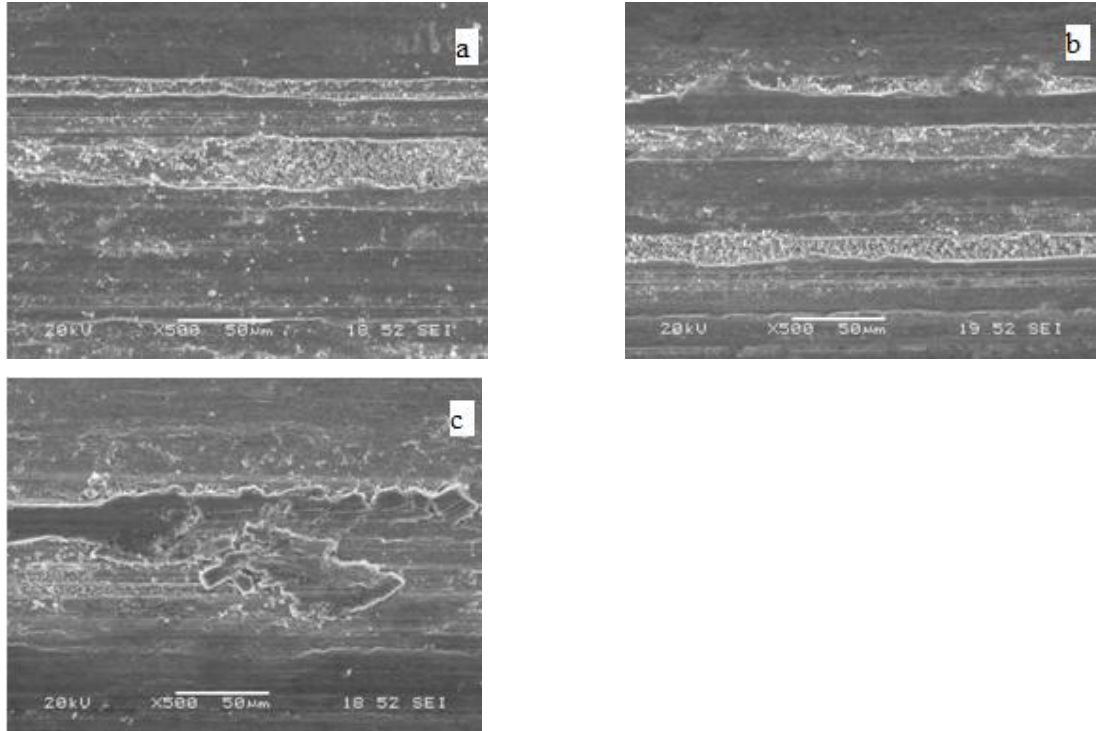
Resim 7.25. 5 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8
b) ZA-12 c) ZA-27



Resim 7.26. 6 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8
b) ZA-12 c) ZA-27



Resim 7.27. 7 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27



Resim 7.28. 8 saat mekanik alaşımlanmış ZA alaşımlarının aşınma yüzeyleri a) ZA-8 b) ZA-12 c) ZA-27

En fazla aşınma oranının gerçekleştiği ZA-8 alaşımının aşınma yüzeyleri incelendiğinde (Resim 7.25 (a), Resim 7.26 (a), Resim 7.27 (a), Resim 7.28 (a)), abrasiv (aşınmalı) aşınmanın yoğun olduğu dikkati çekmektedir. Aşınmalı aşınma daha çok sürtünen malzemelerin ara yüzeyinde kopan küçük parçacıkların malzemeyi derin çizik şeklinde kazması ile kendini gösterir ki bu da alaşımın aşınma sonrası hacim kaybının ve sürtünme katsayısının yüksek olması neden olmuştur. Ayrıca bu alaşımlarda yüzeye yapışmış durumda bulunan küçük aşınma parçacıklarının bulunduğu gözlenmiştir.

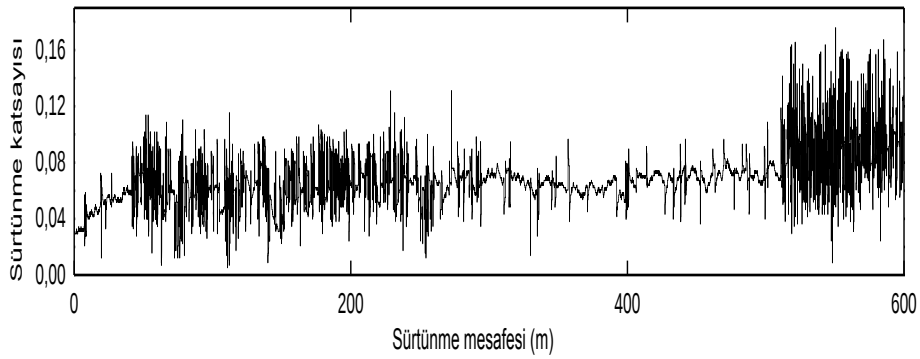
ZA-12 alaşımının aşınma yüzeylerinde (Resim 7.25 (b), Resim 7.26 (b), Resim 7.27 (b), Resim 7.28 (b)), ZA-8 alaşımları gibi yüzeylerde kısmen kraterler ve soyulmalar görülmektedir. ZA-12 alaşımının, ZA-8 alaşımına nazaran aşınma sonrası hacim kaybı ve sürtünme katsayısı daha azdır. Bu nedenle yüzeylerde oluşan kütle kaybı ZA-8 alaşımına nazaran daha azdır.

ZA-27 alaşımının aşınma yüzeylerinde ise (Resim 7.25 (c), Resim 7.26 (c), Resim 7.27 (c), Resim 7.28 (c)), ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarından daha az yırtılmalar ancak daha fazla sıvanma meydana gelmiştir. Bu da aşınma kaybını en aza indirmiştir. Çünkü ZA-27 alaşımının, aşınma sonrası hacim kaybı ve sürtünme katsayısı ZA-8 ve ZA-12 alaşımına nazaran en küçüktür. Bundan dolayı ZA-27 alaşımında sadece sıvanma söz konusudur. Yani kırılma ve kopma meydana gelmeden aşınma yüzeyinde plastik deformasyon meydana geldiği söylenebilir.

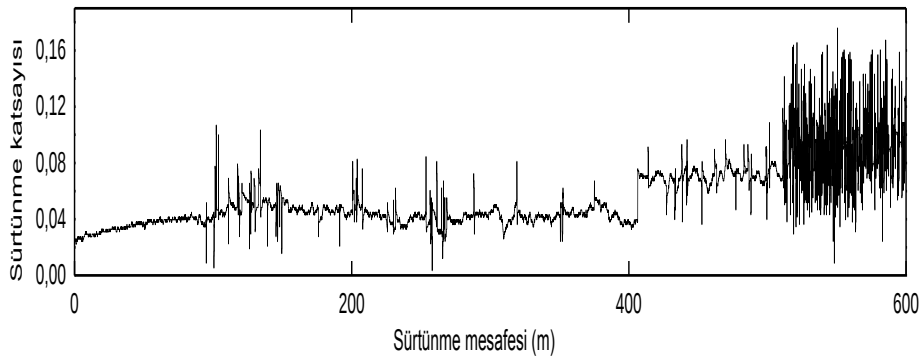
Resimlerde görüldüğü gibi aşınma miktarını artıran en önemli durum yapışmalı (adhesiv) aşınma yüzeyden daha fazla kütle kaybına yol açar. Bu durumu daha iyi anlayabilmek için, örneğin Resim 7.28 (b) de görüldüğü gibi 8 saat MA sonrası ZA-12 alaşımında derin kopma izleri görülmektedir. Bu durum Şekil 7.6'da görüldüğü gibi sürtünme katsayılarında mesafeye bağlı olarak çok belirgin şekilde inişli çıkışlıdır. Sürtünme katsayısının çok yüksek olduğu yerlerde yapışma durumu söz konusu ve ani bir düşme olduğu durumda ise yapışan katmanın koptuğunu göstermektedir. Bu durumda kütle kaybına yol açmaktadır. Aşınma gösteren ZA-12

alaşımında 8 saat MA yapıldığında aşınma oranının tekrar artmasının temel nedeni bu durum gösterilebilir.

Oysaki aynı alaşım 6 saat MA işlemi yapıldığı durumda en az oranda aşınma göstermiştir. Çünkü bu şartlarda hem aşınma katsayısı en az hem de Şekil 7.7’de görüldüğü gibi mesafeye göre aşınma katsayısının çok fazla inişli-çıkışlı olmaması kütle kaybının en az olmasına neden olduğu söylenebilir. Verilen bu örneklerde olduğu gibi aşınma davranışını etkileyen tribolojik değerlendirmelerin en önemli unsuru olan sürtünme katsayıları ayrıca incelenebilir.



Şekil 7.6 8 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği



Şekil 7.7 6 saat MA yapılmış ZA-12 alaşımının sürtünme katsayısı grafiği

8. SONUÇLAR

Yapılan bu çalışmada, toz metalurjisi yöntemlerinden MA ile üretilmiş olan farklı bileşimlere sahip ZA alaşımlarının karakterizasyonu ve aşınma özellikleri incelenmiştir. Farklı sürelerde uygulanan MA yöntemi sonrasında sıcak presleme ve sinterleme işlemi yapılmış olan ZA alaşımlarının hem mikroyapı karakterizasyonu hem de kuru sürtünmeli aşınma davranışları araştırıldı.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonunda etkin parametrelerin, MA süresi ve alaşımın kimyasal kompozisyonu olduğu görülmüştür. Bu parametrelerin mikroyapı ve aşınma özelliklerine etkileri aşağıda maddeler halinde verilmiştir.

1. ZA-8, ZA-12 ve ZA-27 alaşımlarında MA süreleri göz önüne alındığında 4. saatten sonra tozların birleşerek irileştiği görülmüştür. Bu yüzden optimum süre 4 saat olarak belirlenmiştir. En küçük toz boyutları ZA-27 alaşımında olduğu görülmektedir. ZA alaşımlarının MA sürelerine göre toz boyutlarında etkili bir azalma görülmemiştir.

2. ZA alaşımlarının EDS analizlerine göre; ZA-8 ve ZA-12 alaşımlarında beyaz bölgelerin Al'ca zengin, koyu bölgelerin ana matris elementi olan Zn'ca zengin olduğu görülmektedir. ZA-27 alaşımının da ise Al'ca zengin bölgelere rastlanmıştır. ZA alaşımlarının element dağılım haritalama sonuçlarına göre Cu'nun yapıya homojen olarak dağıldığı ve Al'un oksitlendiği görülmektedir. Ayrıca ZA alaşımlarının mekanik alaşımlama sürelerinin EDS ve Element Dağılım Haritalaması sonuçlarına göre farkın olmadığı görülmektedir.

3. ZA alaşımlarının MA işleminden sonra sıcak presleme sonucunda ki yoğunluk değeri, sinterleme sonucu yoğunluk değerinden yüksek bulunmuştur. Bunun nedeni olarak sinterleme sonrasında alaşımların boyutlarında büyüme olduğundan dolayı numunelerde hacimce artma, yoğunlukta azalma olarak düşünülmektedir. ZA alaşımlarında Al oranı arttıkça yoğunluk, Al'un düşük özgül ağırlığından dolayı azalmıştır.

4. ZA alaşımlarının aşınma testi sonuçlarına göre; ZA-8 alaşımının aşınma kayıplarının fazla olması sürtünme katsayılarındaki artış ve Al oranının düşük olmasından dolayı olduğu bulundu. Artan alüminyum oranı ile birlikte sürtünme katsayısı azaldığından en az aşınma ZA-27 alaşımında gerçektir.

5. ZA alaşımlarında aşınma davranışı aynı zamanda MA süreleriyle de etkilenmiştir. MA süresinin artışıyla aşınma miktarı önce azalmış ancak 8 saat MA sonunda tekrar artmıştır.

Öneriler:

1. ZA alaşımlarının özelliklerini MA işleminde kullanılan değirmen tipi, alaşımlama atmosferi, BTO, ortam sıcaklığı gibi parametreler değitirilebileceğinden, bu alaşımların MA yöntemiyle üretimi için bu parametrelerin detaylı olarak incelenmesi gerekir.

2. Toz metalurjisi yöntemiyle üretilen ZA alaşımlarının karakterizasyonun da XRD, geçirimli elektron mikroskobu (TEM) gibi ileri tekniklerin kullanılması gerekir.

3. Tozların presleme işlemlerin de çift yönlü presleme veya izostatik presleme kullanılabilir. Bu sayede ham yoğunlukta artma ve gözenek sayısında azalma sağlanabilir.

4. Yukarıdaki parametreler ayrıntılı olarak çalışılıp istenilen özellikte ZA alaşımının üretiminden sonra bu alaşımların aşınma özellikleri, tribolojik etkiler bakımından incelenmesi gerekir. Bunlar; sinterleme hızı ve mesafesi, sürtünme kuvveti, kuru ve yağlayıcı sürtünme etkilerinin araştırılması olup aşınmadaki kütle kayıplarının mekanizması daha net olarak belirlenebilir.

5. Özellikle kuru sürtünmeli aşınma esnasında numune ile disk arasında oluşan ısı aşınma davranışları üzerinde en önemli etkenlerden biridir. Bu nedenle ısyı ölçmek için sisteme monte edilecek lazer sensör ile aşınmanın incelenmesi faydalı olur.

KAYNAKLAR

1. Savaşkan, T., "The Structure and Properties of Zinc-Aluminium Based Bearing Alloys", Ph. D. thesis, **University of Aston in Birmingham**, 10-15 (1980).
2. Murphy, S., Savaşkan, T., "Comparative Wear Behaviour of Zn-Al-Based Alloys in an Automotive Engine Application", **Wear**, 98(2): 151-161 (1984).
3. Calayag, T. ve Ferres, D., "High Performans, High Aluminum Zinc Alloys for Low Speed Bearings and Bushings", **SAE Annual Conference**, London, paper no 820643, 2241-2251 (1983).
4. Apelian, D., Paliwal, M., Herrschaft, D. C., "Casting with Zinc Alloys", **Journal of Metals**, 33(11): 12-19 (1981).
5. Altorfer, K. J., "Zinc Alloys Compete with Bronze in Bearings and Bushings", **Metali Progress**, 122(6): 29-31 (1982).
6. Marczak, R.J., Ciach, R., "Tribological Properties of Concentrated Al-Zn Alloys", **Proc. 1st Europe Tribology Congress**, London, 223-227 (1973).
7. Lee, P. P., Savaşkan, T. ve Laufer, E., "Wear Resistance and Microstructure of Zn-Al- Si and Zn-Al-Cu Alloys", **Wear**, 117 (4): 79-89 (1987).
8. Gervais, E., Barnhurst, R. J. ve Loong, C. A., "An Analysis of Selected Properties of ZA Alloys", **Journal of Metals**, 37(11): 43-47 (1983).
9. Pürçek, G., "Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 70-85 (1994).
10. Calayag, T. S., "The Practicality of Using Zinc-Aluminium Alloys for Friction-Type Bearings", **25th Annual Conference of Metalurgists**, Aug., Toronto, Ontario, 305- 313. (1986)
11. Gervais, E., Loong, C. A., "New ZA in Die Casting", **11th International Pressure Die Casting Conference**, Lyon-France, 1-25. (1984).
12. Barnhurst, R. J., "Zinc-Aluminum Alloy Design Manual for Continuous Rotation Bearings", **Noranda Sales Corporation Ltd.**, January, Toronto, 85-96 (1988).
13. Lyon, R, "The Properties and Applications of ZA Alloys", **The British Foundry-man**, 344-349 (1986).

14. Murphy, S., "Solid-Phase Reactions in the Low-Copper Part of the Al-Cu-Zn System", *Zeitschrift Metallkunde*, 71(5): 96-102 (1980).
15. Zhu, Y., Yan, B., Huan, W., "Bearing Wear Resistance of Monotectoid Zn-Al Based Alloy (ZA-35)", *Materials Science and Technology*, 11(1): 109-113. (1995).
16. Lyon, R., "Engineering Applications of ZA Alloys", *Proc. Second Conference on Material Engineering*, London, 221-227 (1985).
17. Wakefield, E. C., "Copper-Aluminium Zinc Alloy Excels in Tough Conditions", *Design Engineering*, 1-4 (1973).
18. Mihaichuk, W., "Zinc-Alloy Bearings Challenge the Bronzes", *Machine Design*, 53(28): 133-137 (1981).
19. Lamberigts, M., Walmag, G., Coutsouradis, D., Delneville, P. ve Meeus, M., "Friction and Ductility Behaviours of a High Strength Zinc Foundry Alloys", *AFS Transactions*, 569-578 (1985).
20. Radden, T., "Zinc Alloy Bearing Down on Bronze Territory", *Mining Journal*, Canadian, 58-59 (1986).
21. Givertz, A.C., "Zinc Casting Alloys-A Comparative Properties Analysis", *Society of Automotive Engineers*, Paper no 871953, 104-1067. (1988).
22. Barnhurst, R. J., "Bearing Design Manual", *Noranda Sales Corporation Ltd.*, January, Toronto, 315-325 (1988).
23. Calayag, T., "Zinc Alloys Replace Bronze in Mining Equipment Bushings and Bearings", *Mining Engineering*, 727-728 (1983).
24. Gervais, E., Levert, H., Bess, M., "The Development of a Family of Zinc-Based Foundry Alloys", *Trans. Am. Foundrym. Soc.*, 88(6), 183-194 (1980).
25. Geng, H. ve Ma, J., "Friction and Wear of Al-Zn-Pb Bearings Alloy", *Wear*, 169(32): 201-207 (1993).
26. Savaşkan, T., Murphy, S., "Mechanical Properties and Lubricated wear of Zn-25Al- Based Alloys", *Wear*, 116(23): 211-224 (1987).
27. Ma, T., Chen, D. Q., Li, S. C., Wang, H. M., "Effect of Mn on Lubricated Friction and Wear Properties of Zn-Al Alloys", *Louyang Institute of Technology*, People's Republic of China, 278-292 (1990).
28. Durman, M., Murphy, S., "Precipitation of Metastable E-Phase in a Hypereutectic Zinc-Aluminum Alloys Containing Copper", *Acta Metall. Mater.*, 39(10): 2235-2242 (1991).

29. Gross, D. K., "Zinc Alloys: Specifications and Processing", **Society of Automotive Engineers**, New York, paper no 871952, 1069-1075. (1988).
30. Pürçek, G., Küçükömeroğlu, T., Savaşkan, T., "Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan İmal Edilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, **K.T.Ü., Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 35-41 (1996).
31. Murphy, S., Savaşkan, T., Wheeldon, J. K., "Rhecast Zinc-Aluminum Based Alloys", **International Congress on Metals Engineering**, University of Aston, Birmingham, Casting and Foundry Technology, Preprint Volume, England, 7/1-7/1. (1981).
32. Mihaichuk, W., Bess, M. L., "The ZA Die Casting Alloys", **Society of Automotive Engineers**, China, paper no 860556, 560-568 (1986).
33. Savaşkan, T., Çuvalcı, H., "Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", **4. Ulusal Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi**, Ankara, 328-336 (1990).
34. Mykura, N., Zhu, Y., ve Murphy, S., Solid-State Reactions in Zn-Al Based Alloys, **Canadian Metallurgical Quarterly**. 25(2): 151-159 (1986).
35. Zhu, Y., Villaseñor, G.T., Pina, C., "Complex Microstructural Changes in As-Cast Eutectoid Zn-Al Alloy", **Journal of Materials Science**. 29(7): 1549- 1552 (1994).
36. Houghton, M.E., Murray, M.T., "An Introduction to Zinc Alloys" , **Metals Forum**, 6(4): 211-225 (1984).
37. Savaşkan, T., Murphy, S., "Zn-Al Esaslı Yatak Alaşımlarındaki Faz Dönüşümleri", **4. Ulusal Metalürji Kongresi**, Ankara, Ekim, Cilt II, 532-555. (1986).
38. Gervais, E., Levert, H., Bess, M., "The Development of a Family of Zinc-Based Foundry Alloys", **Trans.Am.Foundrym.Soc.**, 88(31): 183-194 (1980).
39. Barnhurst, R.J., Gervais, E., "Gravity Casting of Zinc-Aluminum (ZA) Alloys : Dependence of Mechanical Properties on Soundness, Microstructure and Inclusion Content", **AFS Transactions**. 93(42): 591-602 (1985).
40. Savaşkan, T., Murphy, S., "Decomposition of Zn-Al Alloys on Quench-Aging", **Materials Science and Technology**. 6(12): 695-700 (1990).
41. Murphy, S., "Solid-Phase Reactions in the Low Copper Part of the Zn-Al-Cu System", **Z.Metallkde.**, 71(2): 96-102 (1980).
42. Zho, Y. H., Torres, G., Pina, C., "Complex Microstructural Changes in As-Cast Eutectoid Zn-Al Alloy", **Journal of Materials Science**, 29(7): 1549-1552 (1994).

43. Zhu, Y., Murphy, S., "A General Rule of Decomposition Reaction in Supersaturated Zn-Al Based Alloys", *Chin. J. Met. Sci. Technol.*, 2(23): 105-116 (1986).
44. Zhu, Y. H., Goodwin, F. E., "Influence of Rare Earth Element Additions on Phase Transformations in the Zn-27% Al Alloy", *J. Mater. Res.*, 8(12): 3043-3049 (1993).
45. Lyon, R., "New Zinc Alloys with Wide Engineering Applications", *Proc. Conference on Materials Engineering*, University of Leeds, 87-96 (1984).
46. Barnhurs, R. J., "Metals Handbook, 10th Edition, vol. 2", American Society for Metals, *Metals Park*, Ohio, 528-542, (1991).
47. Savaşkan, T., Pürçek, G., "Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Aşınma Özellikleri", *Türk Mühendis ve Çevre Bilimleri Dergisi (Tr. J. Engin. Sci.)*, 24(141): 25-34 (2000).
48. Prasad, B. K., "Influence of Heat Treatment on the Physical, Mechanical and Tribological Properties of a Zinc-based Alloy", *Z. Metallkd.*, 87(53): 226-232. (1996).
49. Savaşkan, T., Çuvalcı, H., "Çinko-Alüminyum Esaslı Yatak Alaşımlarının Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi", *4. Ulusal Makina Tasarımı ve İmalat Kongresi*, Ankara, 123-130 (1990).
50. Savaşkan, T., Torul, O., Çuvalcı, H., "Çinko-Alüminyum Alaşımlarının İçyapı ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi", *5. Ulusal Metalurji Kongresi Bildiriler Kitabı*, Ankara, Cilt II, 794-798 (1988).
51. Durman, M., "Çinko-Alüminyum Esaslı Basınçlı Döküm Alaşımlarının %0-%30 Al Bileşim Aralığında Mekanik ve Mikroyapısal Özelliklerinin İncelenmesi", *5. Denizli Malzeme Sempozyumu*, Denizli, 177-191 (1993).
52. Ashrafizadeh, F., Young, J. M., Kondic, V., "Solidification Structure and Mechanical Properties of Zn-27Al Alloys Cast in Metal Moulds, *Materials Science and Technology*, 3(67): 665-670 (1987).
53. Hailing, J., "Principle of Tribology", *Macmillan Education Ltd.*, Great Britain, 1147-1158 (1989).
54. : Goodwin, F. E., Ponikvar, A. L. "Engineering Properties of Zinc Alloys", Published by Int. Lead Zinc Res. Org. Inc., *Third Edition-Revised*, North Carolina, 2225-2235 (1989).
55. Houghton, M.E., Murray, M.T., "An Introduction to Zinc Alloys" , *Metals Forum*, 6(4): 211-225 (1984).

