



**T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**AZ63 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KRIYOJENİK İŞLEM
SONRASI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE KOROZYON
DAYANIMININ İNCELENMESİ**

İSMAİL DENİZ KAĞAN DEMİR

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
KOMPOZİT MALZEME TEKNOLOJİLERİ ANABİLİM DALI**

**DANIŞMAN
PROF. DR. İLYAS UYGUR**

DÜZCE, 2020

T.C.
DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AZ63 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KRIYOJENİK İŞLEM
SONRASI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE KOROZYON
DAYANIMININ İNCELENMESİ

İsmail Deniz Kağan DEMİR tarafından hazırlanan tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Prof. Dr. İlyas UYGUR

Düzce Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. İlyas UYGUR

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Hüsnü GERENGİ

Düzce Üniversitesi

Prof. Dr. Ahmet ALP

Sakarya Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 19/02/2020

BEYAN

Bu tez çalışmasının kendi çalışmam olduğunu, tezin planlanmasından yazımına kadar bütün aşamalarda etik dışı davranışımın olmadığını, bu tezdeki bütün bilgileri akademik ve etik kurallar içinde elde ettiğimi, bu tez çalışmasıyla elde edilmeyen bütün bilgi ve yorumlara kaynak gösterdiğimi ve bu kaynakları da kaynaklar listesine aldığımı, yine bu tezin çalışılması ve yazımı sırasında patent ve telif haklarını ihlal edici bir davranışımın olmadığını beyan ederim.

19 Şubat 2020

İsmail Deniz Kağan DEMİR

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans öğrenimim ve bu tezin hazırlanma süresince gösterdiği her türlü destek ve yardımdan dolayı çok değerli hocam Prof. Dr. İlyas UYGUR'a en içten dileklerle teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca değerli katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Hüsnü GENENGİ'ye de şükranlarımı sunarım.

Tezde kullandığım numuneleri sağlayan Yıldırım Anot firmasına ve test altyapısını kullanmama izin veren Eczacıbaşı ESAN, Karaman Döküm ve Teknorot firmalarına en içten dileklerle teşekkür ederim.

Bu çalışma boyunca yardımlarını ve desteklerini esirgemeyen sevgili eşime ve sevgili aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışması, Düzce Üniversitesi BAP- 2017.06.05.540 numaralı Bilimsel Araştırma Projesiyle desteklenmiştir

19 Şubat 2020

İsmail Deniz Kağan DEMİR

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

ŞEKİL LİSTESİ.....	VII
ÇİZELGE LİSTESİ.....	IX
KISALTMALAR.....	X
SİMGELER	XI
ÖZET.....	XII
ABSTRACT	XIII
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI.....	3
2.1. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ	3
2.2. MAGNEZYUMUN ALAŞIMLARI.....	4
2.2.1. Magnezyum Alaşımının İsimlendirilmesi	6
2.2.2. Magnezyum-Aluminyum Alaşımları.....	7
2.2.3. Magnezyum-Çinko Alaşımları.....	10
2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI	11
2.3.1. Otomotiv	11
2.3.2. Havacılık	14
2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ELDESİ	15
2.4.1. Pres Döküm	15
2.4.2. Düşük Basıncılı Döküm	17
2.4.3. Kum Döküm	17
2.5. KRİYOJENİK İŞLEM	18
2.6. MEKANİK ÖZELLİKLER.....	20
2.6.1. Sertlik.....	20
2.6.2. Çekme Testi	21
2.7. KOROZYON.....	22
2.7.1. Magnezyumun Korozyonu.....	22
2.7.2. Magnezyum ve Elektrokimyasal Seri	24
2.7.3. Mg Alaşımının Korozyonunda Alaşım Elemanlarının Rolü.....	25
2.7.3.1. Aluminyum	26
2.7.3.2. Çinko.....	26
2.7.4. Magnezyum Alaşımının Korozyonu.....	26
2.7.5. Kütle Kaybı Yöntemi.....	28
2.7.6. Elektro Kimyasal İmpedans Spektroskopisi	28
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	31
3.1. DENEYSEL MALZEMELER	31
3.2. DENEYLERİN YAPILIŞI	32
3.2.1. Çekme Testi	32