56. Bostan, B., “Alüminyum-Karbon Tozlarının Mekanik Alaşımlama ve Sonrası İşlemlerle Al_4C_3 Sentezlenmesi”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-35 (2003).
57. Benjamin J.S., “Dispersion Strengthened Superalloys by Mechanical Alloying”, **Met. Transaction A.**, Germany 2943-2951 (1970).
58. Aslanoğlu Z., “Demir-Karbon Sisteminin Mekanik Alaşımlama Tekniği İle Üretim Süreçlerinin İncelenmesi ve Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 80-95 (1994).
59. Okuda T. At all., , “Solid State Powder Processing”, Ed. A.H. Clouet and J.J. de Barbadillo, **The Minerals Metals and Materials Society**, China, 19-202 (1990).
60. Suryanarayana C., “The Science and Technology of Mechanical Alloying”, **Materials Science and Technology**, 145(25): 151- 158 (2001).
61. Gilman, P.S., and Benjamin, J.S., Annu. Rev. **Mater. Sci.**, 13(78): 279-300 (1983).
62. German, Randall M., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Editörler: Prof.Dr. Süleyman SARITAŞ, Prof.Dr. Mehmet TÜRKER, Doç.Dr. Nuri DURLU, **Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları**, Ankara, 100-120 (2007).
63. Erdem, M., “Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Ni Esaslı Bir Süperalaşımın Üretilmesi ve Mikroyapı, Mekanik ve Oksitlenme Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-16 (2007).
64. Benjamin, J. S., “Mechanical Alloying, A Perspective, Proc. Conf. Of”, E. D. By E. Arzt., L. Shultz., Calw-Hirsau., **New Materials By MA Techniques**, Germany, 3-37, (1988).
65. Kılınç, Y., “Demir Bazlı Süperalaşımların Mekanik Alaşımlama Metodu İle Üretilmesi ve Özelliklerinin Araştırılması”, Doktora Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-12 (1999).
66. Fındık, T., “Mekanik Alaşımlama Değirmeninde Öğütülmüş 17-4 Çökelti Serleştirilmiş Paslanmaz Çelik Tozların Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 1-13 (2002).
67. Processing Handbook, American Institute of Mining, **Metallurgical and Petroleum Engineers**, U.S.A, 2455-2460 (1985).
68. El-Eskandarany, M.S., “Mechanical Alloying For Fabrication Of Advanced Engineering Materials”, **Norwih**, New York, U.S.A., 5-33, (2001).
69. El-Eskandarany, M.S., “Mechanical Alloying For Fabrication Of Advanced Engineering Materials”, **Journal of Materials Science**. New York, 284-295 (1999).

70. Özkan, S., “Alüminyum Matrisli SiC Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 22-27 (2007).
71. Taggart, A. F., Handbook of Mineral Dressing: Ores and Industrial Minerals, **Joh Wiley & Sons Inc.**, New York, 2545-2555 (1927).
72. Suryanarayana, C., “Mechanical alloying and milling”, **Progress in Materials Science**, 46(1): 1-184, (2001).
73. Aktaş, H., “Alüminyum Matrisli Al₂O₃ Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Mekanik Alaşımlama Yöntemiyle Üretimi ve Kuru Aşınma Davranışlarının İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 12-15, (2007).
74. Schelleng, R.D., Donachie, S.J., “Mechanical alloyed aluminum”, **Metal Powder Report, Germany**, 357-359 (1983).
75. Gilman, P.S., Benjamin, J.S., “Nickel and iron based dispersion strengthened alloys”, **Metals Handbook, ASM**, U.S.A, 723-725 (1984).
76. Bloor, D., Brook, R.J, Flemings, M.C., Mahajan, S., “The Encyclopedia of materials”, **Pergamon Press**, Oxford, 2258-2265 (1999).
77. Schultz, L., **J. Less-Common Met.**, 145(16): 233-234 (1988).
78. El-Eskandarany, M. S., Aoki, K., and Suzuki, K., **Metal. Trans A.**, 23(2): 2131-2132 (1992).
79. Lee PY, Koch CC., **J. Non-Cryst Solids**, 94(87): 88-100 (1987).
80. B.J.M. Aikin, T.H. Courtney, **Metall. Trans.** 24(647): 125-140 (1993).
81. Benjamin J.S., T.E. Volin, **Metall. Trans.** 1929 (1974).
82. Benjamin JS., **Sci Amer** ; 234(5): 40-8, (1976).
83. Kis, Varga., Beke, D.L., “Phase Transitions in Cu-Sb Systems induced ball milling”, **Materyal Science Forum**, England, 225-227 (1996).
84. Lee P.Y., Koch CC., **J. Mater. Sci.**, 23(47): 2837-2838 (1988).
85. Lee, P. Y., Koch CC., **Appl. Phys. Lett.**, 50(89): 1578-1580 (1987).
86. Davis RM, McDermott B, Koch CC., **Metal Trans**, 19(74): 2867-2868 (1988).

87. Suryanarayana, C., "Powder metal Technologies and applications", **Handbook ASM Materials Park**, U.S.A, 80-90 (1988).
88. Bakker, H., Zhou, G.F., Yang, H., **Prog. Mater. Sci.**, 39(24): 159-160, (1995).
89. F.H. Froes., J.J. deBarbadillo., "Structural Applications of Mechanical Alloying", **Proceeding of an ASM International Conference Myrtle Beach**, South Calina., 2158-2169 (1990).
90. Di, L.M., Bakker, H.J., "Phase Transmission Of Compound V_3Ga Induced By Mechanical Grinding", **Phys. C: Condens. Matter.**, China, 3427-3432 (1991).
91. Kaloshkin, S.D., Tomlin, I.A., Andriano, G.A., Baldoghin, U.V., Sheleghe, E.V., **Mater. Sci. Forum.**, Russian, 235-238,565-570 (1997).
92. Kuhrt, C., Schroph, H., Schultz, Artz, In: deBarbadillo, J.J., et.al. "Mechanical alloying for structural applications", **Materials Park ASM**, U.S.A, 269–273 (1993).
93. Schaffer, G.B., McCormick, **Metal Transaction A**, 22:2789, (1990).
94. Son H.T., Kim T.S., Suryanarayana C., Chun B.S., "Homogenous Dispersion of Graphite in a 6061 Aluminium Alloy by Ball Milling", **Materials Science & Engineering**, U.S.A, 163-169 (2002).
95. Gavrilov D, Vinogradov O, Shaw WJD. In: Poursartip A, Street K, , ICCM-10, vol. III. Woodhead Publishing **Proc. Inter. Conf. On Composite Materials**, Russian, 356-365 (1995).
96. Chin, Z.H., Perng, T.P., "Amorphization of Ni-Si-C Ternary Alloy Powder Mechanical Alloying", **Materyal Science Forum**, China, 6(121): 235-238 (1997).
97. Orgino, Y., Yamasaki, T., Murayama, S., "Non-Equilibrium Phases Formed by Mechanical Alloying of Cr-Cu Alloys". **J.Non-Crystalline Solids**, China, 117(118): 737–740 (1990).
98. Güler, Ö., "Oksit Takviyeli Bakır Kompozitin Mekanik Alaşımlama Yöntemi İle Üretilmesi ve Elektriksel Özelliklerinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 3-11, (2006).
99. Ivision, P.K, Soletta, I., Cowlam, N., Cocco, G., Enzo, S. And Batezzati, L., **J. Phys C: Condents Matter**, 4(48): 5239-5240 (1992).
100. Sümer, M., "Mekanik Alaşımlama İle Üretilen Fe-Fe₃ Kompozit Malzemede Mekanik Özelliklerin Araştırılması", Yüksek Lisans tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 13-21 (2003).
101. German, R.M., " Powder Metallurgy Science, 2nd edition", **Metal Powder Industries Federation**, U.S.A., 58-64 (1994).

102. Arslan, F., “Sıvı faz sinterlemesi”, **1. Ulusal toz Metalurjisi Konferansı**, Ankara, 551-558 (1996).
103. Akoral, E., “Toz Metalürjisi Yöntemi ile Al-SiC Kompozit Malzeme Üretimi ve İşlenebilirliğinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 43-48 (2003).
104. Yılmaz, M., “Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 25-35 (1996).
105. Güldaş, A. M., “Aşınma Deney Aparatının Tasarımı, Üretimi ve Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının Deneysel Olarak İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, (1998).
106. Afacan, S., “Mevcut Aşınma Deney Düzeneginin Denenip Optimize Edilmesi”, Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 45-55 (1997).
107. Pigors, O., “Abrasive Verschleißverhalten von Stählen bei Gleit- und Wälzbewegungen”, **Schmierungsstechnik**, Germany, 145-155 (1979).
108. Odabaş, D., TOPAL, E. S., “100Cr6 Çeliğinin İki Cisimli Abrasif Aşınma Davranışının Kuru veya Sıvı Sürtünme Şartlarında Deneysel Araştırılması” **6. Denizli Malzeme Sempozyumu**, Denizli, 396-405. (1995).
109. Ulusoy, E., , “Bazı Toprak İşleme Alet ve Makinelerinde İş Organlarının Aşınması Üzerinde Araştırmalar”, **Ege Üniversitesi, Ziraat Fakültesi Yayınları**, İzmir, 390:11 (1981).
110. Donald, R. A., “The Science and Engineering of Materials”, Third Edition, **PSW Publishing Company**, University of Missouri / Rolla, 123: 5-13 (1994).
111. Ertan, G., “İş Makinelerinde Aşınma Ömrü Kriterlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 45-50 (1999).
112. **Uluslararası Metalürji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 11-15 (1997).
113. Soydan, Y., Ulukan, L., “Sürtünme ve Aşınma Direnci Ölçme Yöntemleri”, **8. Uluslararası Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, Ankara, 581-588 (1988).
114. Eyre, T. S., “Friction and Wear Control in Industry”, **Surface Engineering**, U.S.A, 143-148. (1991).

115. İpek, R. , “AISI 1020 Çeliğinin, Yüzey Sertleştirme İşlemleri Uygulanarak AISI 5155 Çeliğinin Yerine Kullanabilirliğinin Deneysel Araştırılması”, Doktora Tezi, **E. Ü. , Fen Bilimler Enstitüsü**, Kayseri, 75-80 (1992).
116. Gürleyik, M.Y., “Soğuk Deformasyonla Aşınma Direnci Arttırılabilir”, **2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi** , Ankara, 501-510 (1986).
117. Gürleyik, M.Y., “Makine Mühendisliğinde Aşınma Olayları”, **Mühendis ve Makine**, 27(323): 3-14. (1986).
118. Onaran, Kaşif , “Malzeme Bilgisi”, ITÜ, **Çağlayan Basımevi**, İstanbul, 20-30 (1985).
119. Yılmaz, F., “Sürtünme ve Aşınma”, **9. Uluslar Arası Metalurji ve Malzeme Kongresi**, İstanbul, 229-247 (1997).
120. Odabaş, D., “Kuru Sürtünme Şartlarında Termomekanik Faktörlerin AISI 3315 Çeliğinin Aşınma Davranışına Olan Etkilerin Teorik ve Deneysel Araştırılması”, Doktora Tezi, **E.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kayseri, 396-405 (1991).
121. Akkurt, S. , “Poliasetalin Kuru ve Su ile Yağlama Koşullarında Sürtünme Katsayısı ve Aşınma Bakımından İncelenmesi” **4. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, Ankara, 585 – 594, (1990).
122. Hurricks, P. L., “Some Metallurgical Factor Controlling the Adhesive and Abrasive Wear Resistance of Steels a Review” , **Wear**, 26(155): 285– 304 (1973).
123. Karamış, M .B., , “Traktör Hızı ve Pulluk Çalışma Derinliğinin Uç Demiri Aşınma Hızına Etkileri ve Optimizasyonu”, **Tübitak, 2. Ulusal Makine Teorisi Sempozyumu**, Gaziantep , 668 – 677 (1986).
124. Habig, K. H., “Verschleiß UND Härte von Werkstoffen” **Hanser–Verlag München – Wien**. (1980).
125. Kaya, H., “Malzeme”, **Ankara Erkek Teknik Öğretmen Okulu Yayınları 1. Gün Matbaası**, İstanbul, 40-55 (1961).

126. W. Weissbach'ın Werkstoffkundeund Werkstoffprüfung, “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, Editör: ANIK, Selahaddin, **Kurtuluş Matbaası**, İstanbul, 65-70 (1977).
127. Koç R., “Vagon Boji Bagalarına Alternatif Polimer Malzemelerin Deneysel İncelenmesi”, Doktora Tezi, **SAÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü**, 90-105 (2004).
128. Armatlı, M., K., “Havacılık Kompozitleri ve Mukavemet- Maliyet Analizleri” **Gazi Üniversitesi Merkez Kütüphanesi**, Ankara, 68-75 (1999).
129. Gürleyik, M. Y., “Yıkama Aşındırması”, **Mühendis ve Makine**, 311(368): 25-34 (1980).
130. Karamış, M. B., “Abrasiv Aşınma Mekanizmasında Yüzey Basıncının Aşınmaya Etkisi”, **2. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, Ankara, 493 – 500 (1986).
131. Kurtçu, A.C., “SiC Katkılı Alüminyum Matrisli Kompozitlerde Aşınma Davranışının İncelenmesi”, Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 50-65 (1995).
132. Yılmaz, M. , “Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 71-86 (1996).
133. Uruslu, N., Kayalı, E. S, **Hasar Analiz Seminer Notları**,İstanbul, 20-25 (1997).
134. Arıkan, R., , “MOS₂ İlaveli Çinko – Alüminyum Esaslı Kompozitlerin Yapımı ve Aşınma Özellikleri” **3. Ulusal Makine Tasarım ve İmalat Kongresi**, Ankara, 537 – 547 (1988).
135. Yılmaz, T., , “İyonitürleme Yoluyla Sertleştirilmiş SAE 4140 Çeliğinin Aşınma Dayanımının İncelenmesi”, Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 60-75 (1992).
136. Mutlu, H., “Al – SiC Kompozitlerin Termomekaniksel İşlem Sonrası Aşınma Davranışlarının İncelenmesi”, Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 66-80 (1996).

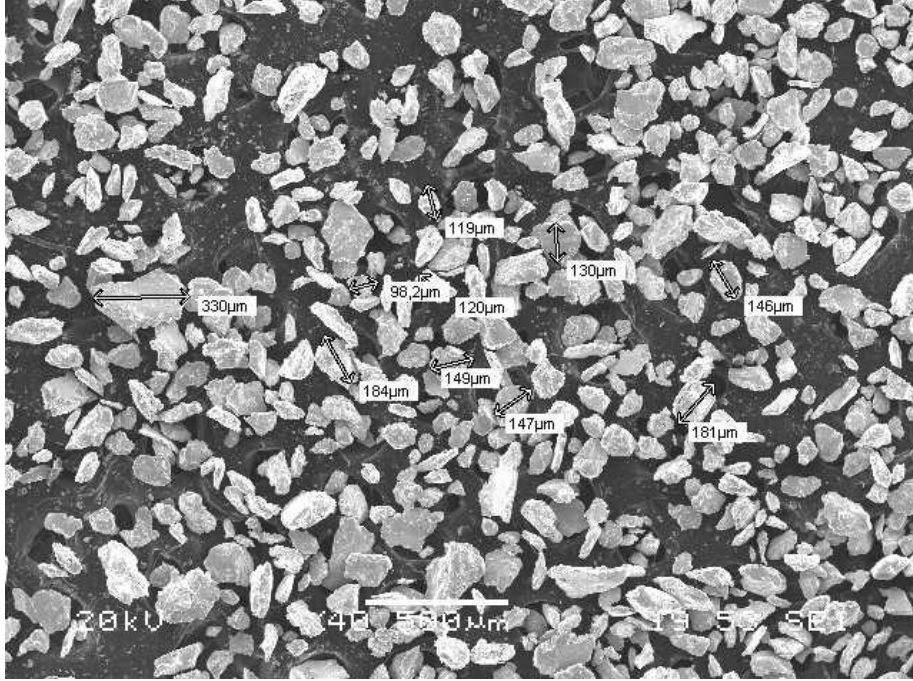
137. Gldaş, A. M., “Aşınma Deney Aparatının Tasarımı, retimi ve Metal Matrisli Kompozitlerin Aşınma Davranışlarının DeneySEL Olarak İncelenmesi”,Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 90-115 (1998).
138. Yılmaz, M., “Alüminyum Alaşımlarının Aşınma Davranışları”, Yüksek Lisans Tezi, **Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 80-95 (1996).
139. Afacan, S., “Mevcut Aşınma Deney Düzeneğinin Denenip Optimize Edilmesi”, Lisans Tezi, **Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 45-60 (1997).
140. Ertan, G., “İş Makinelerinde Aşınma mr Kriterlerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 81-96 (1999).
141. Suryanarayana, C., “ Mechanical alloying and milling “, **Progress in Metarials Science**, 46(1): 184-185 (2001).
142. German, R. M., “Toz Metalurjisi ve Parçacıklı Malzeme İşlemleri”, Editrler, Prof.Dr. Süleyman SARITAş, Prof.Dr. Mehmet TÜRKER, Doç.Dr. Nuri DURLU, **Türk Toz Metalurjisi Derneği Yayınları**, Ankara, 60-80 (2007).
143. Barnhurst, R.J., “Zinc-Aluminum Alloy Design Manual for Continuous Rotation Bearings”, **Noranda Sales Corporation Ltd.**, Toronto, 110-115(1988).
144. Barnhurst, R.J., “Zinc-Aluminum Alloy Desing Manuel for Continuous Rotation Bearings”, **Norando Sales Corporation Ltd.**, Toronto, 100-110 (1988).
145. Geng, Ha., Ma, J., “Friction and wear of Al-Zn-Pb Bearing Alloy”, **Wear**, 169(22): 201-207 (1993).
146. Savaşkan, T., Pürçek, G., “Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımların ve Bu Alaşımlardan retilen Kaymalı Yatakların Aşınma zellikleri”, **Turkish Journal of Engineering and Enviromental Sciences (Türk Mühendislik ve Çevre Bilimleri Dergisi) TÜBİTAK**, Ankara, 24(1): 25-34 (2000).
147. Prased, B., “Effect of Partially Substituting Copper by Slicon on the Physical Mechanical and Wear Properties of a Zn-37,5% Al-Based Alloy”, **Materials Characterization**, England, 301-308 (2000).

148. Pürçek, G., “Çinko-Alüminyum Esaslı Alaşımlardan Üretilen Kaymalı Yatakların Tribolojik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **K.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 75-90 (1994).
149. Prased, B., “Effect of Heat Treatment on the Patially Lubricated Sliding Wear Behaviour of a Zinc-Based Alloy”, **Materials Transactions**, 40(7): 578-585 (1999).
150. Prased, B., “Influence of Heat Treatment on the Physical, Mechanical and Tribological Properties of a Zinc-Based Alloy”, **Zeitschrift Metalkunde**, England, 226-232 (1996).

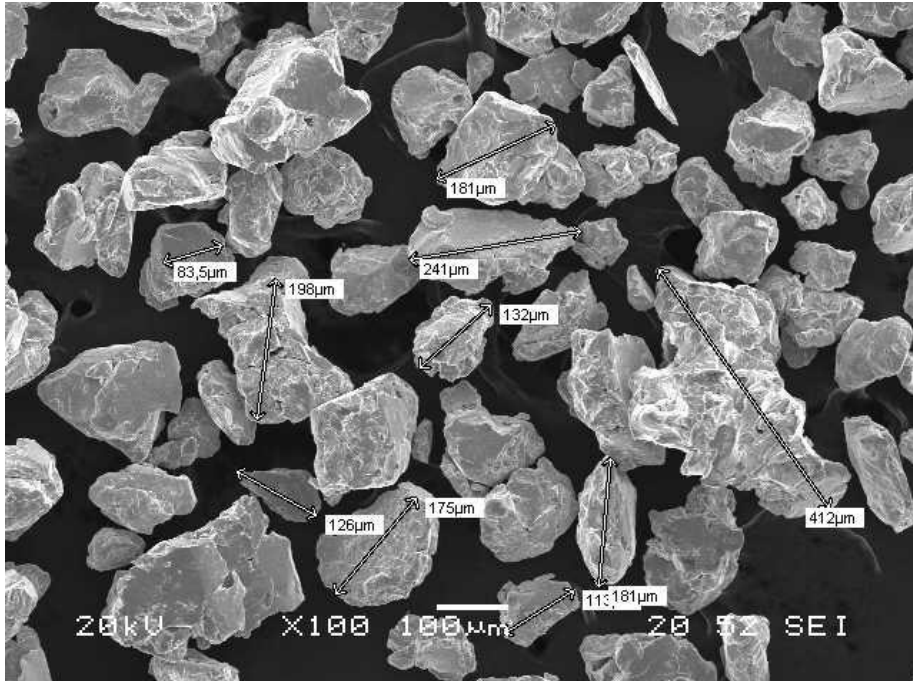
EKLER

Ek-1 ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

ZA-8 Alaşımının Toz Boyut Karakterizasyonu

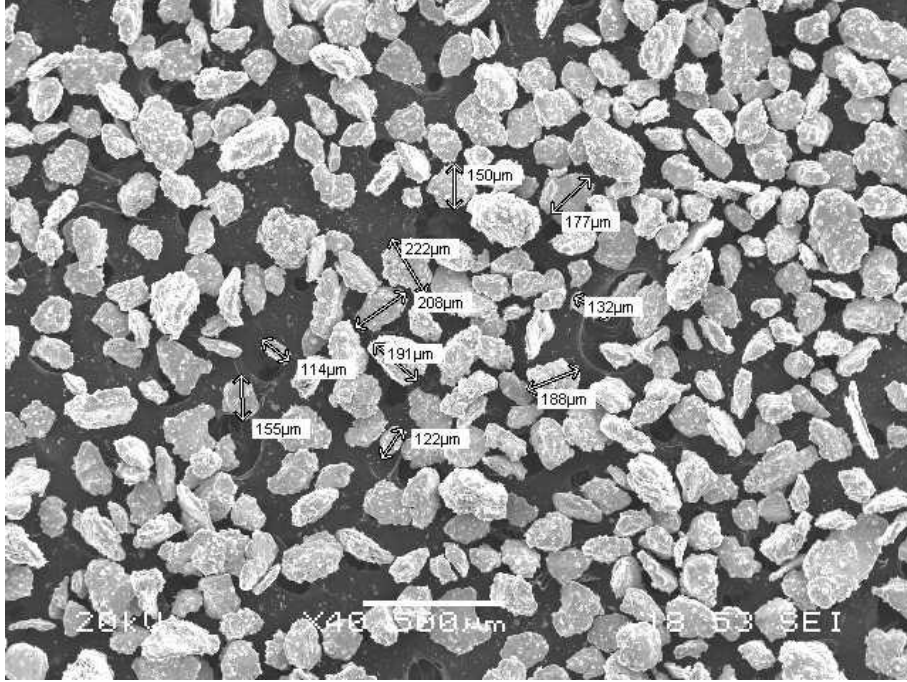


Resim 1. 1 saat MA'nmış ZA-8 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

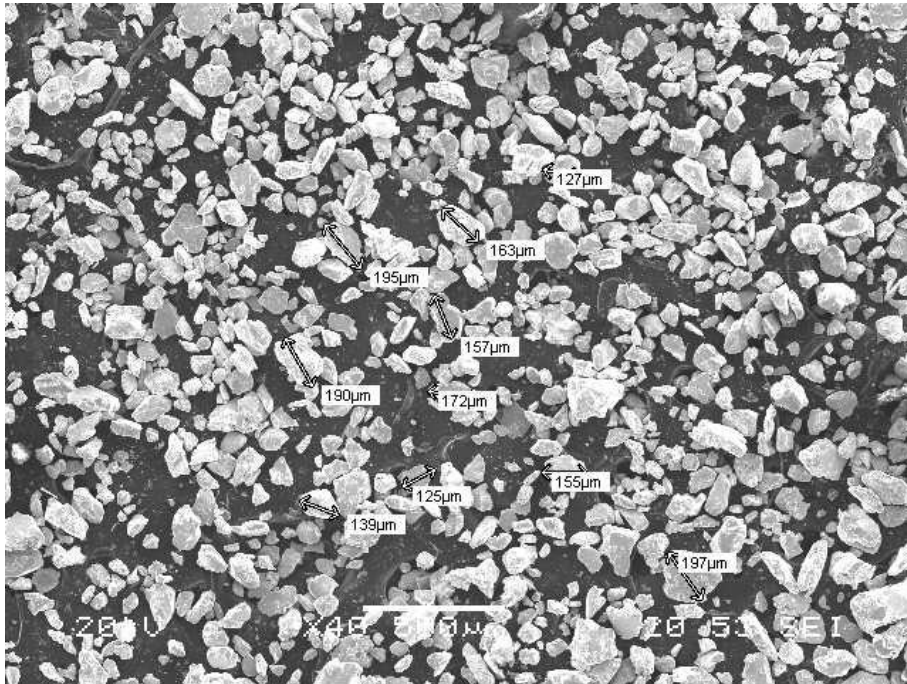


Resim 1. 2 saat MA'nmış ZA-8 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

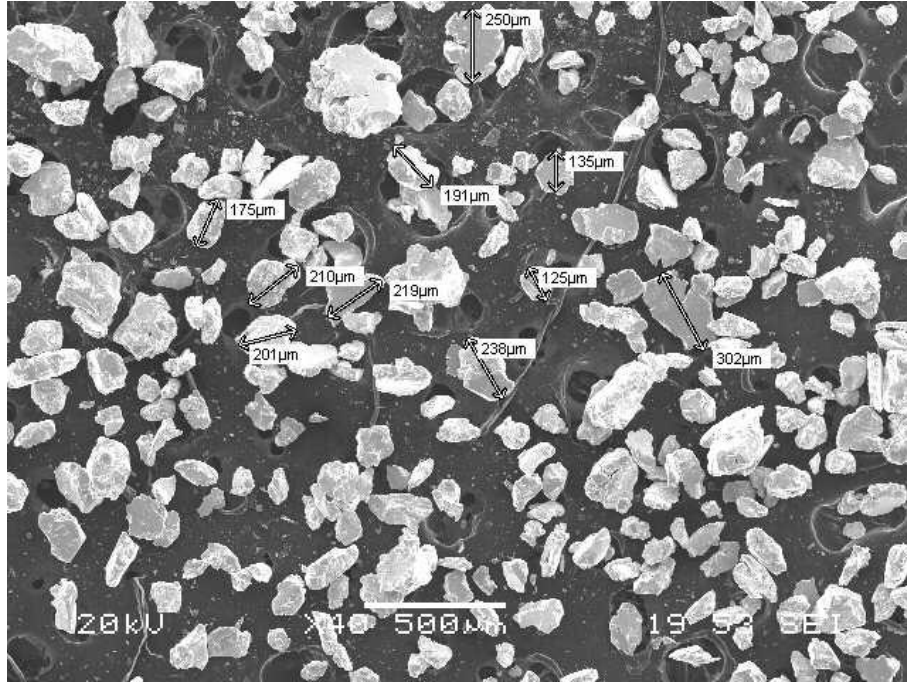


Resim 1. 3 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının toz boyut karakterizasyonu

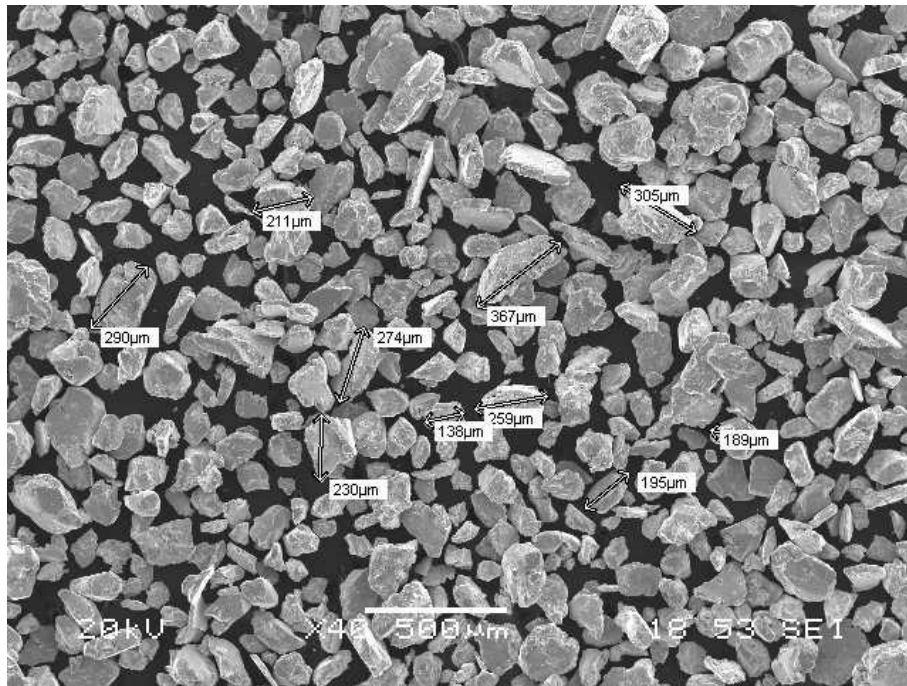


Resim 1. 4 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

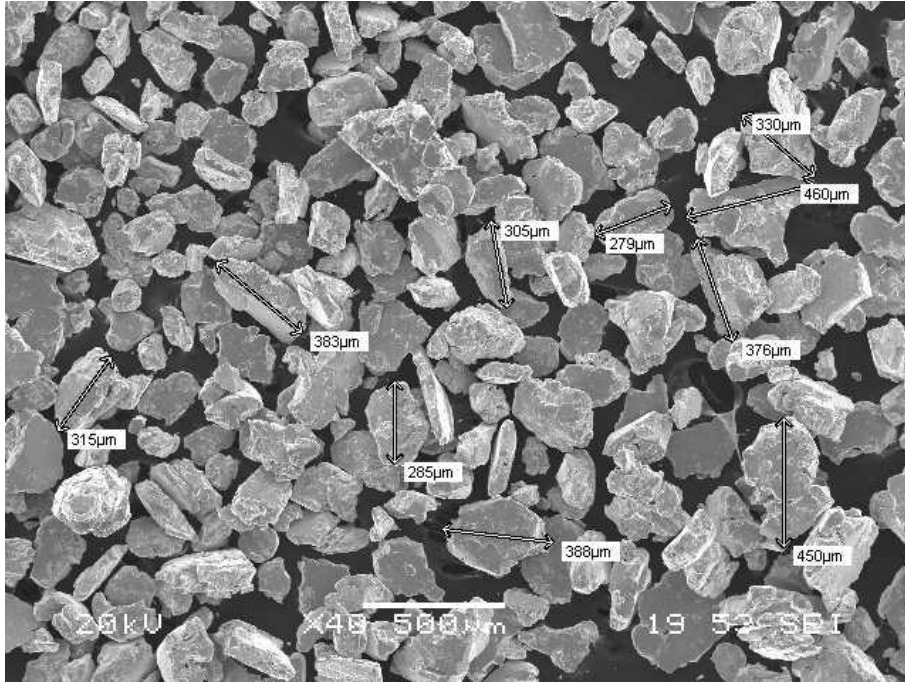


Resim 1. 5 saat MA'nmış ZA-8 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

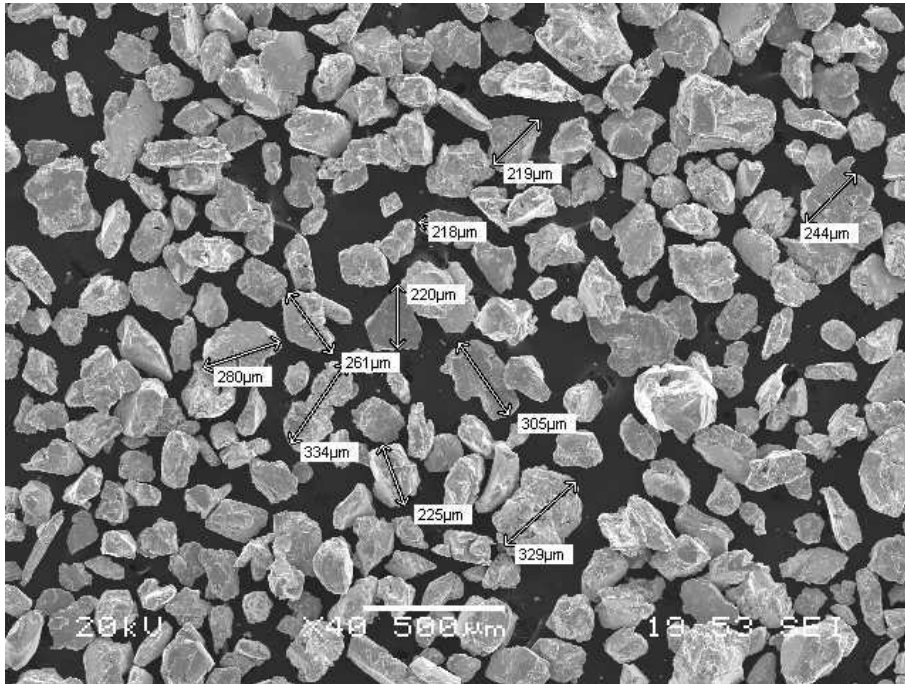


Resim 1. 6 saat MA'nmış ZA-8 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi



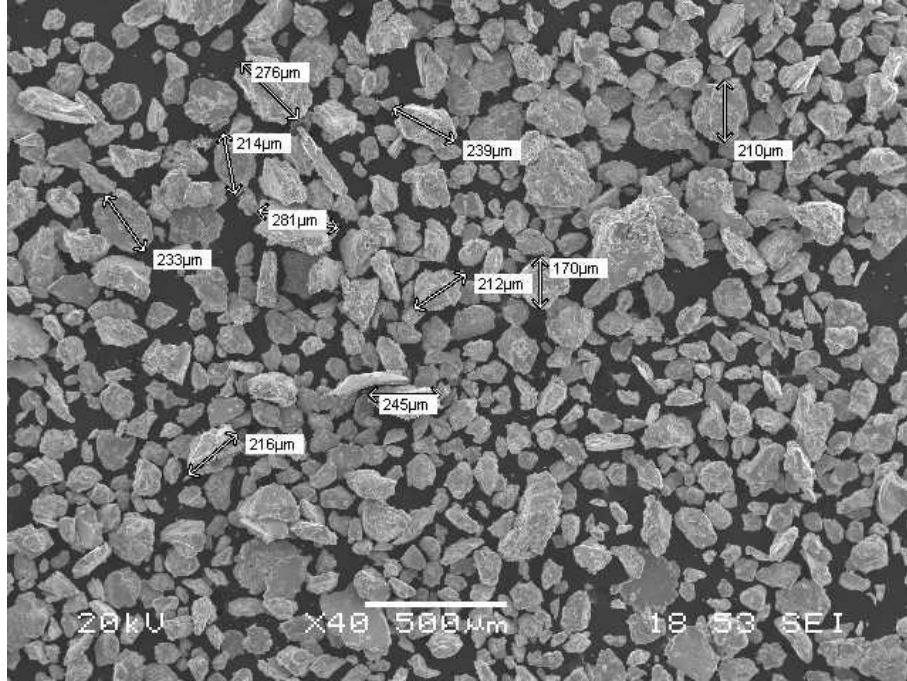
Resim 1. 7 saat MA'nmış ZA-8 alaşımın toz boyut karakterizasyonu



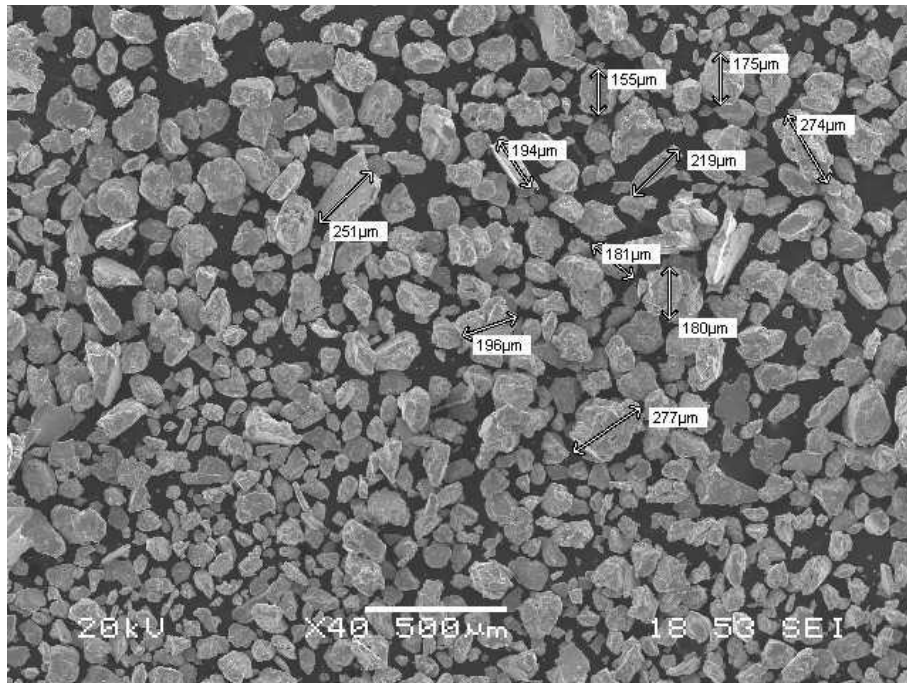
Resim 1. 8 saat MA'nmış ZA-8 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

ZA-12 Alaşımının Toz Boyut Karakterizasyonu

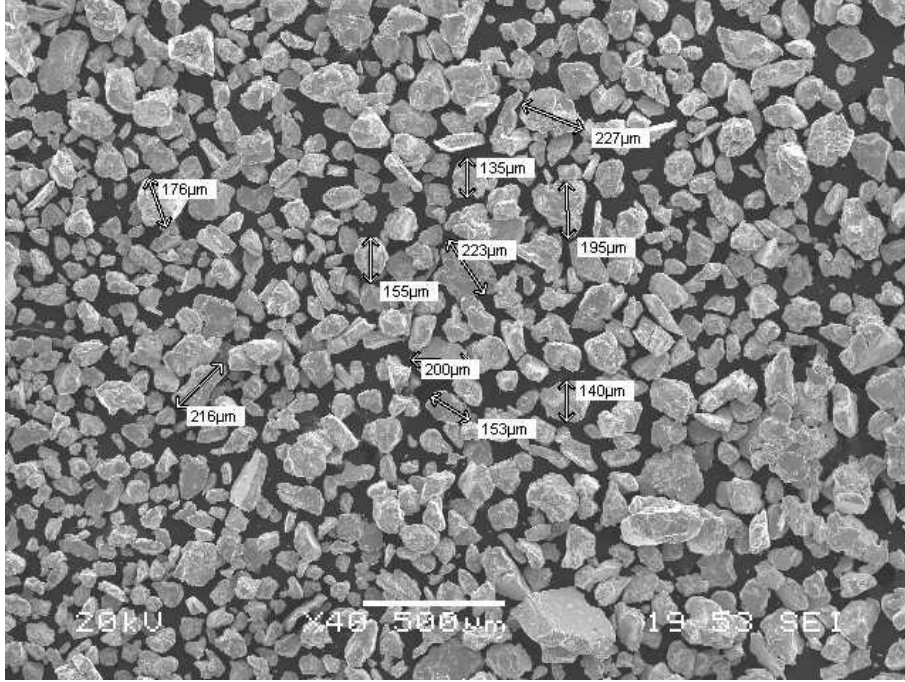


Resim 1.9. 1 saat MA'nmış ZA-12 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

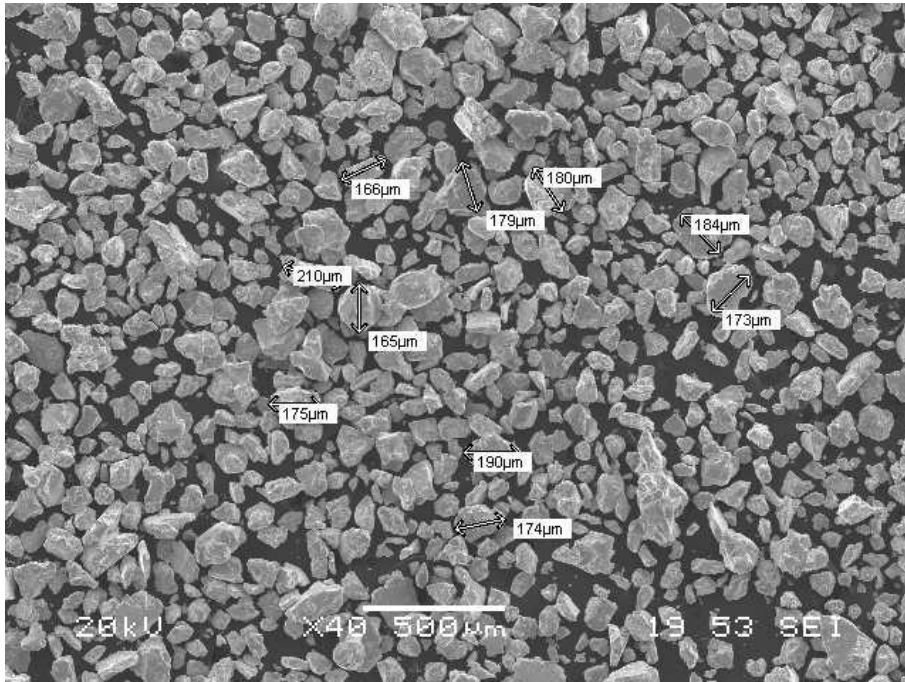


Resim 1.10. 2 saat MA'nmış ZA-12 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

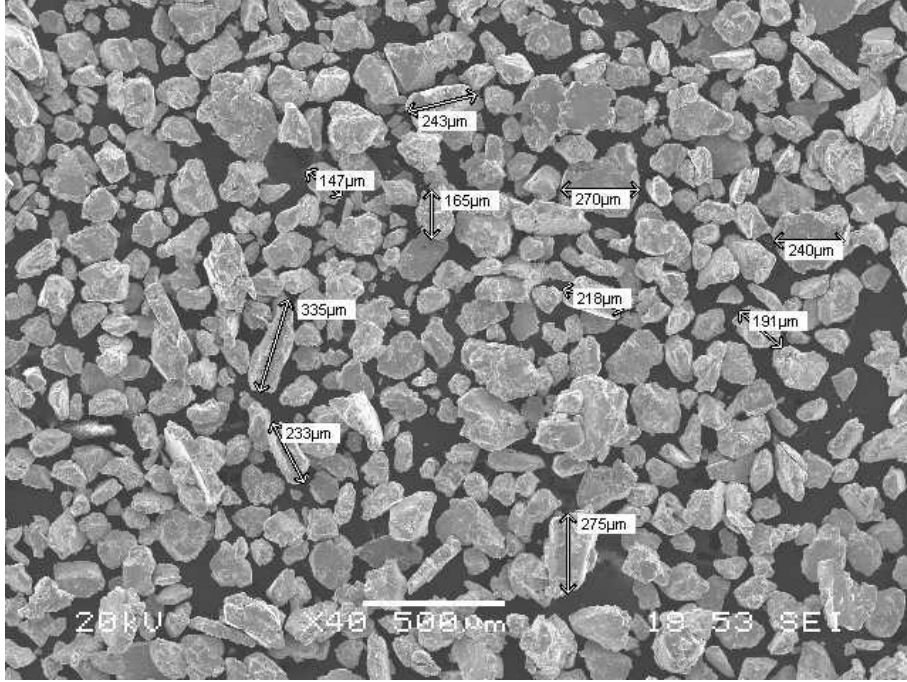


Resim 1.11. 3 saat MA'nmiş ZA-12 alaşımların toz boyut karakterizasyonu

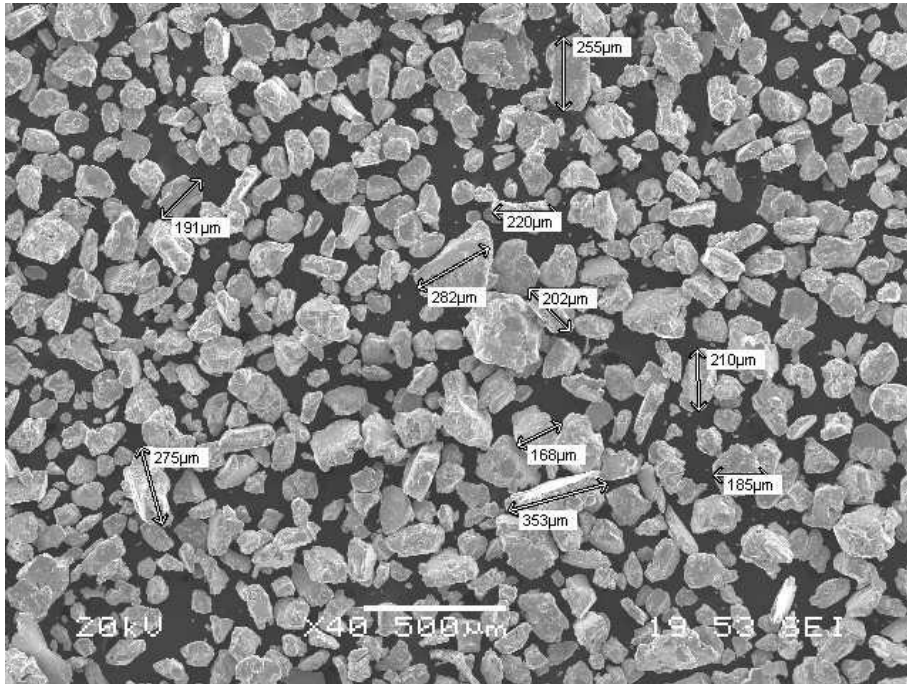


Resim 1.12. 4 saat MA'nmiş ZA-12 alaşımların toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

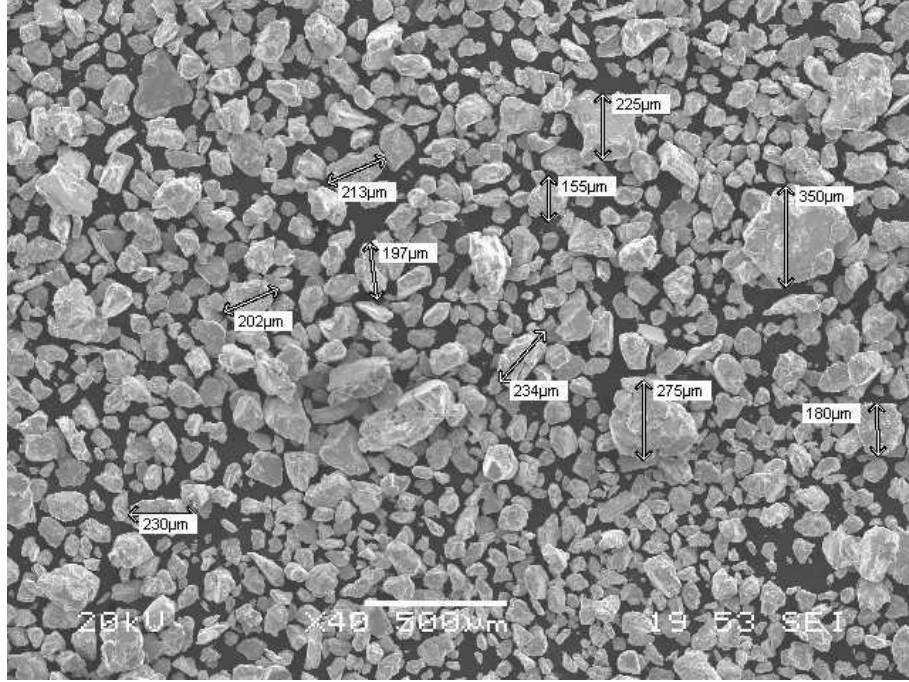


Resim 1.13. 5 saat MA'nmış ZA-12 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