3.2.2.	Sertlik Testi	33
3.2.3.	Korozyon Testi	33
3.2.4.	Taramalı Elektron Mikroskobu	33
3.2.5.	Mikroyapı Görüntüleri.....	34
4.	BULGULAR VE TARTIŞMA	35
4.1.	KRİYOJENİK İŞLEM SONUCU ELDE EDİLEN MİKROYAPI VE SEM GÖRÜNTÜLERİ.....	35
4.2.	SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI	45
4.3.	ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI	46
4.4.	KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI.....	49
4.4.1.	Kütle Kaybı Sonuçları.....	58
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	60
6.	KAYNAKLAR.....	62
	ÖZGEÇMİŞ.....	67

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.2. Magnezyum-Aluminyum ikili denge diyagramı.	7
Şekil 2.3. Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü.	8
Şekil 2.4. Mg-Zn Denge Diyagramı	10
Şekil 2.5. Araç bileşenlerinin ihtiyaç duyduğu genel özellikler.	11
Şekil 2.6. Mg alaşımlarından imal edilen şanzıman kutuları.	13
Şekil 2.7. BMW alüminyum-magnezyum kompozit motor bloğu.	13
Şekil 2.8. Chevrolet Corvette model aracın magnezyum alaşımı jantı.	14
Şekil 2.9. F-119 Turbofan Motoru	15
Şekil 2.10. Şematik Diyagram of (a) Doğrusal ve (b) Dolaylı Pres-Döküm	16
Şekil 2.11. Pres-Döküm AZ31 alaşımının mikroyapısı	16
Şekil 2.12. Düşük basınçlı kum döküm sisteminin şematik diyagramı.	17
Şekil 2.13. Kriyojenik işlem için sıcaklık-zaman eğrisi.	18
Şekil 2.14. Brinell sertlik ölçümünün şematik olarak gösterimi.	20
Şekil 2.15. Gerilim-Gerinim Eğrisi.	22
Şekil 2.16. Mg-Su sistemi için Pourbaix diyagramı.	23
Şekil 2.17. Potansiyel girişi ve akım çıkışı arasındaki ilişki.	30
Şekil 3.1. Deneylerde kullanılan numune ölçüleri A) Korozyon deneylerinde kullanılan numune ölçüsü, B) Sertlik ve Mikroyapı testlerinde kullanılan numune ölçüleri.	32
Şekil 3.2. Çekme çubuğu ölçüleri.	33
Şekil 4.1. Farklı kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin SEM görüntüleri karşılaştırmaları ve genel faz tanımları; (a) İşlemsiz AZ63 mikro yapı (b) İşlemsiz AZ63 mikroyapı detay (c) AZ63 (24h) mikroyapı, (d) AZ63 (24h) mikroyapı detay, (e) AZ63 (48h) mikroyapı, (f) AZ63 (48h) mikroyapı detay.	36
Şekil 4.2. Çökelti fazlarının renklendirilmiş dağılım oranları A) işlemsiz AZ63 B) AZ63 (24) C) AZ63 (48).	37
Şekil 4.3. İşlemsiz numunenin SEM görüntüsü.	39
Şekil 4.4. İşlemsiz numune EDS analiz sonuçları.	39
Şekil 4.5. AZ63 (24h) Numaralı numunenin SEM görüntüsü.	40
Şekil 4.6. AZ63 (24h) numaralı numune EDS analiz sonuçları.	41
Şekil 4.7. AZ63 (48h) Numaralı numunenin SEM görüntüsü.	42
Şekil 4.8. AZ63 (48h) numaralı numune EDS analiz sonuçları.	42
Şekil 4.9. İşlemsiz AZ63 Mikroyapı (100x Büyütme).	43
Şekil 4.10. AZ63 (24h) mikroyapı (100x Büyütme).	44
Şekil 4.11. AZ63 (48h) Mikroyapı (100x Büyütme).	45
Şekil 4.12. Kriyojenik işlem sonrası sertlik değişimleri.	46
Şekil 4.13. Farklı kriyojenik işlemler sonucunda elde edilen Gerilim-%Uzama eğrileri.	47
Şekil 4.14. Kriyojenik işlemin çekme değerlerine etkisi.	48
Şekil 4.15. Çekme numuneleri genel görünümü.	49
Şekil 4.16. Çekme testi sonrası kırık yüzeyleri genel görünümü.	49
Şekil 4.17. İşlemsiz numune korozyon deneyi sonrası sem görüntüsü ve EDS analizleri.	50
Şekil 4.18. AZ63 (24h) numaralı numune korozyon deneyi sonrası sem görüntüsü ve EDS analizleri.	51
Şekil 4.19. AZ63 (48h) numaralı numune korozyon deneyi sonrası sem görüntüsü ve	