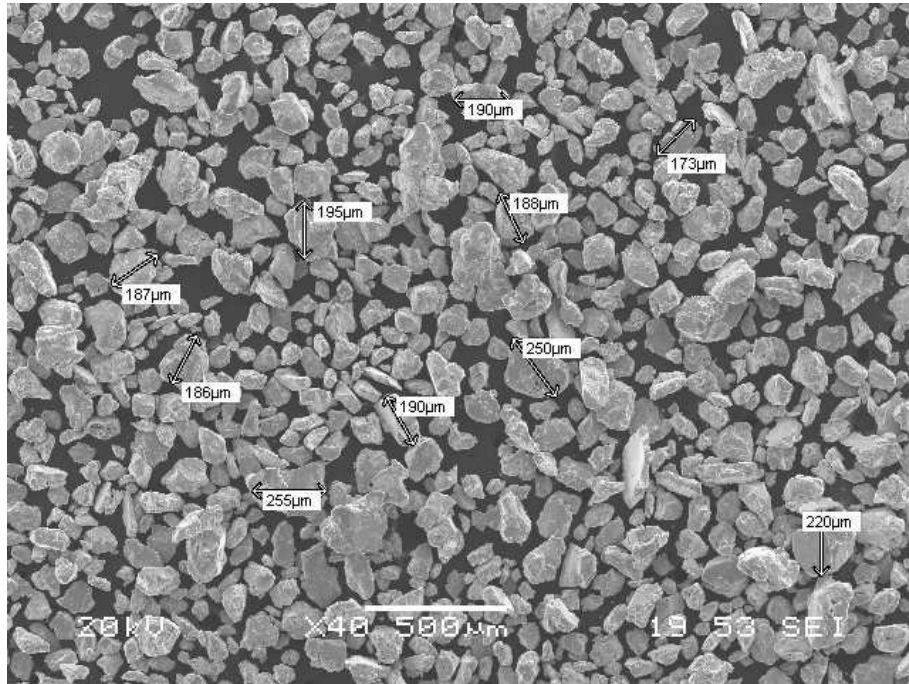


Resim 1.14. 6 saat MA'nmış ZA-12 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi



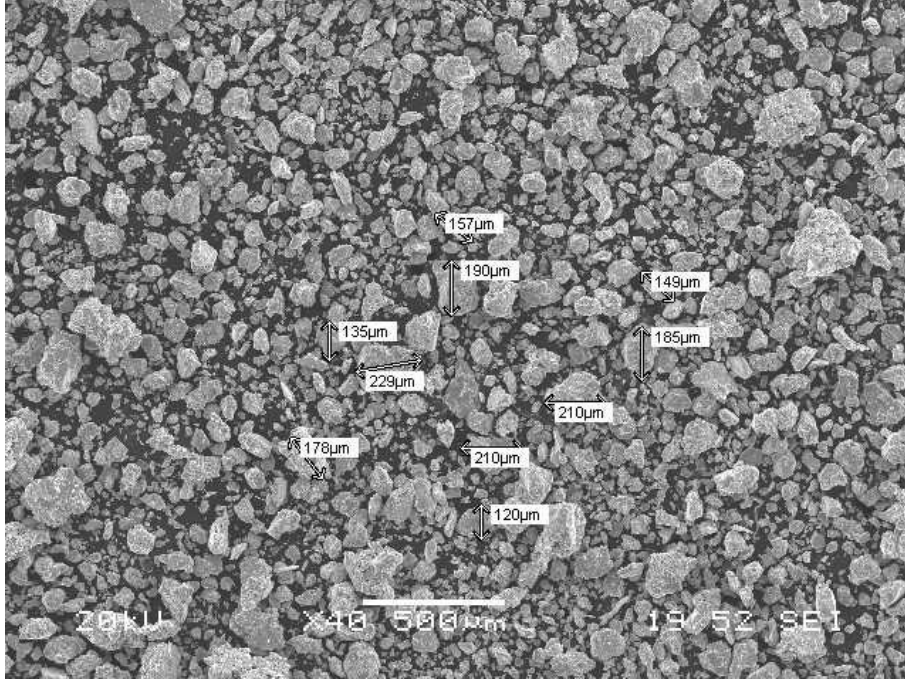
Resim 1.15. 7 saat MA'nmış ZA-12 alaşımların toz boyut karakterizasyonu



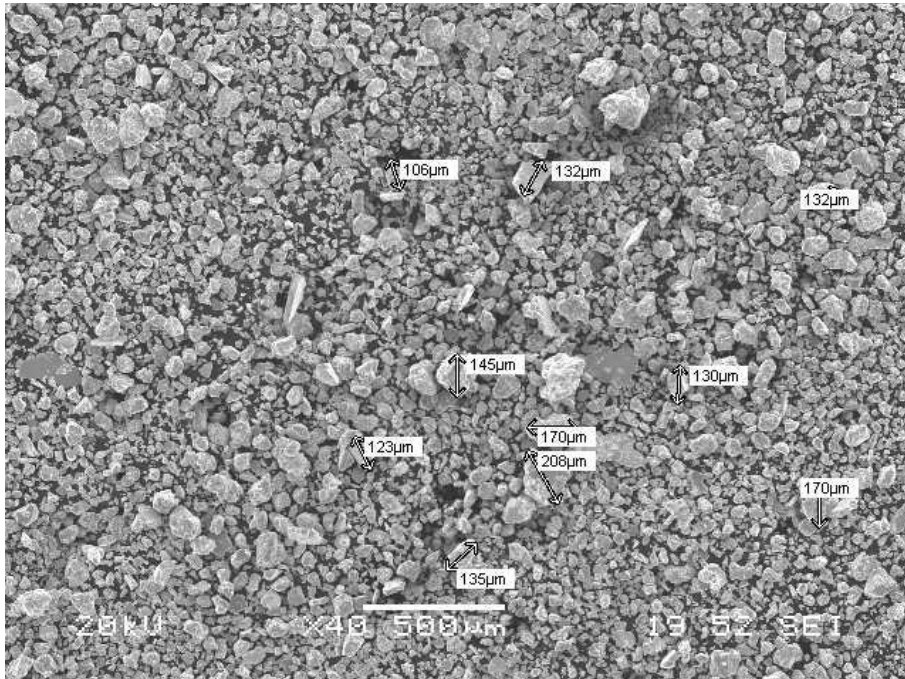
Resim 1.16. 8 saat MA'nmış ZA-12 alaşımların toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

ZA-27 Alaşımlarının Toz Boyut Karakterizasyonu

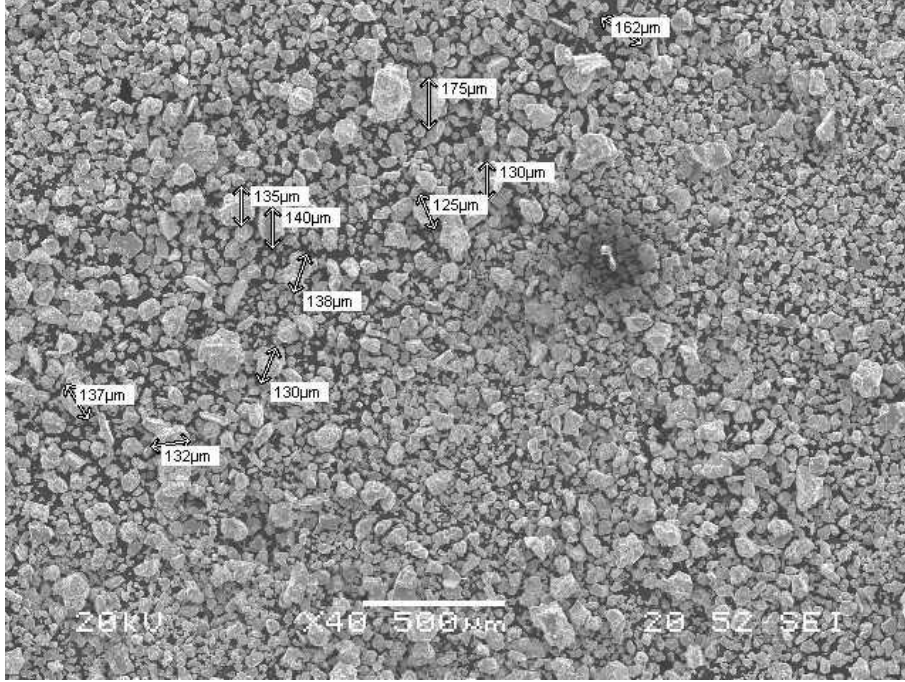


Resim 1.17. 1 saat MA'nmış ZA-27 alaşımlarının toz boyut karakterizasyonu

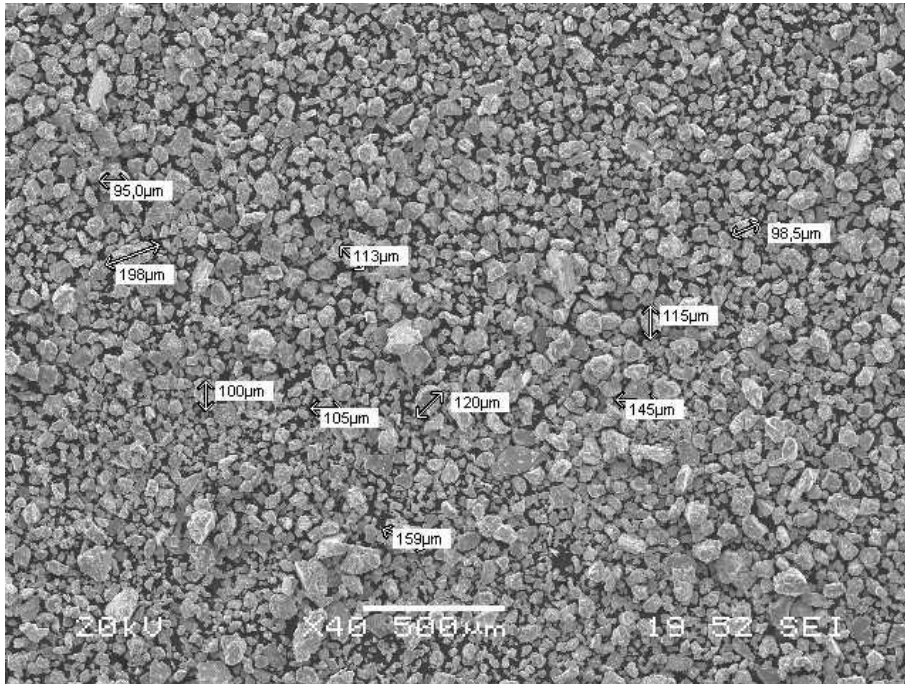


Resim 1.18. 2 saat MA'nmış ZA-27 alaşımlarının toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

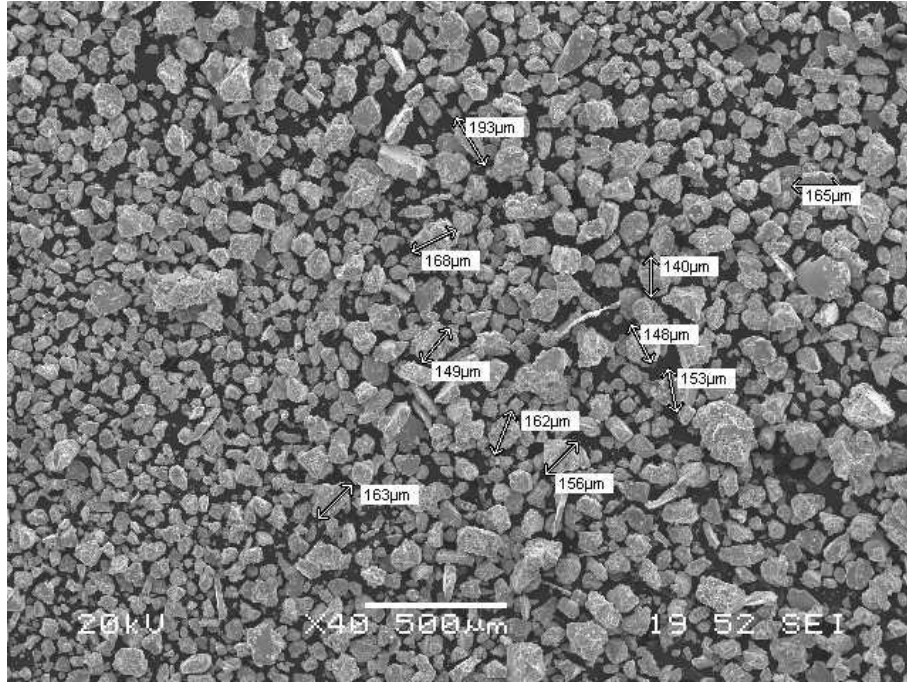


Resim 1.19. 3 saat MA'nmış ZA-27 alaşımların toz boyut karakterizasyonu

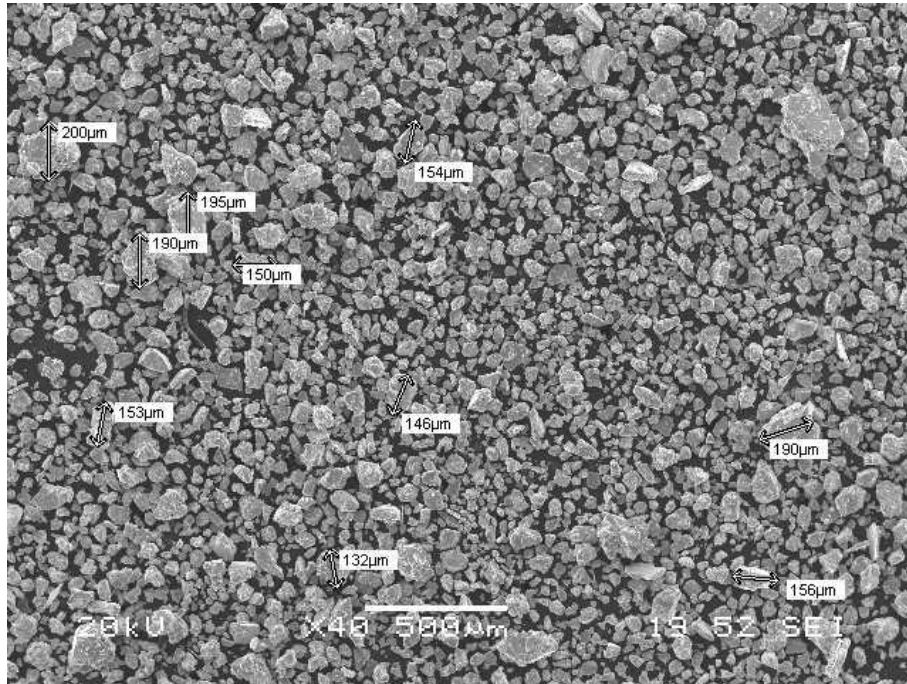


Resim 1.20. 4 saat MA'nmış ZA-27 alaşımların toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

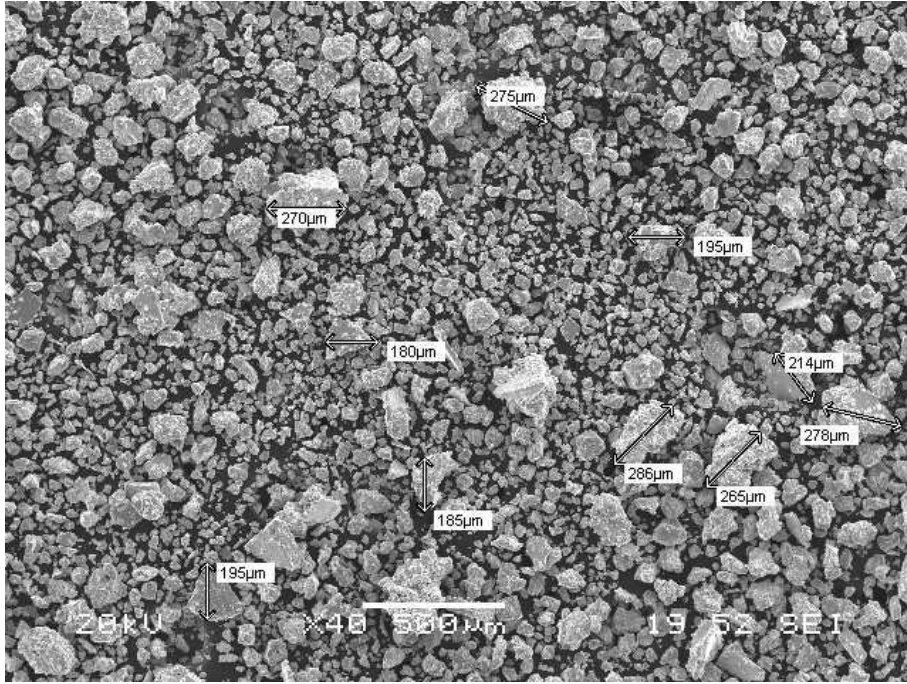


Resim 1.21. 5 saat MA'nmış ZA-27 alaşımların toz boyut karakterizasyonu

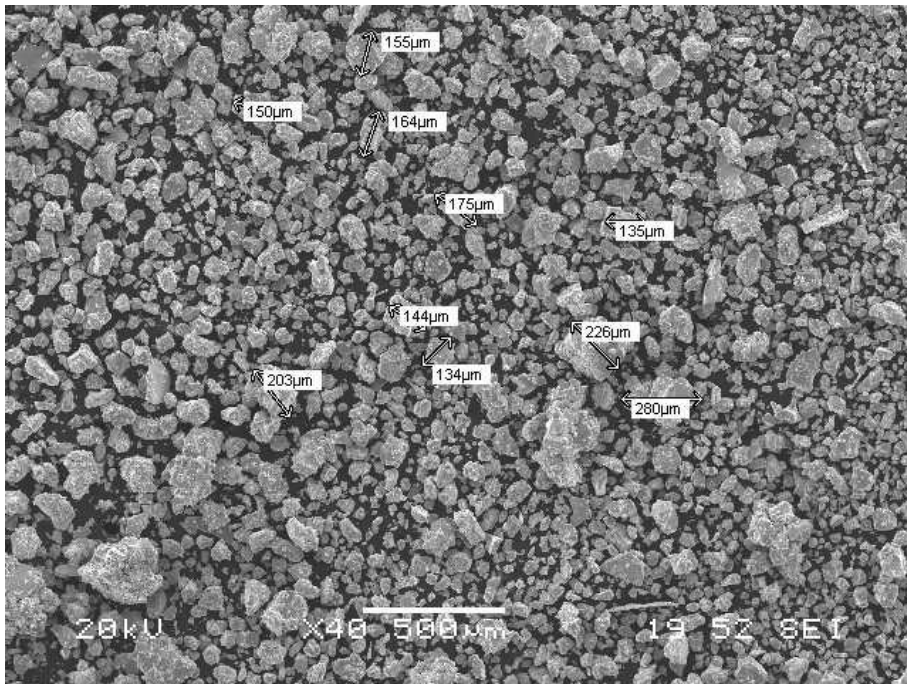


Resim 1.22. 6 saat MA'nmış ZA-27 alaşımların toz boyut karakterizasyonu

EK-1 (Devam) ZA Alaşımlarının Toz Boyut Analizi

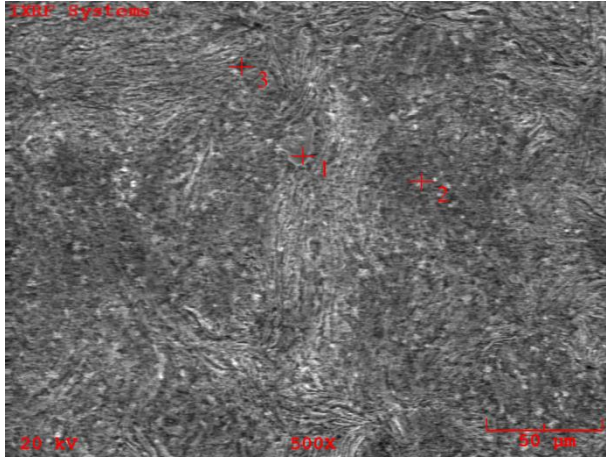


Resim 1.23. 7 saat MA'nmış ZA-27 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

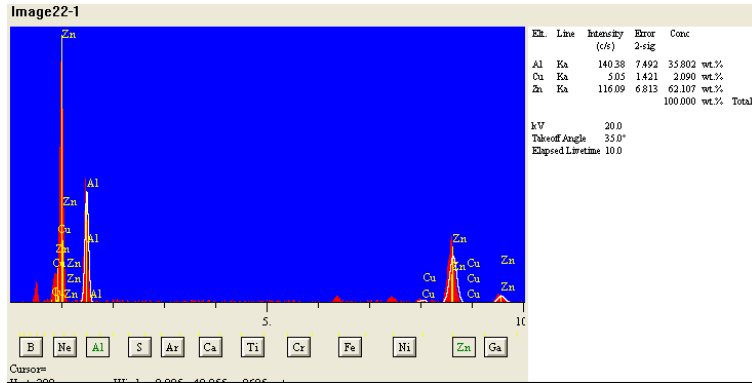


Resim 1.24. 8 saat MA'nmış ZA-27 alaşımın toz boyut karakterizasyonu

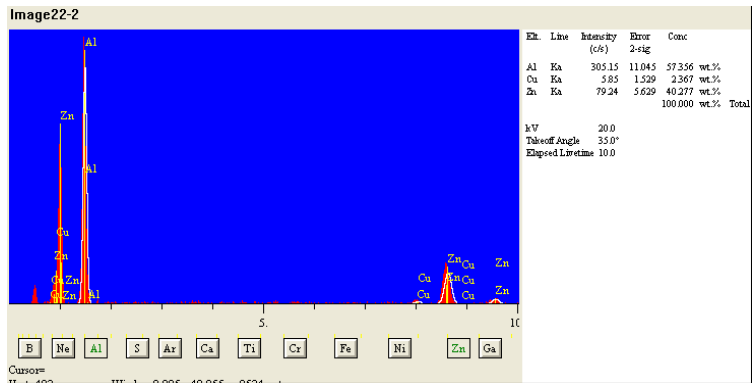
Ek-2 ZA-8 alaşımlarının eds sonuçları



Resim 2.1. 1 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsü

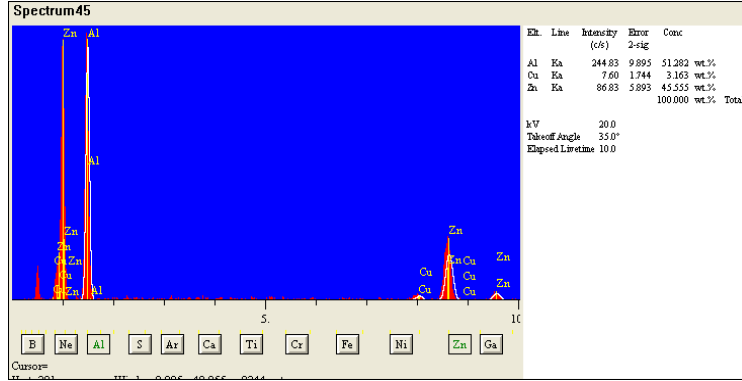


Resim 2.2. 1saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

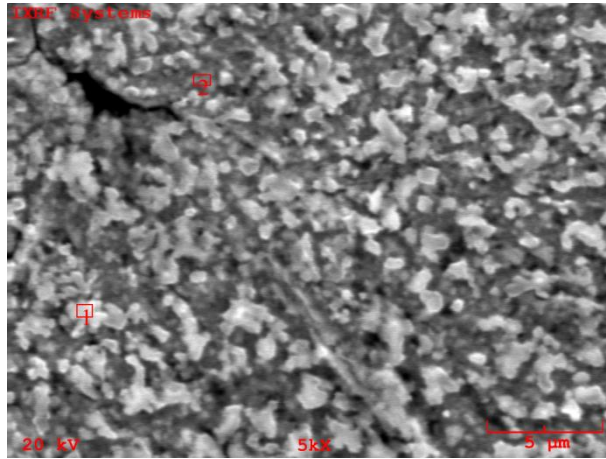


Resim 2.3. 1 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

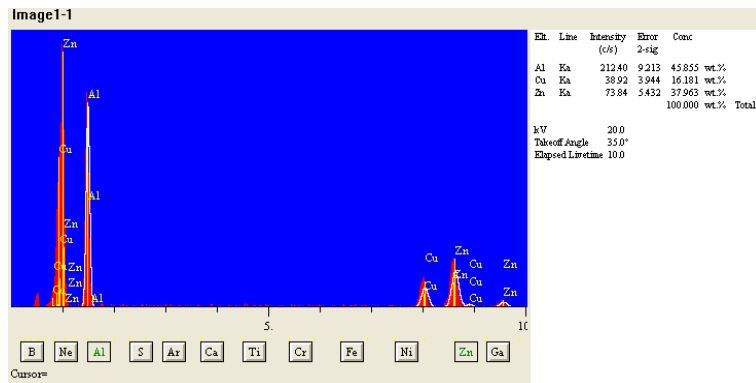
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.4. 1 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

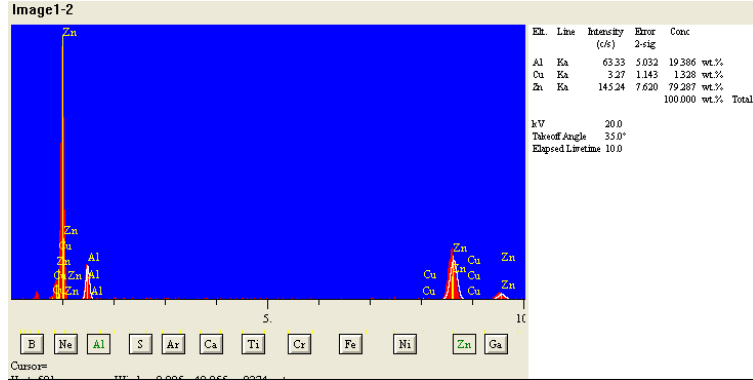


Resim 2.5. 2 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

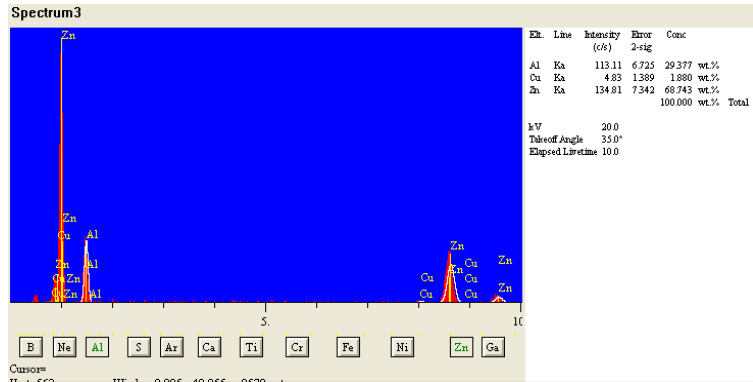


Resim 2.6. 2 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

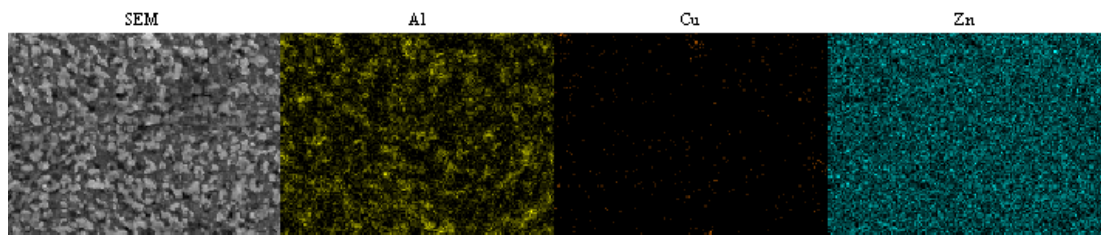
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.7. 2 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

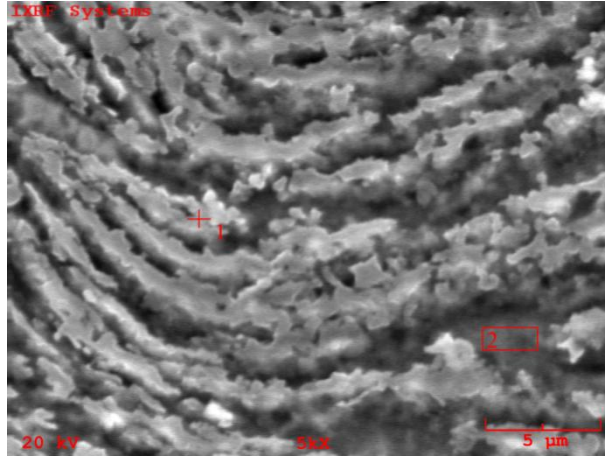


Resim 2.8. 2 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

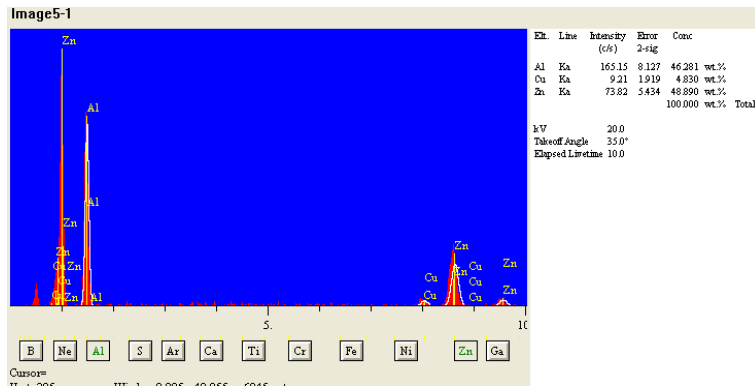


Resim 2.9. 2 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

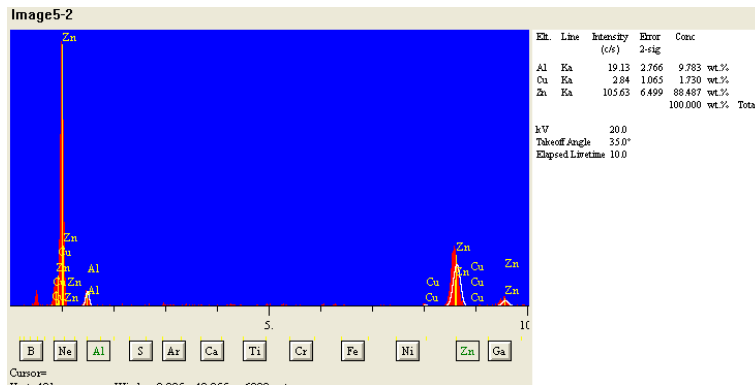
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.10. 3 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

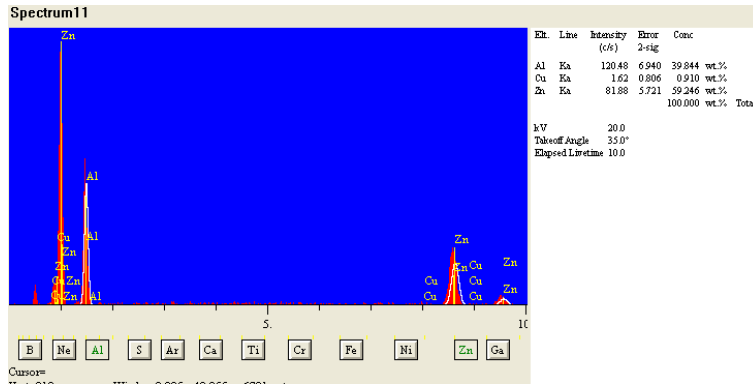


Resim 2.11. 3 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

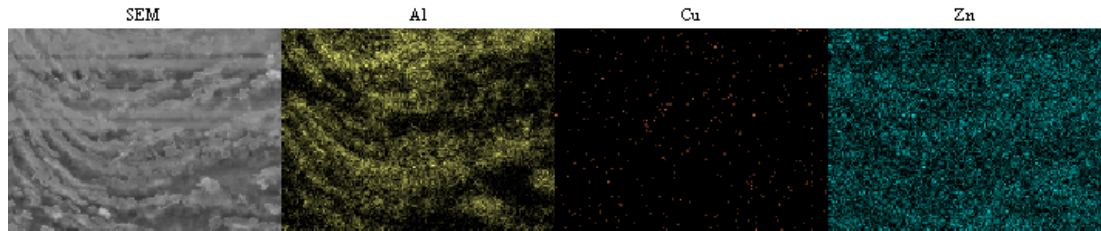


Resim 2.12. 3 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

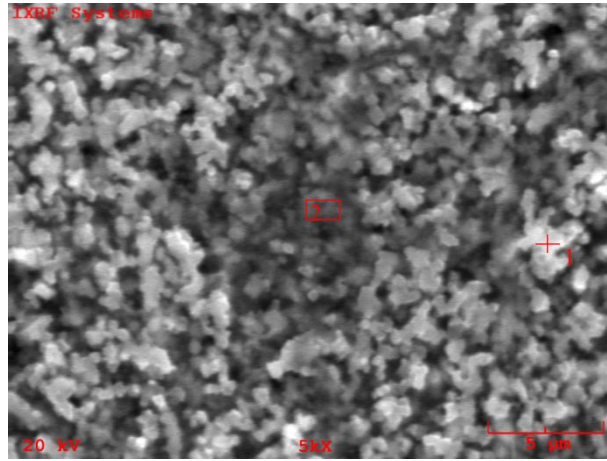
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.13. 3 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

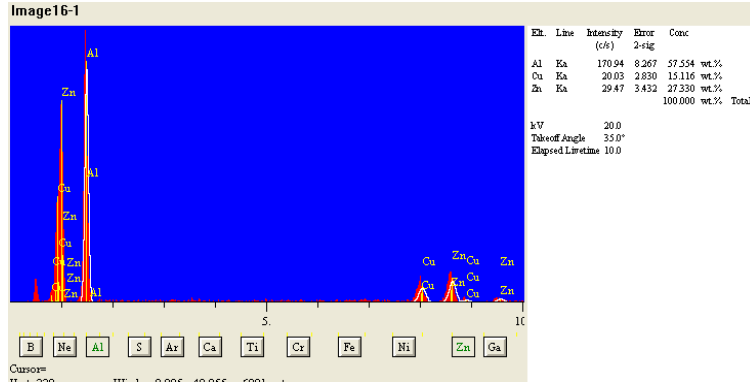


Resim 2.14. 3 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

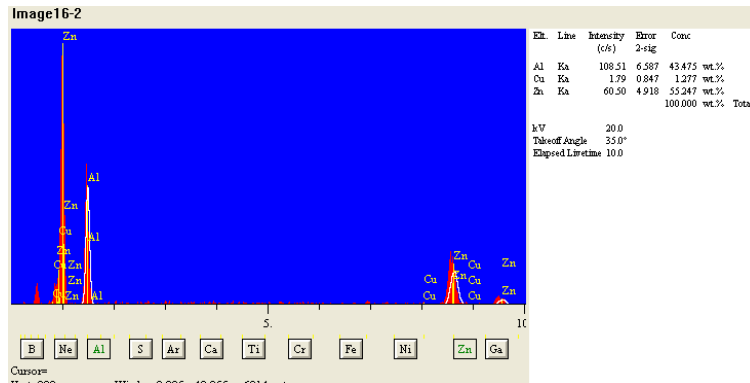


Resim 2.15. 5 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

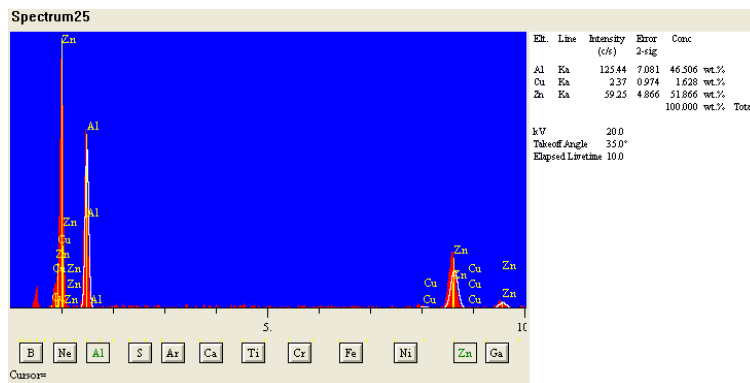
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.16. 5 saat MA'nımış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. Analiz

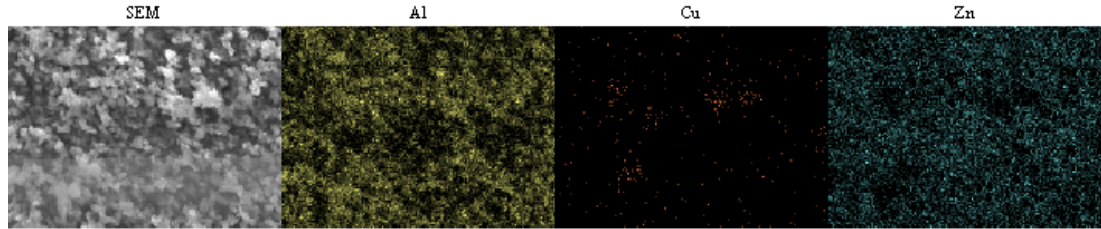


Resim 2.17. 5 saat MA'nımış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analiz

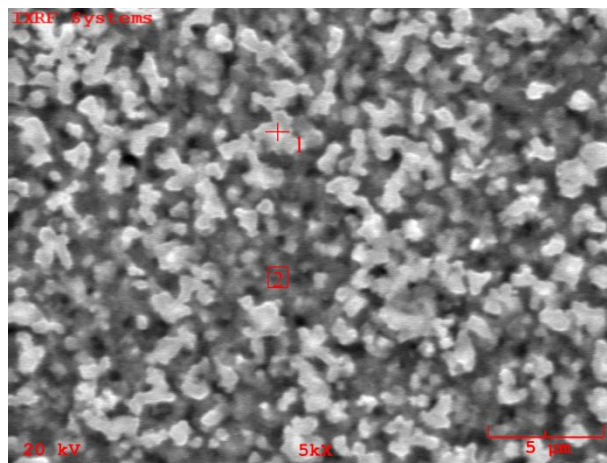


Resim 2.18. 5 saat MA'nımış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

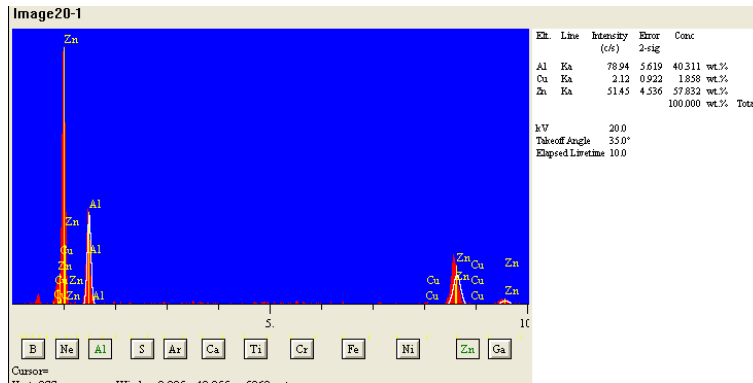
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.19. 5 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

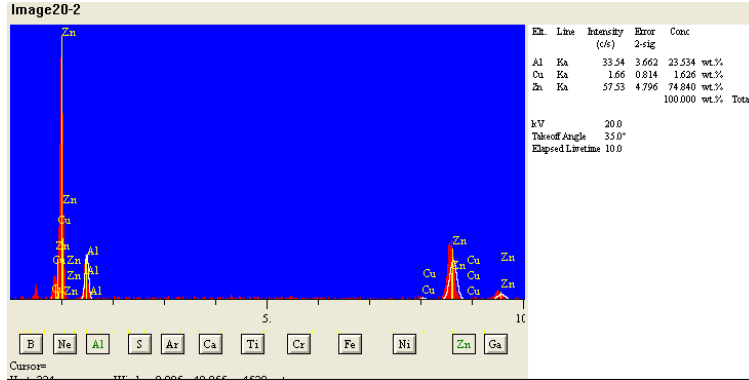


Resim 2.20. 6 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

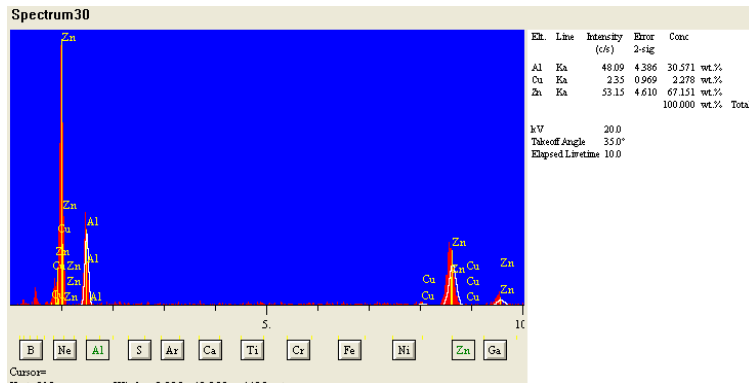


Resim 2.21. 6 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. Analiz

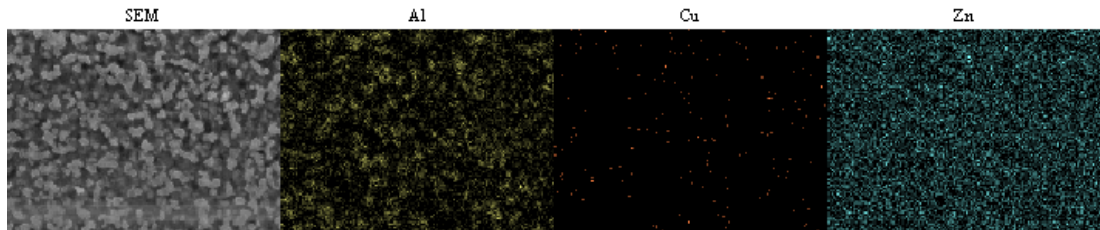
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.22. 6 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analiz

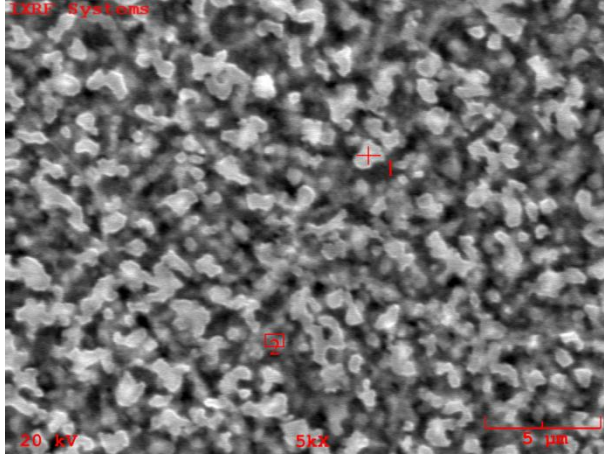


Resim 2.23. 6 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

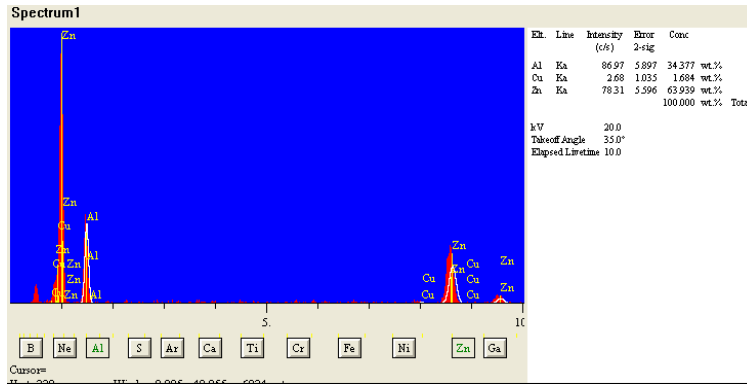


Resim 2.24. 6 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

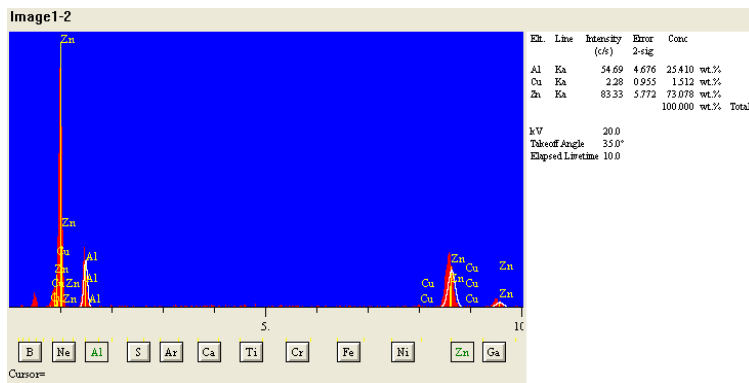
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımının eds sonuçları



Resim 2.25. 7 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

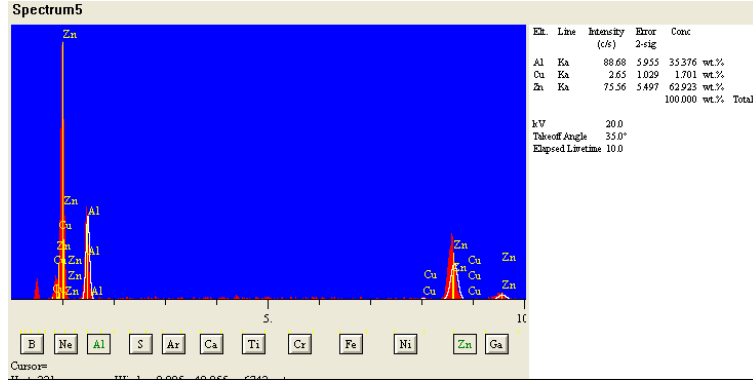


Resim 2.26. 7 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. Analiz

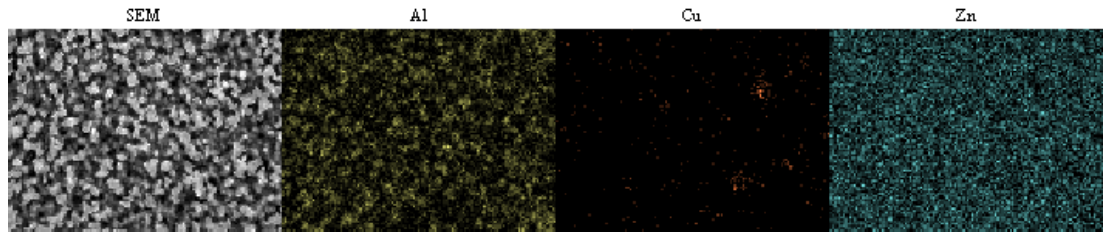


Resim 2.27. 7 saat MA'nmış ZA-8 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analiz