EDS analizleri.	52
Şekil 4.20. Farklı kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin korozyon deneyi sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük grafiği A)İşlemsiz AZ63, B) AZ63 (24h), C) AZ63 (48h).....	54
Şekil 4.21. %3,5 NaCl çözeltisinde elde edilen Nyquist eğrileri.....	55
Şekil 4.22. İşlemsiz numune R(QR(LR)) devresi.....	57
Şekil 4.23. Kriyojenik işlemlenmiş numunelerin R(Q(R(QR))) devresi	57
Şekil 4.24. EIS deneyinde kullanılan numunelerin genel görünümü.	58
Şekil 4.25. 24 Saat Kütle kaybı testi sonrası numunelerin genel görünümü.	59



ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa No

Çizelge 2.1. Saf Magnezyumun fiziksel özellikleri.....	3
Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin magnezyum üzerindeki etkileri.....	5
Çizelge 2.3. Magnezyum alaşımlarının isimlendirilmesinde kullanılan kısaltmalar.....	6
Çizelge 2.4. Mg-Al alaşımlarının özellikleri.....	9
Çizelge 2.5. Araç parçalarında Mg alaşımının mevcut ve potansiyel uygulaması.....	12
Çizelge 2.6. Bu tezde kullanılan ve bazı elementler için standart redüksiyon potansiyellerini gösteren elektrokimyasal seri.....	25
Çizelge 2.7. Mg alaşımlarının karşılaştırmalı korozyon oranlarının listesi.....	27
Çizelge 3.1. AZ63 Magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	31
Çizelge 3.2. Numunelere yapılan işlemler.....	31
Çizelge 4.1. Çökelmiş fazların genel karşılaştırmalı EDS sonuçları (ağırlıkça %)......	38
Çizelge 4.2. İşlemsiz numune EDS analiz değerleri.....	40
Çizelge 4.3. AZ63 (24h) numaralı numune EDS analiz değerleri.....	41
Çizelge 4.4. AZ63 (48h) numaralı numune EDS analiz değerleri.....	43
Çizelge 4.5. Farklı kriyojenik işlemler sonucunda elde edilen mekanik özellikler.....	47
Çizelge 4.6. AZ31 alaşımına uygulanan kriyojenik işlem parametreleri.....	48
Çizelge 4.7. İşlemsiz numune korozyon deneyi sonucu elde edilen EDS değerleri.....	50
Çizelge 4.8. AZ63 (24h) numaralı numune korozyon deneyi sonucu elde edilen EDS değerleri.....	51
Çizelge 4.9. AZ63 (48h) numaralı numune korozyon deneyi sonucu elde edilen EDS değerleri.....	52
Çizelge 4.10. Korozyon deneyi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri.....	53
Çizelge 4.11. %3,5 NaCl ortamından EIS ve LPR ölçümlerinden belirlenen işlemsiz numunenin korozyon parametreleri.....	57
Çizelge 4.12. %3,5 NaCl ortamından EIS ve LPR ölçümlerinden belirlenen kriyojenik işlemlerli numunelerin korozyon parametreleri.....	57
Çizelge 4.13. Kriyojenik işlemler sonucunda elde edilen ağırlık değişim sonuçları.....	59

KISALTMALAR

DCT	Derin Kriyojenik İşlem
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işım Spektroskopisi
EIS	Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi
FML	Fiber Metal Laminat
HB	Brinell Sertlik Değeri
MMK	Metal Matriks Kompozit
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu
SHE	Standart Hidrojen Elektrodu



SİMGELER

E _{corr}	Korozyon Potansiyeli
I _{corr}	Korozyon Akım Yoğunluğu ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$)
Kgf	Kilogram Kuvvet
Km	Kilometre
l	Litre
m	Metre
MPa	Mega Pascal
mV	Milivolt
R _a	Ortalama Pürüzlülük (μm)
R _{ct}	Şarj Transfer Direnci ($\Omega.\text{cm}^2$)
R _p	Polarizasyon Direnci ($\Omega.\text{cm}^2$)
R _s	Çözelti Direnci ($\Omega.\text{cm}^2$)
R _z	10 Noktanın Ortalama Pürüzlülüğü (μm)
V	Volt
Z	Empedans (Ω)
Ω	Ohm
μA	Mikroamper
μm	Mikrometre