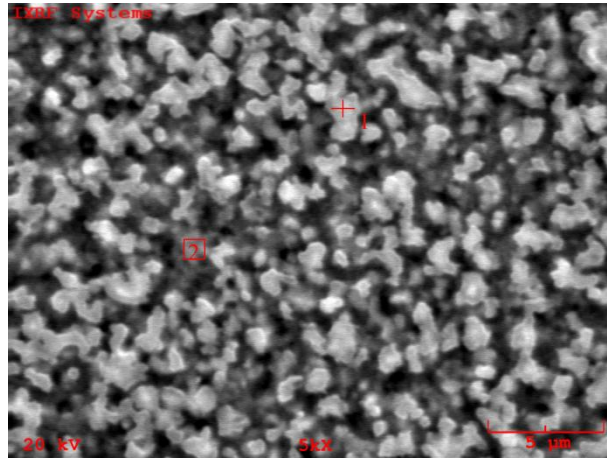
Ek-2 ZA-8 alaşımlarının eds sonuçları



Resim 2.28. 7 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

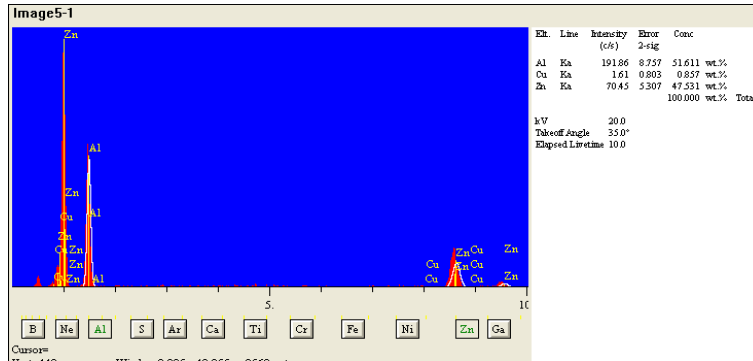


Resim 2.29. 7 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının Element Dağılım Haritalaması

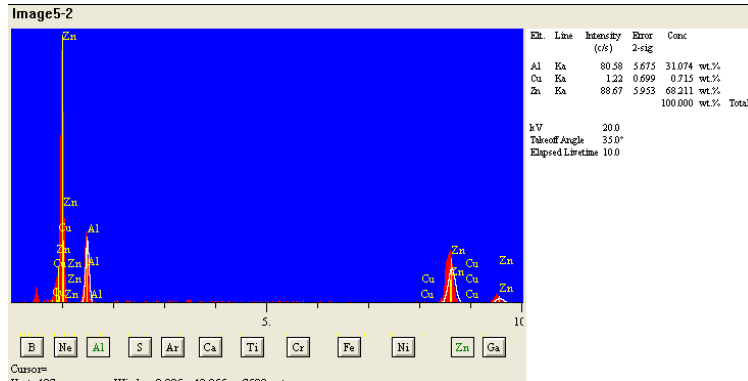


Resim 2.30. 8 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsü

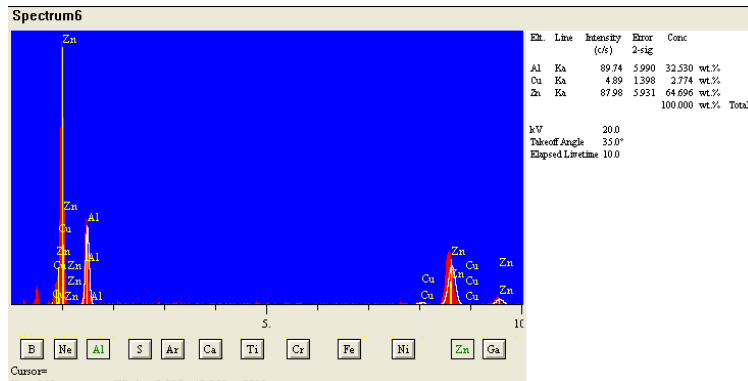
Ek-2 (Devam) ZA-8 alaşımlarının eds sonuçları



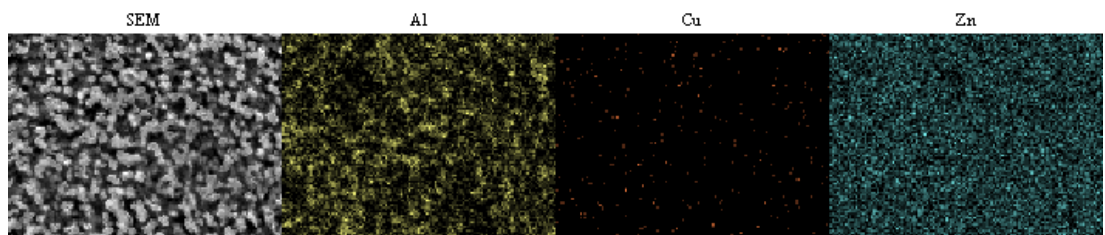
Resim 2.31. 8 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki 1. Analiz



Resim 2.32. 8 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analiz

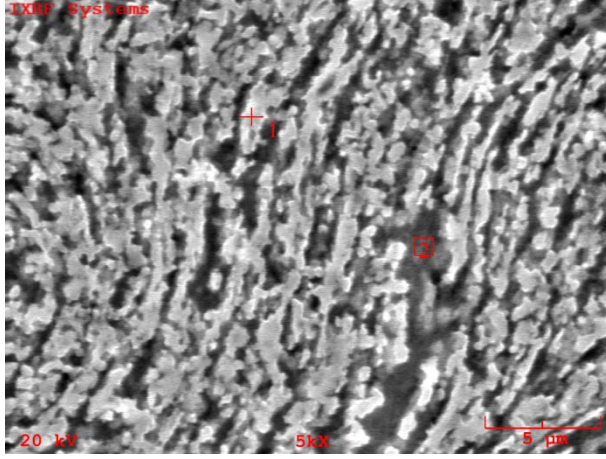


Resim 2.33. 8 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

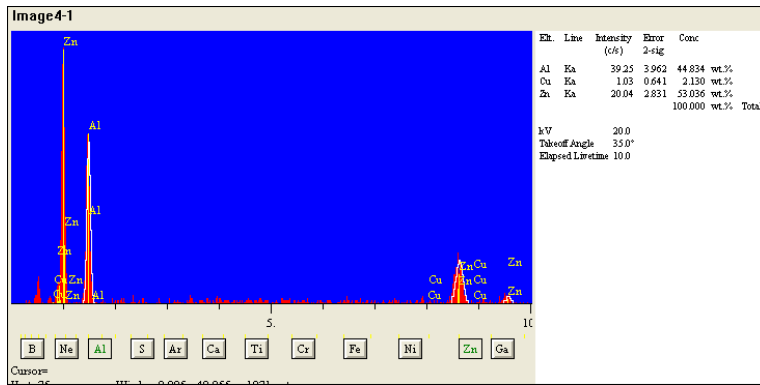


Resim 2.34. 8 saat MA'nmış ZA-8 alaşımlarının Element Dağılım Haritalaması

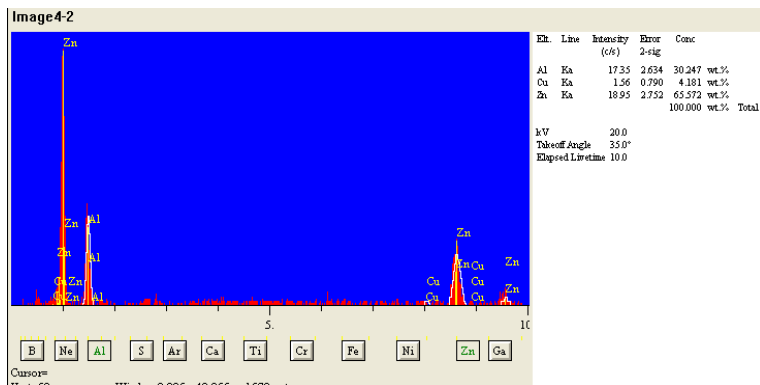
Ek-3 ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.1. 1 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

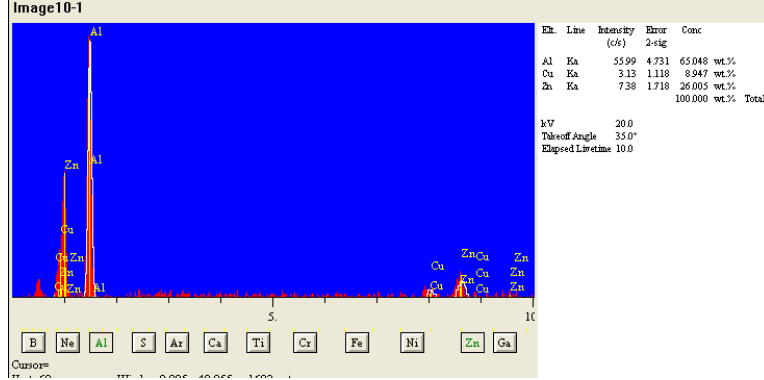


Resim 3.2. 1saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. Analiz

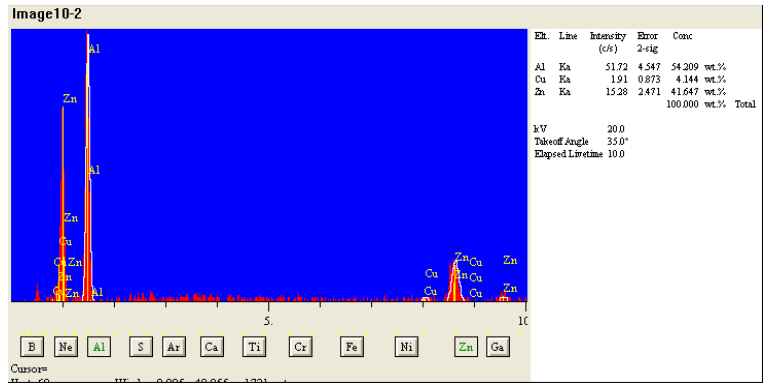


Resim 3.3. 1saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

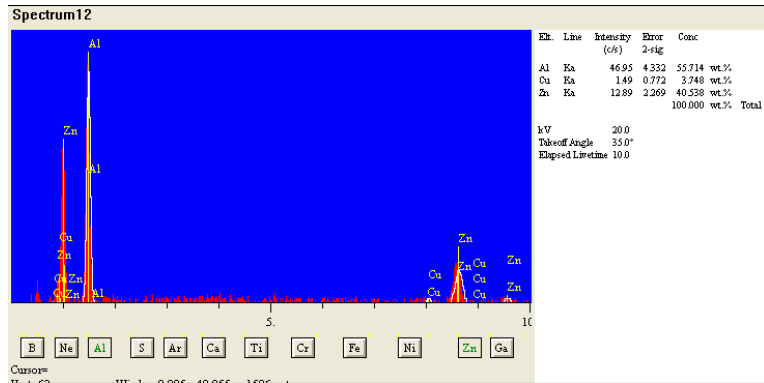
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.7. 2 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analizi

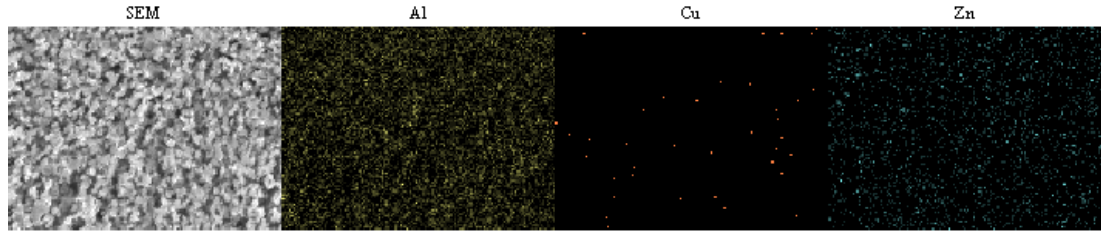


Resim 3.8. 2 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analiz

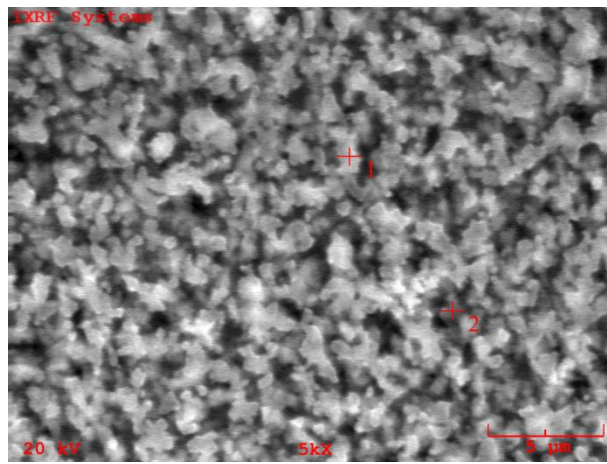


Resim 3.9. 2 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

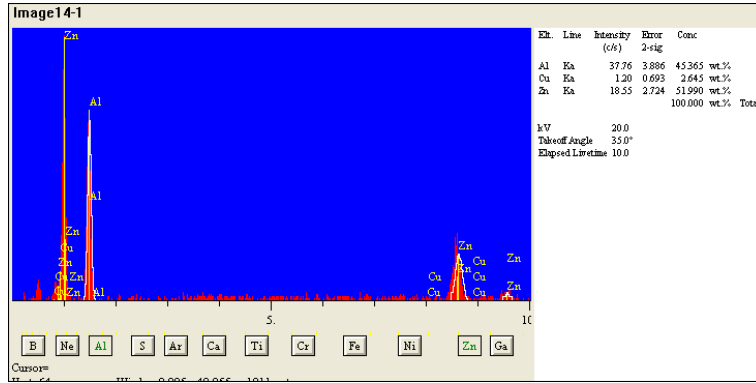
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.10. 2 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

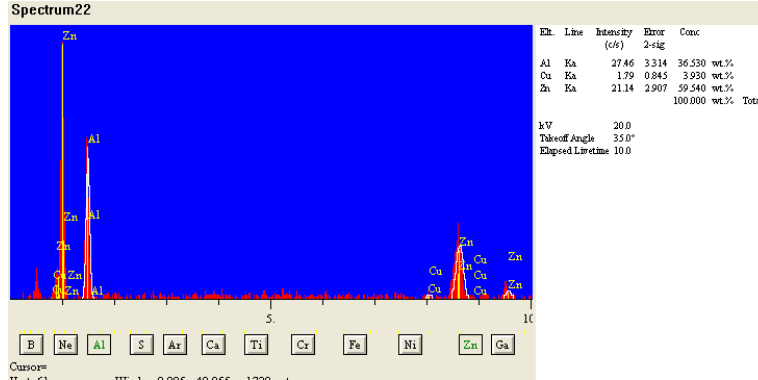


Resim 3.11. 3 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

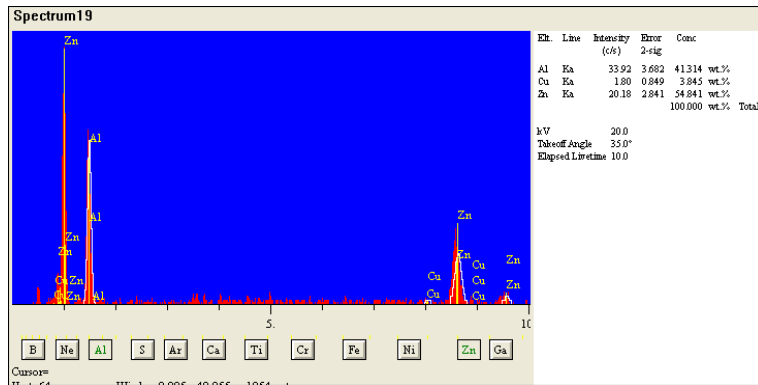


Resim 3.12. 3 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

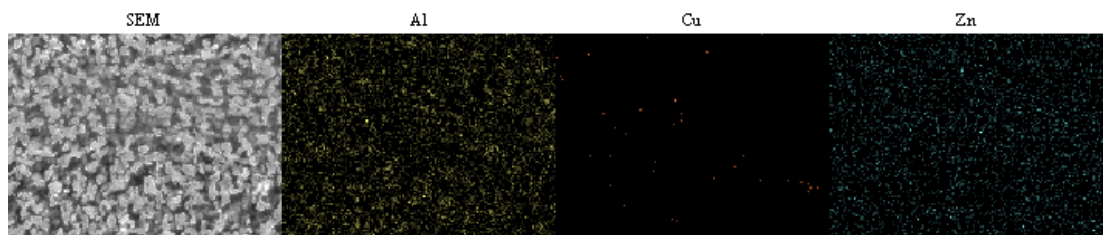
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımlarının eds sonuçları



Resim 3.13. 3 saat MA'nmış ZA-12 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

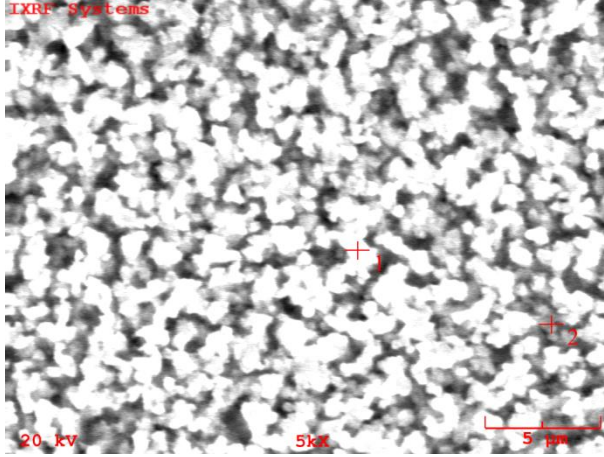


Resim 3.14. 3 saat MA'nmış ZA-12 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

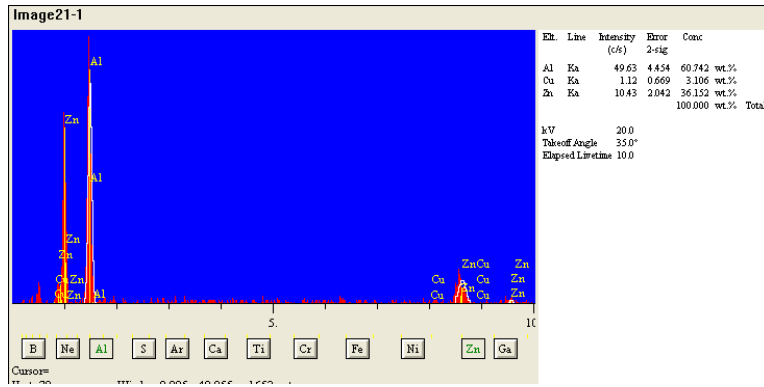


Resim 3.15. 3 saat MA'nmış ZA-12 alaşımlarının Element Dağılım Haritalaması

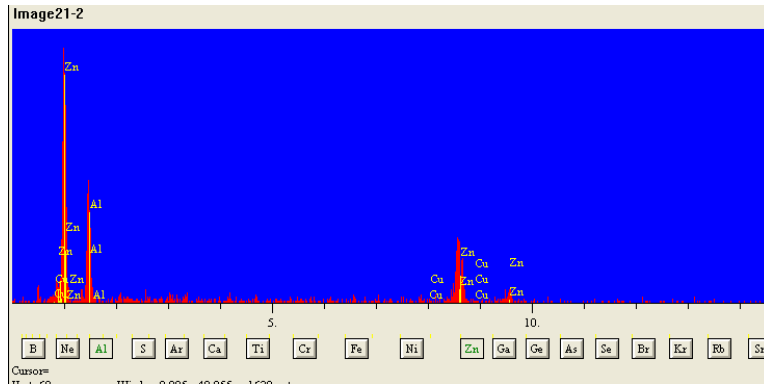
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.16. 5 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

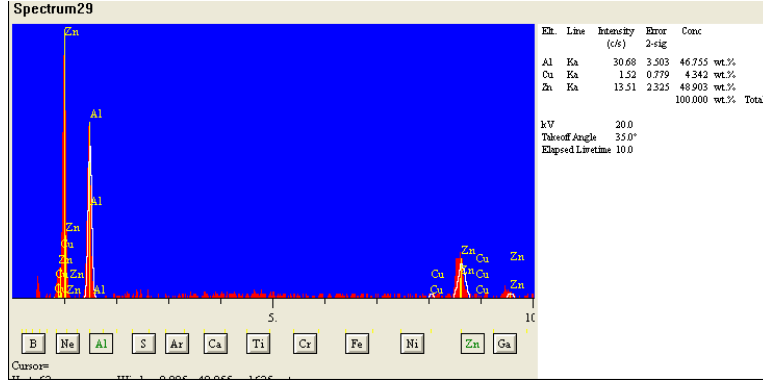


Resim 3.17. 5 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

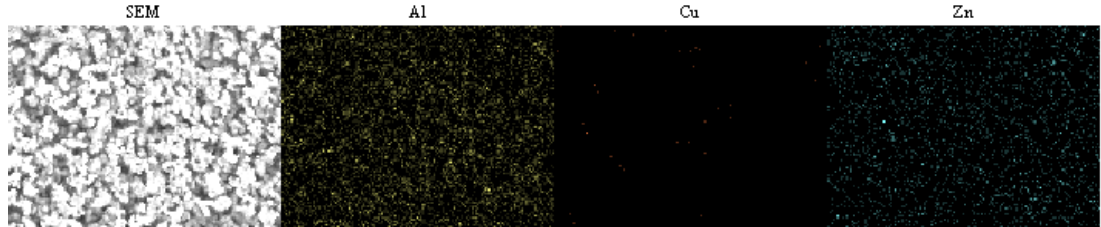


Resim 3.18. 5 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analiz

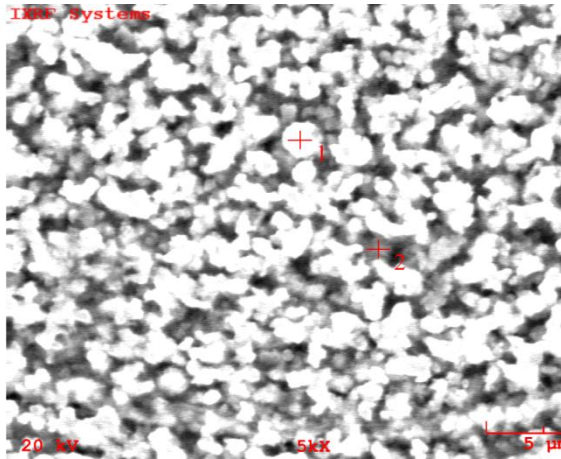
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.19. 5 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

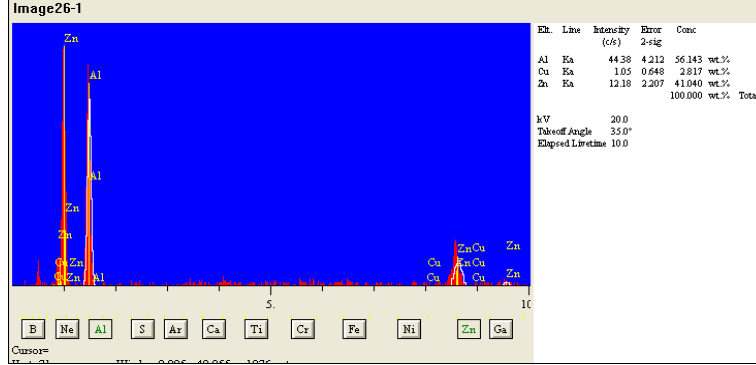


Resim 3.20. 5 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

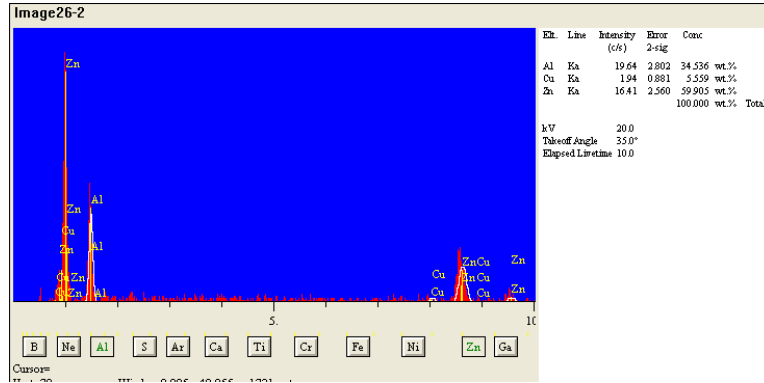


Resim 3.21. 6 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

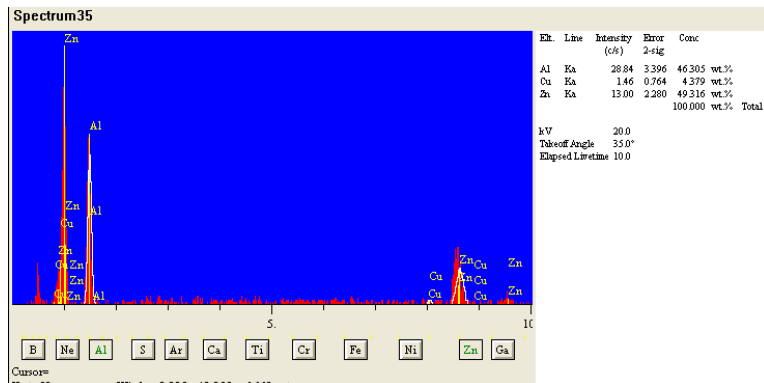
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.22. 6 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

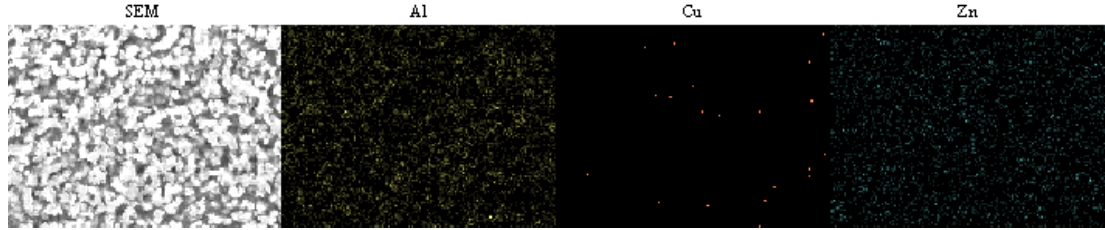


Resim 3.23. 6 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

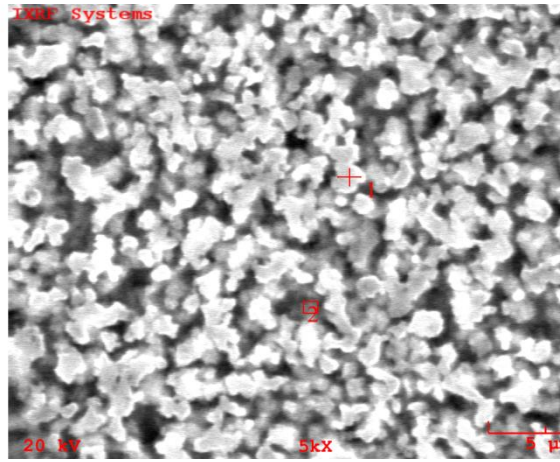


Resim 3.24. 6 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

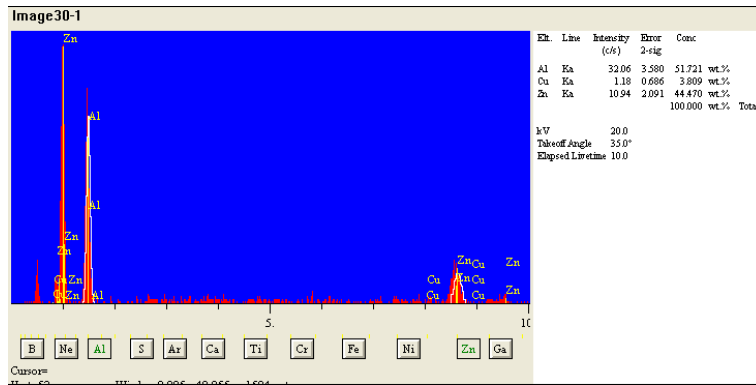
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.25. 6 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

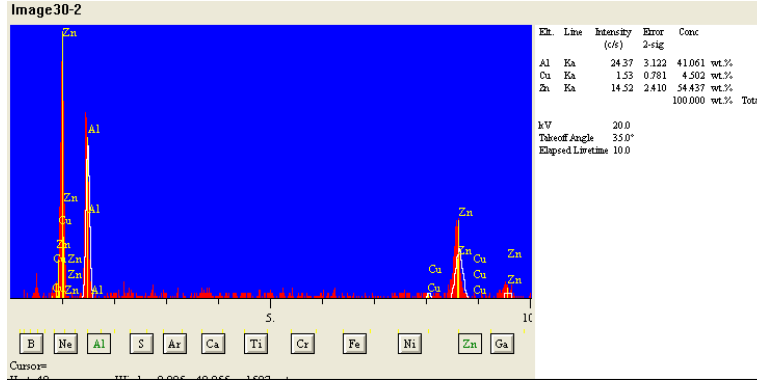


Resim 3.26. 7 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

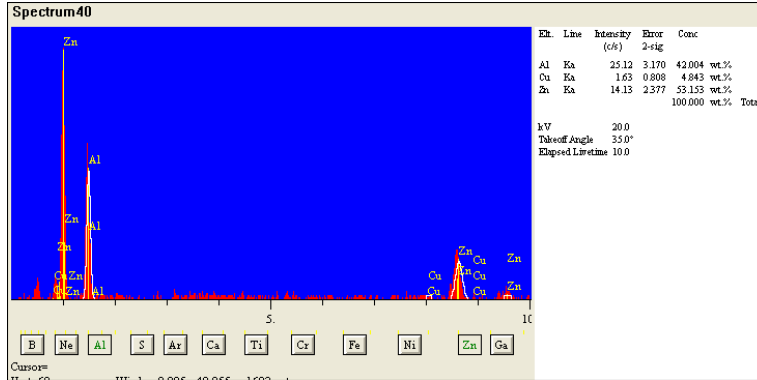


Resim 3.27. 7 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

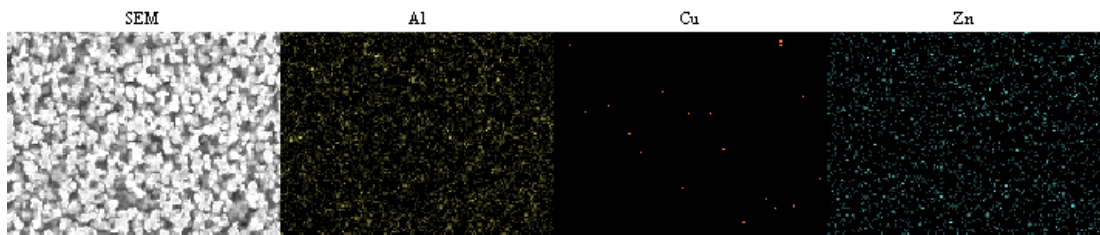
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.28. 7 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analiz

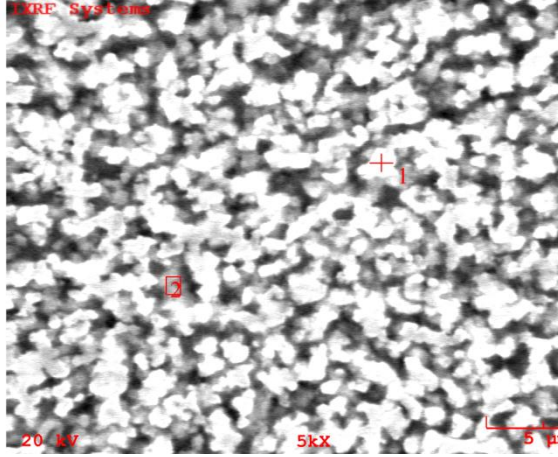


Resim 3.29. 7 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

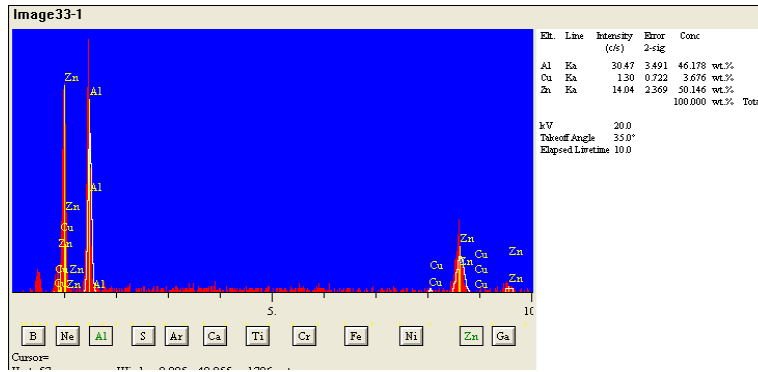


Resim 3.30. 7 saat MA'nımış ZA-12 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

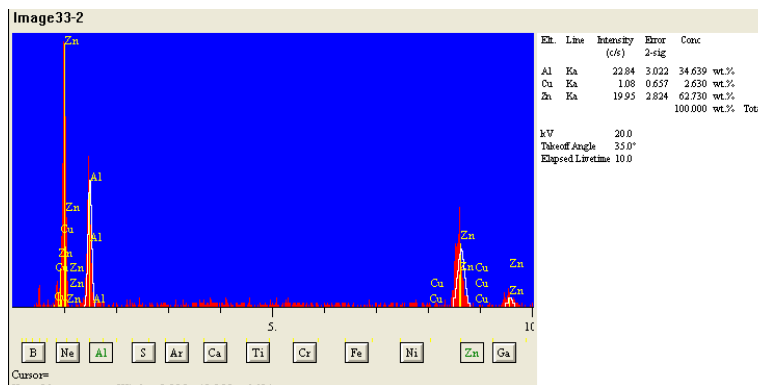
Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları



Resim 3.31. 8 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

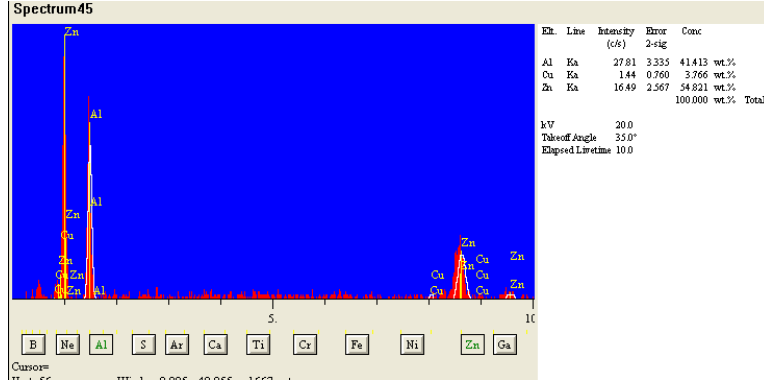


Resim 3.32. 8 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

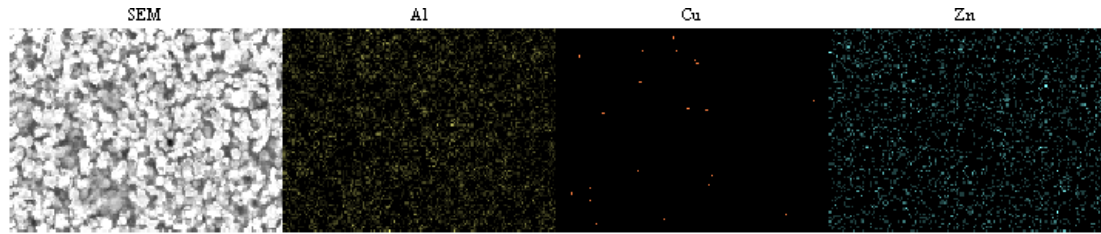


Resim 3.33. 8 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

Ek-3 (Devam) ZA-12 alaşımının eds sonuçları

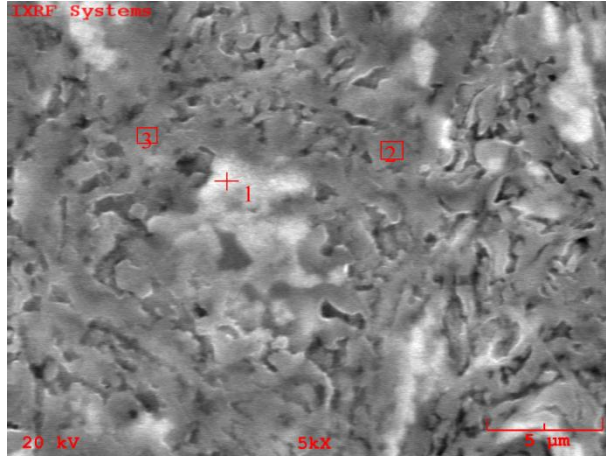


Resim 3.34. 8 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

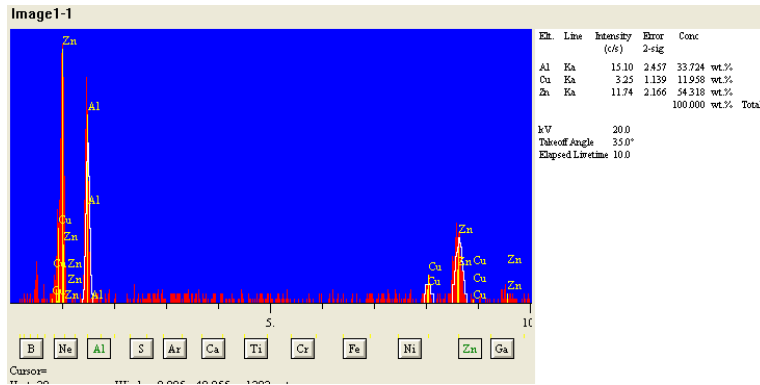


Resim 3.35. 8 saat MA'nmış ZA-12 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

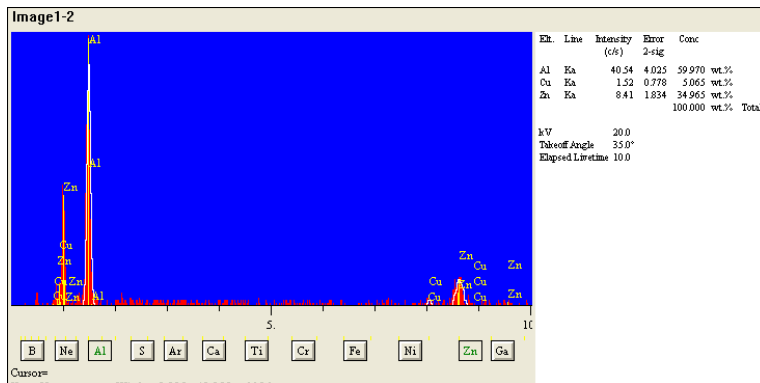
Ek-4 ZA-27 alaşımlarının eds sonuçları



Resim 4.1. 1 saat MA'nmış ZA-27 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsü

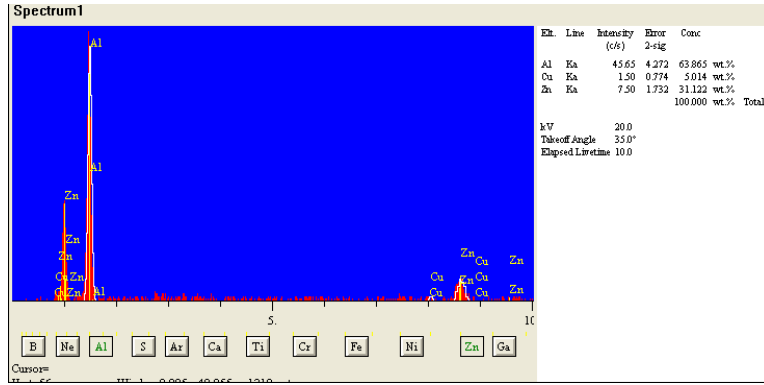


Resim 4.2. 1 saat MA'nmış ZA-27 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

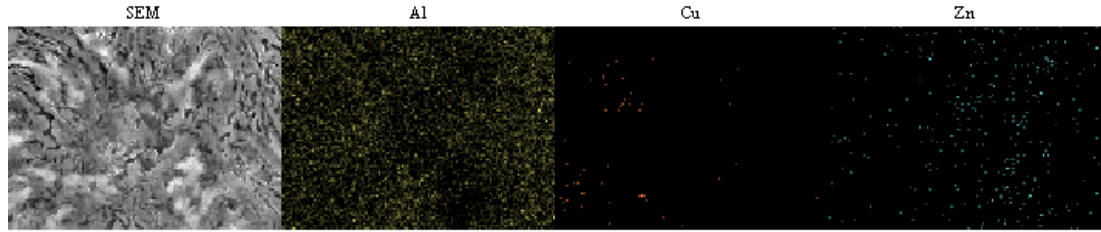


Resim 4.3. 1 saat MA'nmış ZA-27 alaşımlarının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

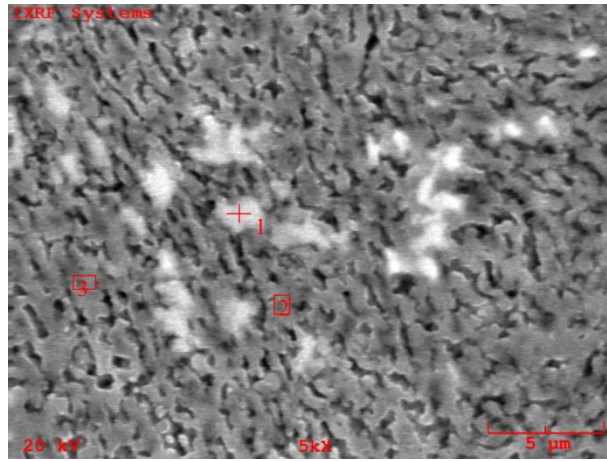
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.4. 1 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

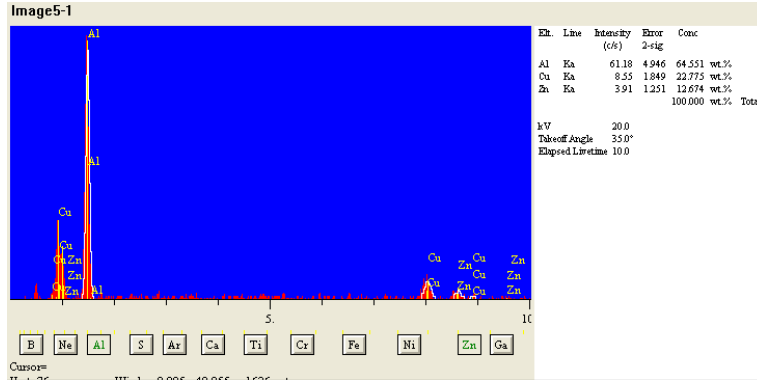


Resim 4.5. 1 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

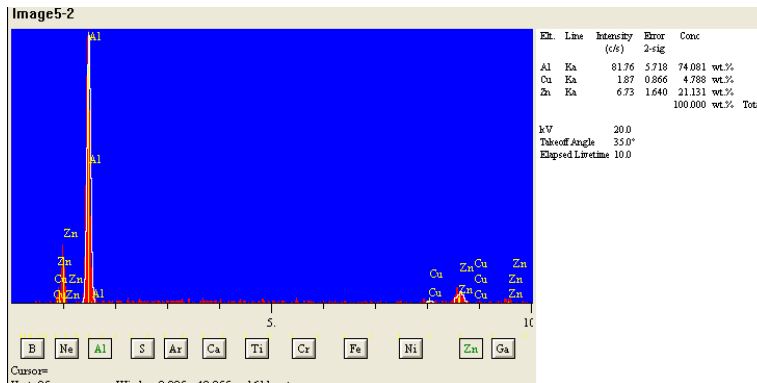


Resim 4.6. 2 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

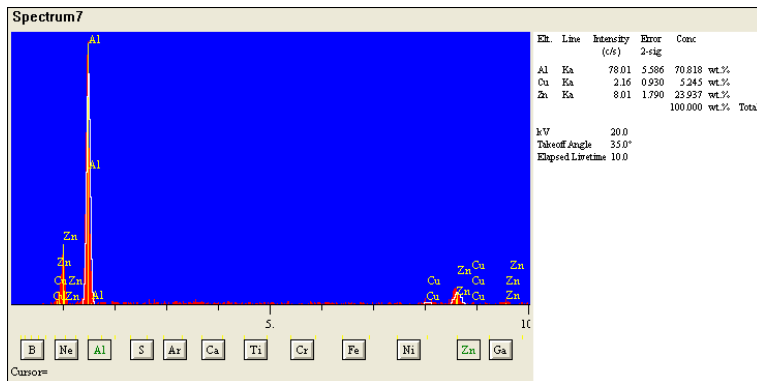
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.7. 2saat MA'nımış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

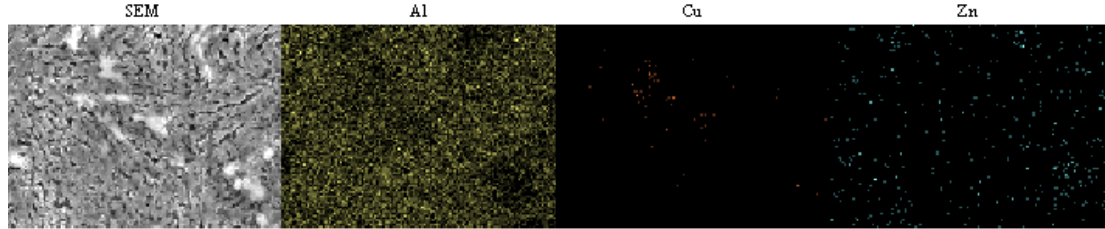


Resim 4.8. 2 saat MA'nımış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

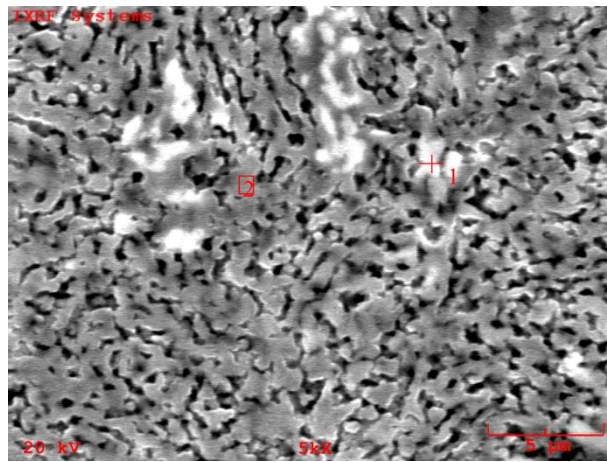


Resim 4.9. 2 saat MA'nımış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel analiz