ÖZET

AZ63 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KRİYOJENİK İŞLEM SONRASI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN VE KOROZYON DAYANIMININ İNCELENMESİ

İsmail Deniz Kağan DEMİR

Düzce Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü, Kompozit Malzeme Teknolojileri Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. İlyas UYGUR

Şubat 2020, 66 sayfa

Magnezyum, tüm tasarım metallerinden en hafif olanıdır. Plastik bir materyal gibi hafif ve aynı zamanda metal gibi serttir. Yüksek spesifik tokluk ve sertlik, iyi işlenebilirlik, kaplanabilirlik kabiliyeti ve bilinen yöntemlerle kaynak yapılabilirliği, endüstri için cazip hale gelmiştir. Çağımızın en yeni metali olan magnezyumun kullanımı endüstri ve teknolojideki gelişmelere paralel olarak artmaktadır. Hafifliği, dayanıklılığı ve uzun ömrü nedeniyle endüstride kullanım yeri bulmaktadır. Otomobillerde Mg alaşımlarının kullanılması yakıt verimliliğini arttırmakta ve araç ağırlığını azaltarak emisyonları azaltmaktadır. AZ63 alaşımı yaygın kuma döküm anot malzemesi olarak kullanıldığı için diğer magnezyum alaşımlarından daha ucuz bir malzemedir ve çentik darbe dayanımı çoğu magnezyum alaşımından yüksek olmasına karşın çekme dayanımı ve elastik modülü otomotiv, havacılık sanayinde kullanılan AZ91 alaşımı ile benzerlik taşımaktadır. AZ63 alaşımının kuma döküm yöntemi ile kolay eldesi ve gelişmiş magnezyum alaşımlarına kıyasla benzer özellikler taşıması bu alaşımı cazip hale getirmektedir. Magnezyum-alüminyum alaşımları için daha önceden yapılmış olan aşınma, korozyon ve mekanik özelliklerinin incelenmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar genellikle ya deney ortam sıcaklıkları değiştirilerek ya da kaplama yapıldıktan sonra incelenmiştir. AZ63 alaşımı için literatürde çok fazla çalışma olmamasına karşılık AZ63 alaşımı için kriyojenik işlem çalışması literatürde bulunmamaktadır. Magnezyum alaşımlarının kullanımını kısıtlayan en büyük etken, korozyon direncinin düşük olması ve yüksek yükler altında aşınma kararlılığının bozulmasıdır. Bu sebeplerden dolayı da özellikle otomotiv endüstrisinde bu özellikler sorun haline gelmektedir. Bu çalışma neticesinde AZ63 magnezyum alaşımlarının korozyon dayanımı ve yüksek yük altındaki aşınma dirençlerini iyileştirerek daha fazla endüstriyel uygulamalarda kullanılabilmesi hedeflenmiştir. Bu tez çalışmasında AZ63 magnezyum alaşımlarının ilk döküm aşamasında, homojenleştirme tavlama, çökeltme sertleşmesi ve kriyojenik işlem süreçlerinde sertlik değerlerine, korozyon dayanımına ve mikro yapısal özelliklerine bakılarak malzeme özelliklerindeki iyileştirmelerin karşılaştırılması yapılmıştır. Mikroyapıdaki faz dağılımları arttığından ve tane boyutu küçüldüğünden dolayı sertlik değerleri ile birlikte uzama değerleride artmıştır. Mikroyapıdaki ikincil fazların ortaya çıkması ile birlikte de malzemenin korozyon direncinde önemli artışlar gözlemlenmiştir.

Anahtar sözcükler: Korozyon, Kriyojenik, Magnezyum, Magnezyum Alaşımları, Mikroyapı.

ABSTRACT

INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES AND CORROSION RESISTANCE OF AZ63 MAGNESIUM ALLOYS AFTER CRYOGENIC PROCESS

İsmail Deniz Kağan DEMİR

Düzce University

Graduate School of Natural and Applied Sciences, Department of Composite Material
Technology

Master's Thesis

Supervisor: Prof. Dr. İlyas UYGUR

February 2020, 66 pages

Magnesium is the lightest of all design metals. It is as light as a plastic material and at the same time hard as metal. High specific toughness and hardness, good workability, coatibility and weldability by known methods have become attractive for the industry. The newest metal is magnesium of use our age, is increasing parallel with developments in industry and technology. Due to its lightness, durability and longevity, it is in use for industrial. The use of Mg alloys in automobiles increases fuel efficiency and reduces emissions by reducing vehicle weight. The AZ63 alloy is a cheaper material than other magnesium alloys because it is widely used as a sand-casting anode material, and its tensile strength and elastic modulus are similar to those of the AZ91 alloy used in the automotive, aerospace industry, although the notch impact strength is higher than most magnesium alloys. The easy production of AZ63 alloy by using the casting method makes it attractive to use this alloy because it has similar properties compared to advanced magnesium alloys. Studies have been carried out on the examination of wear, corrosion and mechanical properties of magnesium-aluminum alloys. These studies are usually investigated either by changing the test ambient temperatures or after coating. Although there is not much work in the literature for the AZ63 alloy, the literature on the cryogenic process for the AZ63 alloy is not available. The main limiting factor in the use of magnesium alloys is the low corrosion resistance and the degradation of wear resistance under high loads. For these reasons, especially in the automotive industry, these properties become a problem. The aim of this study is to improve the corrosion resistance of AZ63 magnesium alloys and wear resistance under high loads and to be used in more industrial applications. In this thesis, we compared the improvements in material properties of AZ63 magnesium alloys in the first casting phase, in the homogenization annealing, in the precipitation hardening and in the cryogenic processing, in terms of corrosion resistance and microstructural properties. As the phase distributions in microstructure increased and grain size decreased, the hardness values and elongation values increased. Substantial increase in the corrosion resistance of the material along with the appearance of secondary phases in the microstructure was observed.

Key words: Corrosion, Cryogenic, Magnesium, Magnesium alloys, Microstructure.

1. GİRİŞ

Son birkaç yıldır, enerji kaynaklarının kıtlığı, artan yakıt fiyatları ve daha katı emisyon normları, endüstrilerin geleneksel malzemeler için bir alternatif olarak yeni ve gelişmiş malzemeleri aramasına yol açmıştır. Bu sorunun çözülmesi için bazı olasılıklar vardır. Alternatif yakıt kaynağının kullanılması, güç aktarma organlarının geliştirilmesi, aerodinamik iyileştirmeler vb. dahil olmak üzere Bununla birlikte, ağırlık azaltımı, yakıt tüketiminin önemli oranda azaltılması ve CO₂ emisyonları için en uygun maliyetli seçenek gibi gözükmektedir [1], [2]. Hafif metallerin seçimi, bu sorunun bariz bir çözümüdür. Dünyada altıncı olarak en bol bulunan element olan magnezyum (Mg) [3], otomobil, havacılık endüstrisi vb. birçok mühendislik uygulamasında yararlı ve umut verici metallere biridir.

Amaçlanan CO₂ emisyonlarının azalması ve sınırlı yakıt rezervlerinin korunmasının sağlanmasıyla beraber; araçlardaki ışık, ses, güvenlik, konfor, eğlence donanımları gibi ek unsurlardan kaynaklanan ağırlık artışı sorunlarının giderilmesi noktasında magnezyum alaşımlı ürünler artan bir önem kazanmıştır [4], [5]. Daha fazla konfor için yapılan ilave donanımlar yakıt verimliliğini artırma ve çevreyi koruma talepleriyle uyumsuzluk göstermektedir. Sweeder bir araçtaki %10'luk ağırlık azalması ile aşağıdaki sonuçların ortaya çıkacağını ileri sürmüştür [6]:

- Yakıt tasarrufu-0,8 l/100 Km iyileşme.
- Performans iyileşmesi-0-100 Km hızlanma zamanında 0,5 saniye düşüş.
- Emisyonların azaltılması-%7 Daha az gaz salınımı.
- Güvenlik-%10 Daha az kinetik enerji.
- Yük taşıma kapasitesi-140 Kg'lık iyileşme.
- Frenleme mesafesi-100-0 Km/saat yavaşlama evresinde 3m daha kısa duruş.
- Mevcut donanımların artırılması-araç içi eğlence sistemleri vb.

Magnezyum, alüminyumdan %36 demirden %78 daha hafif bir metaldir. Bu özelliği ile modern teknoloji olan uzay, uçak ve otomotiv parçalarında kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir. Fakat saf halde magnezyumun kullanımı dayanıklılığının düşük olmasından ötürü mümkün değildir. Bu nedenle çeşitli alaşım elementleri ilave edilerek

mg alaşımlarının mukavemet/ağırlık, mukavemet/yoğunluk oranları diğer metal alaşımlarına göre dikkat çekici hale gelmiştir.

Magnezyum alaşımlarının diğer önemli özellikleri, üstün özgül mukavemet, yüksek termal iletkenlik, iyi döküm kabiliyeti bu zellikler, Al, inko (Zn) gibi farklı metallerin ilavesi ile daha da arttırılabilir. Manganez (Mn), Al, Alinyum (Al) ve diğer alaşım elementlerinin ilavesi ile artan dayanım ve sürünme zellikleri, Magnezyum-Alinyum alaşımlarına geniş bir kullanım alanı sağlamıştır [7]–[9].

Bir alaşımın özelliklerini iyileştirmenin birçok yolu vardır. Onlardan biri bu alaşımların mikroyapısında intermetalik bileşiğin hacim fraksiyonunu değiştirerek bu özelliklerin geliştirilmesine yardımcı olmaktır. Farklı alaşım elementlerinin eklenmesi rneğin, AZ91 Mg alaşımına Ca ilave ederek, yüksek sıcaklıklardaki sürünme direncini iyileştirir. Ayrıca Ca, bu alaşımlarda bulunan dendritik morfolojiyi parçalamaya yardımcı olur ve tane yapısını düzenli hale geçirir [8], [9]. Bir alaşımın özelliklerini iyileştirmenin diğer bir yolu, sıcaklık kontrolü ile mümkündür. Isıl işlem, eski yıllardan itibaren yaygın bir uygulamadır, buna karşın Soğuk işlem, alaşımın özelliklerinde meydana gelen değişiklikleri incelemek için izlenen çok daha yeni bir yöntemdir. Soğuk işlem, malzemenin düşük sıcaklıklarda özelliklerinin geliştirilmesini kontrol etmek için kullanılan bir işlemdir. Bu işlem iki yolla yapılabilir: -80°C 'ye yakın sıcaklıklarda yapılan işlem (kriyojenik işlem) ve -196°C 'de yapılan işlem (derin kriyojenik işlem) olarak ikiye ayrılır. Derin kriyojenik işlem, kriyojenik işlemin dışında daha belirli özellikleri geliştirmeye yardımcı olur [10].

Bu çalışmanın amacı kum kalıba dökülmüş homojenizasyon işlemi yapılmış ve yapay yaşlandırma işlemi uygulanmış AZ63 magnezyum alaşımına -80°C 'de kriyojenik işlem uygulayarak değişen mekanik özelliklerini ve korozyon dayanımı incelemektir. Alaşımı kriyojenik işleme tabi tutarak ikinci faz okelmesini kontrol ederek çok daha mukavim ve ikinci fazları açığa çıkmış bir yapı elde etmektir. İkincil fazları düzenlemek ve daha fazla ikincil faz açığa çıkarmak için AZ63 alaşımına -80°C 'de 24 saat ve 48 saat kriyojenik işlem uygulanmıştır. Bu işlemler neticesinde sertlik, çekme dayanımı ve korozyon dayanımları incelenerek alaşımdaki gelişmeler incelenmiş, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM) görüntüleri ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) analizleri ile mikroyapısal boyutlardaki faz değişimleri ve dağılımları gözlemlenmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

2.1. MAGNEZYUMUN GENEL ÖZELLİKLERİ

Periyodik cetvelin II A grubunda bulunan toprak alkali metallere biri olan magnezyum elementi bir kimyasal elementtir. 1795'te J.C. Delantherie magnezyum tuzlarına magnezit adını verdi. 1803'te C.F. Ludwig doğal magnezyum karbonatı buldu. Sir Humphrey Dewy magnezyumu elektrolize etti. 1833'te Faraday magnezyumu ortaya çıkardı. Magnezyum metali dünyada bulunan en bol elementlerden biridir ve tüm dünyadaki elementlerin ağırlıkça yaklaşık %2,7'sini teşkil eder. Magnezyum dünyada en çok bulunan sekizinci elementtir ve altıncı metaldir. Tabiatta; deniz suyunda çözülmüş olarak (%0,13) ve toprakta çeşitli cevherin içinde bileşikler halinde mevcuttur. Bu cevherlerin en yaygınları Dolomit ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), Magnesit (MgCO_3) ve Karnalit ($\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) olarak sayılabilir [11]. Çizelge 2.1'de saf magnezyumun fiziksel özellikleri görülmektedir [12].

Çizelge 2.1. Saf Magnezyumun fiziksel özellikleri.

Fiziksel Özellik	Yoğunluk (g/cm^3)	Ergime Noktası ($^{\circ}\text{C}$)	Özgül Isı ($\text{Cal/g}^{\circ}\text{C}$)	Elektriksel iletkenlik (% IACS)	Termal İletkenlik (W /mK)
Saf Magnezyum	1.74	650	0.24	39	167

Saf magnezyum, hegzagonal sıkı paket (HCP) bir yapıdadır ve atmosferik basınç altında kristalleşir (Şekil 2.1) [16]. Bu yapı, deformasyon yeteneğini kısıtlar, çünkü düşük sıcaklıklarda daha az kayma sistemi vardır. Magnezyum, orta derece düşük ergime sıcaklığına sahiptir ve döküm için erime kolaylığı sağlar. Buna ek olarak, kimyasal olarak nispeten dengesizdir ve bir deniz ortamında korozyona aşırı duyarlıdır. 25°C 'de saf magnezyumun kafes parametreleri $a = 0.32092 \text{ nm}$ ve $c = 0.52105 \text{ nm}$ 'dir. Bu nedenle, c/a oranı 1.6236'dır ve magnezyum neredeyse tamamen doymuştur.

- a) Özgül mukavemet arttırımı
- b) Süneklik geliştirme, yoğunluk azaltma
- c) Sürünme direncini artırma
- e) Korozyon direncini geliştirme

Pek çok metal gibi, saf magnezyum da nadiren alaşımsız formda mühendislik uygulamaları için kullanılır. Alaşım hem dövülmüş hem de dökme ürünler için magnezyumun şekil alma kabiliyetini ve olumsuz özelliklerini geliştirmek için kullanılır. En yaygın alaşım elementleri çinko ve alüminyumdur. Manganez, zirkonyum, silikon ve nadir toprak metalleri, oluşan alaşımın özellikleri üzerinde önemli derecede etkili olan diğer alaşım elementleridir [12], [18]. Çizelge 2.2, alaşım elementlerinin magnezyum alaşımlarının özellikleri üzerindeki etkisini göstermektedir [19].

Çizelge 2.2. Alaşım elementlerinin magnezyum üzerindeki etkileri.

Alaşım Elementi	Alaşım elementinin temel etkileri
Alüminyum (Al)	Çekme Mukavemeti ve sertliği artırır. Metaller arası ($Mg_{17}Al_{12}$) fazının çökmesini destekler. Dökülebilirliği artırır. Korozyon direncini artırır.
Çinko (Zn)	Çekme Mukavemeti ve sertliği artırır. Tane yapısını inceltir. Dökülebilirliği artırır. Korozyon direncini artırır.
Mangan (Mn)	Demir elementinin olumsuz etkisini azaltarak korozyon direncini artırır. Akma dayanımını artırır.
Silisyum (Si)	Ergimiş haldeki metalin akışkanlığını artırır. Sürünme direncini artırır. Mg_2Si fazının oluşumunu destekler. Dökülebilirliği ve korozyon direncini azaltır.
Nadir Toprak Metalleri	Soğukta çalışma direncini artırır. Çekme mukavemetini ve sertliği artırır.

2.2.1. Magnezyum Alaşımlarının İsimlendirilmesi

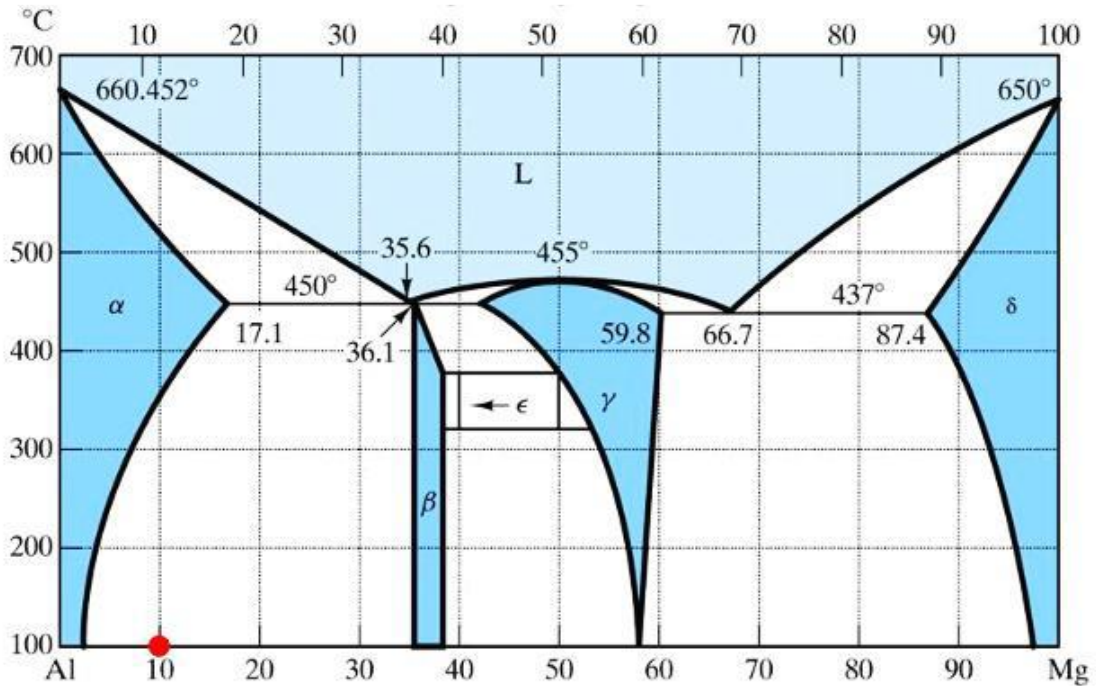
Magnezyum alaşımları çoğunlukla sırası ile iki büyük harf ve iki veya üç numara ile tanımlanır. Harfler, alaşımda bulunan ana alaşım elementlerini temsil eder. İlk harf en yoğun bulunan alaşım elementini, ikinci harf ise alaşımdaki ikinci yüksek orana sahip elementi gösterir. Harfleri takip eden numaralardan, ilk numara ilk harfi temsil eden elementin ağırlıkça yüzdesi ikinci numara ikinci harfin ağırlıkça yüzdesidir. Örneğin AZ63 alaşımının ilk harfi A-Aluminyum, ikinci harfi Z-inko alaşımlarını ifade eder. Bunların alaşım içindeki yaklaşık olarak yüzdeleri %6 Aluminyum, %3 inko olduğunu gösterir. Magnezyum alaşımlarının adlandırma sistemi, çelikler ve alüminyum alaşımları gibi standart bir çerçeveye konulmamıştır [20]. Çoğunlukla magnezyum alaşımları iki harf ve iki rakam kullanarak tanımlanır. Bu tanımlar ASTM B275 standardına göre aşağıdaki izelge 2.3'te gösterilmektedir [21]. Magnezyum alaşımları döküm ve dövme alaşımlar olarak iki ana gruba ayrılır. Döküm alaşımları; AZ63, AZ81, AZ91, AM50, AM60, ZK51, ZK61, ZE41, ZC63, HK31, HZ32, QE22, QH21, WE54, WE43, Elektron 21. Döküm alaşımlarının genel olarak çekme dayanımı 135-285 MPa, uzama değeri %2-10 arasında, ortalama yoğunluğu 1,8 g/cm³tr ve elastik modülü 42 GPa'dır. Dövme alaşımları; AZ31, AZ61, AZ80, Elektron 675, ZK60, M1A, HK31, HM21, ZE41, ZC71, ZM21, AM40 AM50, AM60, K1A, M1, ZK10, ZK20, ZK30, ZK40. Dövme alaşımları genel olarak 180-440 MPa ekme dayanımına, %7-40 aralığında