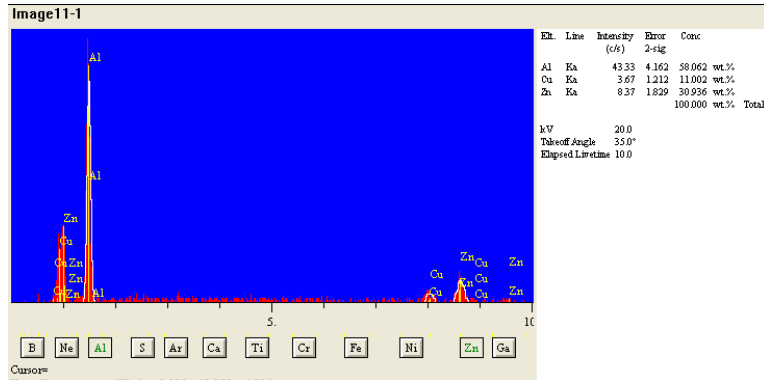
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.10. 2 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

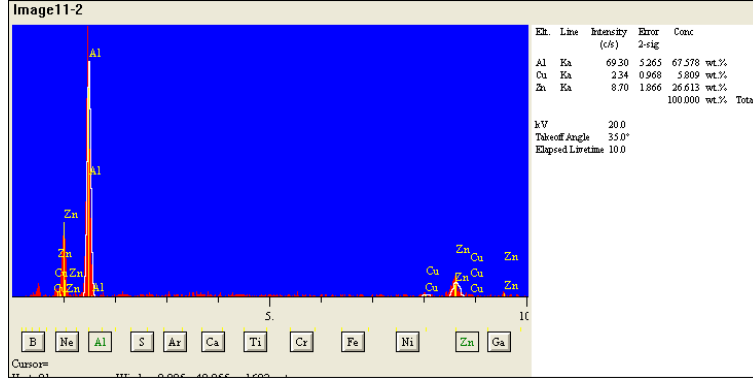


Resim 4.11. 3 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

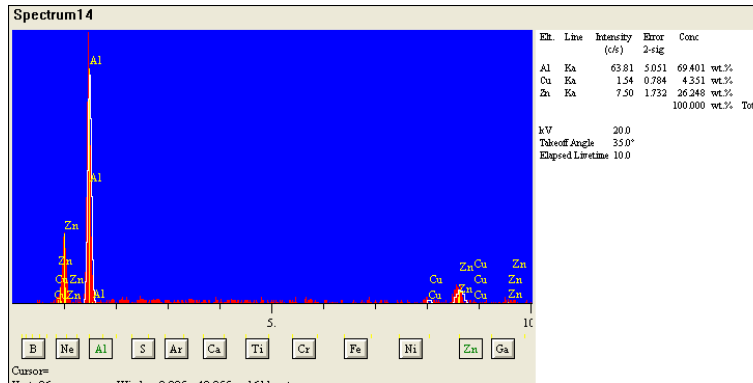


Resim 4.12. 3 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analiz

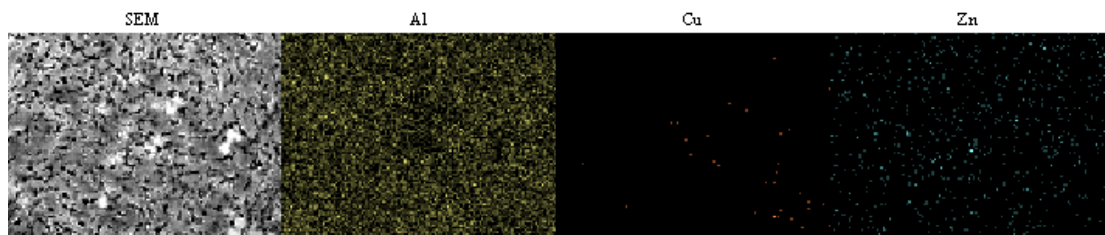
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.13. 3 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analiz

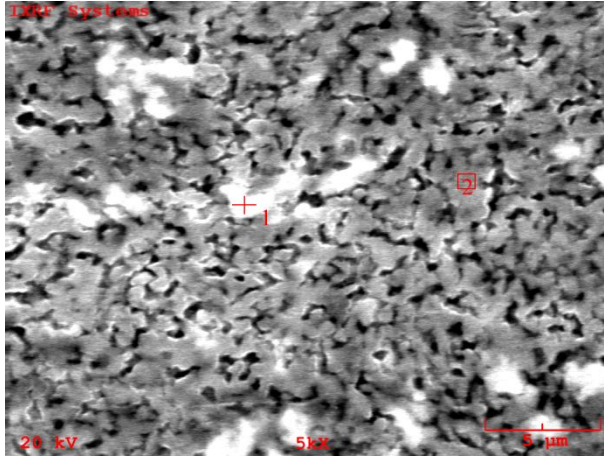


Resim 4.14. 3 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel

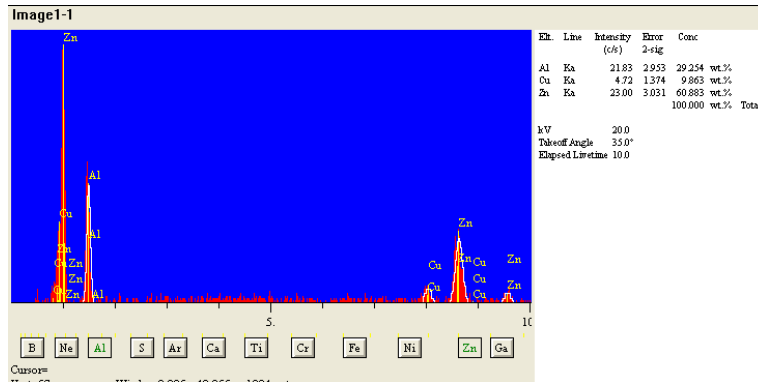


Resim 4.15. 3 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

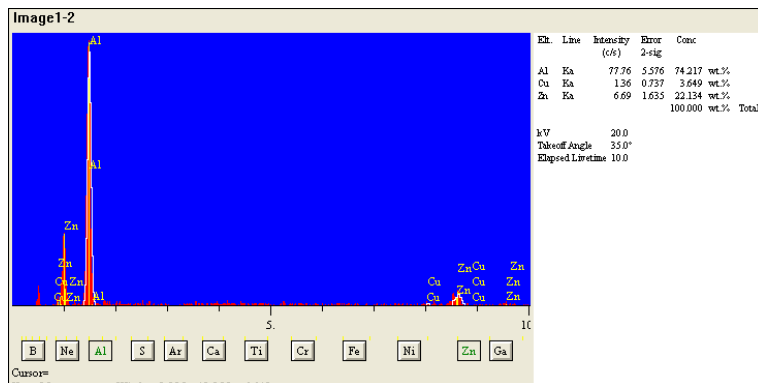
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.16. 5 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

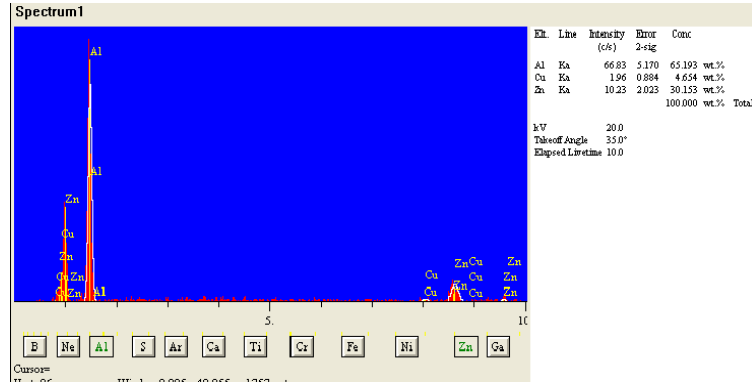


Resim 4.17. 5 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analizi

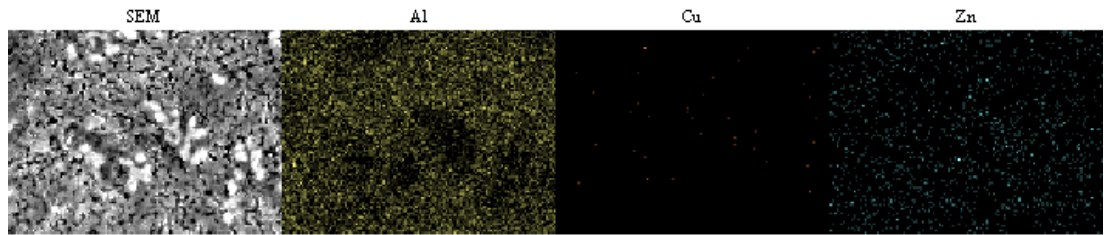


Resim 4.18. 5 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analizi

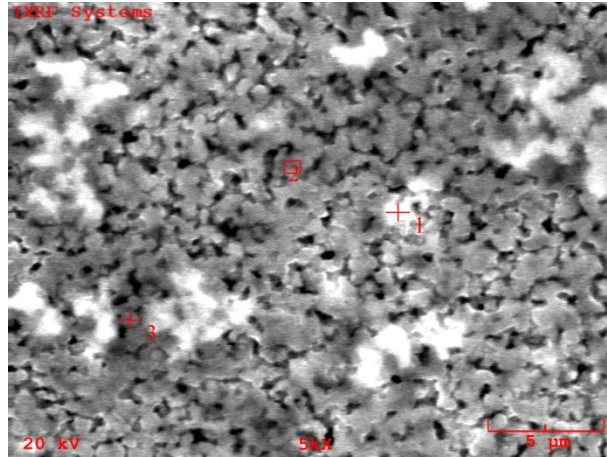
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.19. 5 saat MA'nımış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel

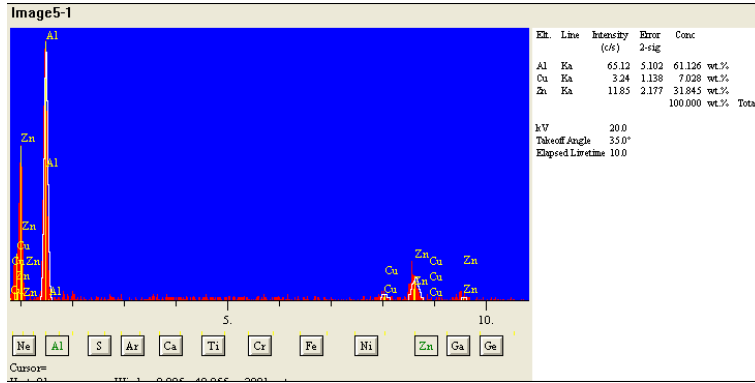


Resim 4.20. 5 saat MA'nımış ZA-27 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

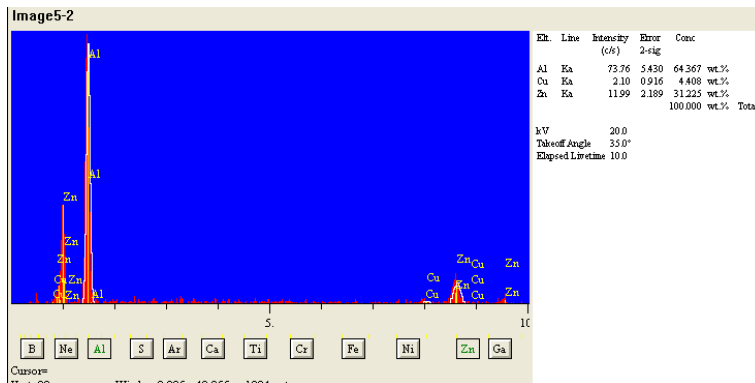


Resim 4.21. 6 saat MA'nımış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

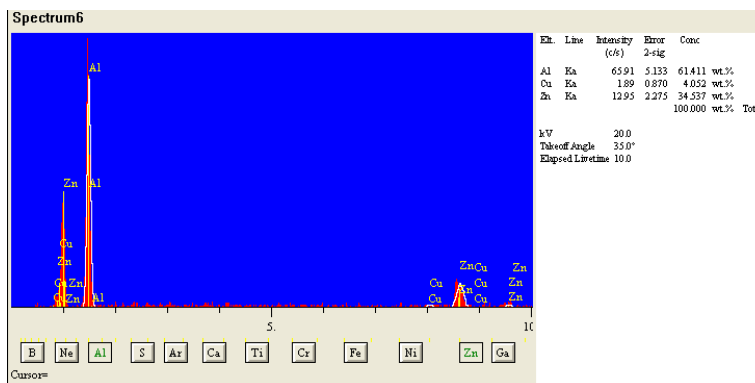
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.22. 6 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analizi

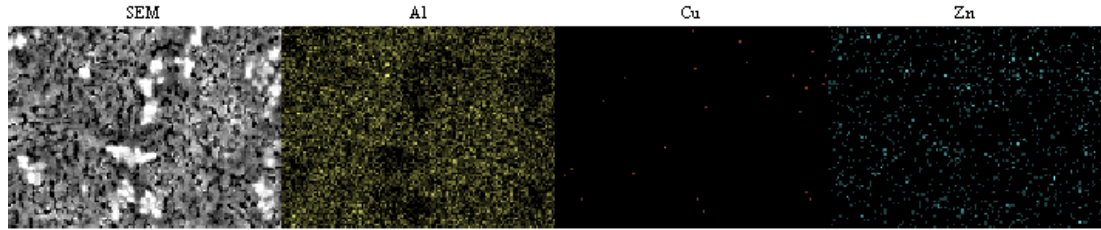


Resim 4.23. 6 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analizi

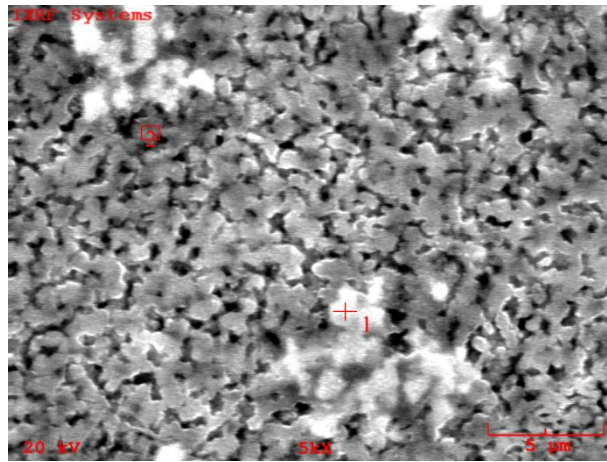


Resim 4.24. 6 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel

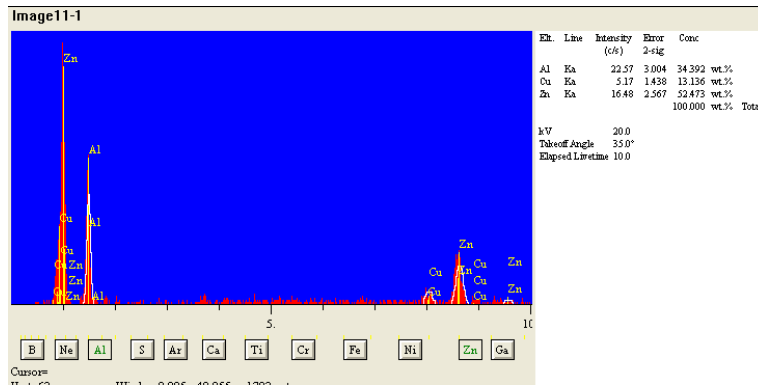
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.25. 6 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

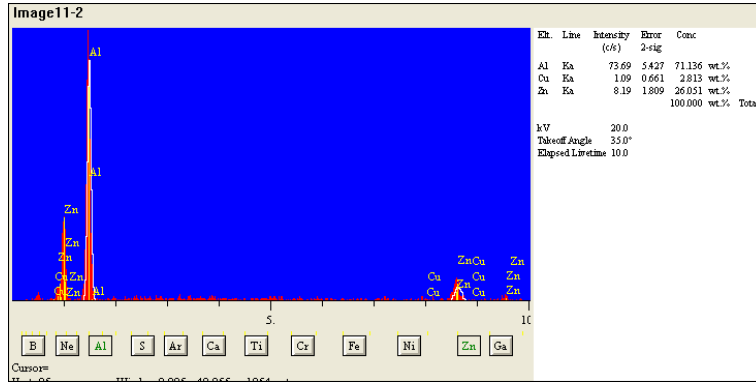


Resim 4.26. 7 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

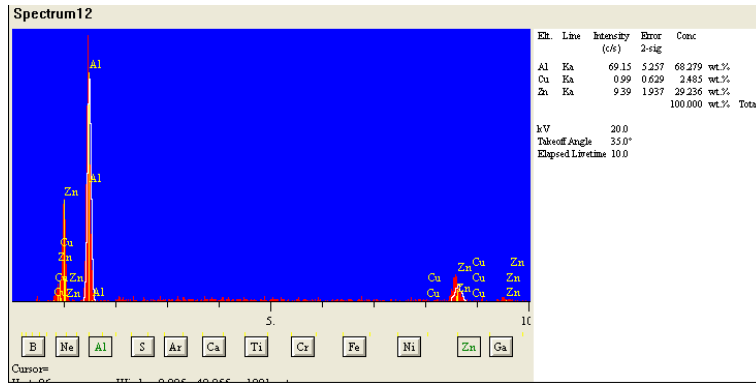


Resim 4.27. 7 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. Analizi

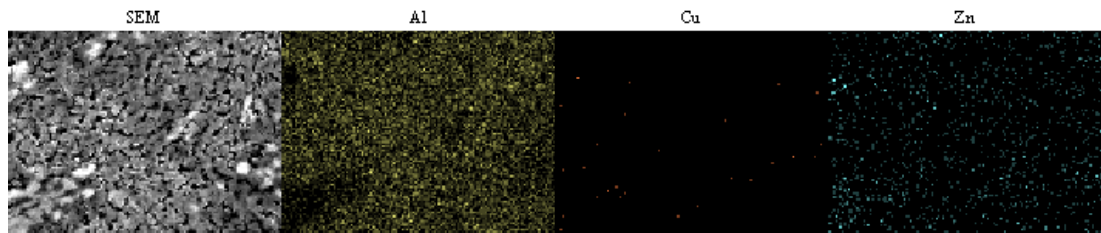
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.28. 7 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. analizi

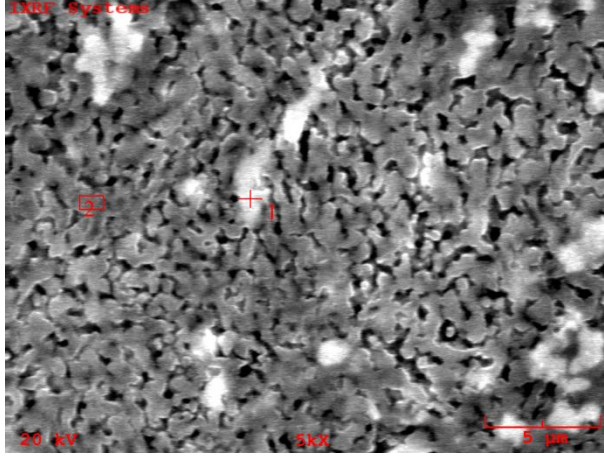


Resim 4.29. 7 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel

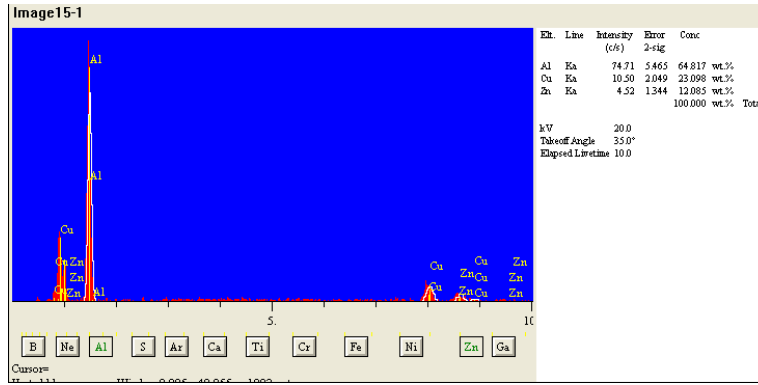


Resim 4.30. 7 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

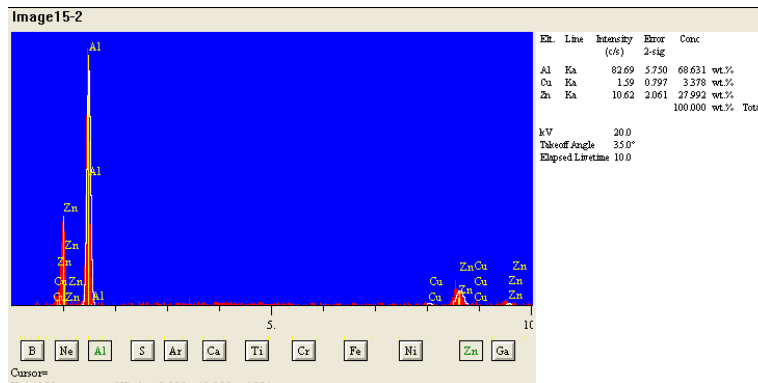
Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.31. 8 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsü

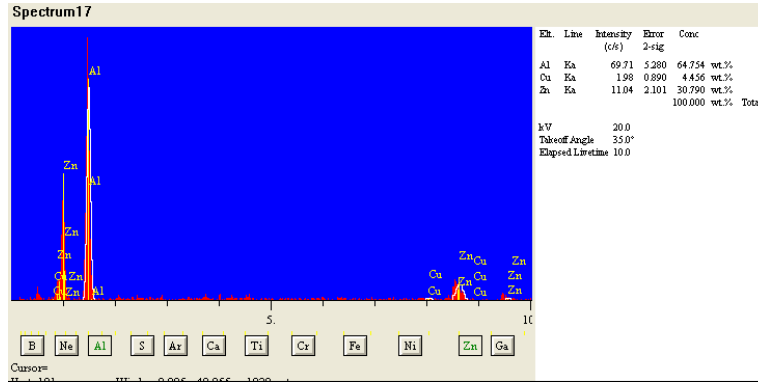


Resim 4.32. 8 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 1. analizi

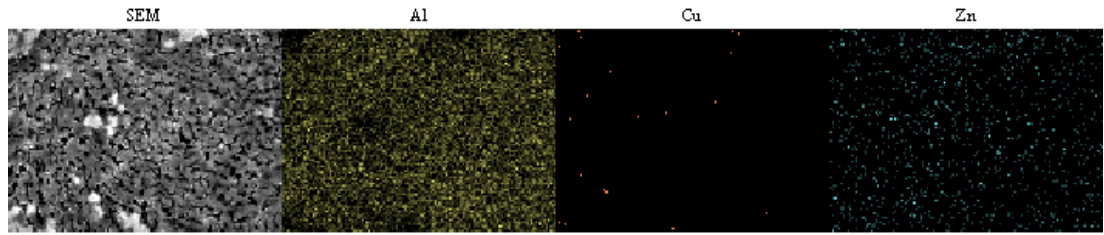


Resim 4.33. 8 saat MA'nmış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki 2. Analizi

Ek-4 (Devam) ZA-27 alaşımının eds sonuçları



Resim 4.34. 8 saat MA'nımış ZA-27 alaşımının EDS için SEM görüntüsündeki genel



Resim 4.35. 8 saat MA'nımış ZA-27 alaşımının Element Dağılım Haritalaması

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : ATAÇ, Alper Melih
 Uyruğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 24.10.1984, ANKARA
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 279 50 39
 Cep Tel : 0 505 452 58 84
 E-mail : atac.alper@gmail.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Gazi Üniversitesi /Fen Bilimleri Enstitüsü/Metal Eğitimi	-
Lisans	Z.K.Ü Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi/Döküm Öğretmenliği	2008
Lise	Şereflikoçhisar Anadolu Lisesi	2003

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2008-2009	Gazi Üniversitesi ATAMYO	Öğr. Görevlisi
2009-2010	Gazi Üniversitesi ATAMYO	Öğr. Görevlisi
2010-2011	Gazi Üniversitesi ATAMYO	Öğr. Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce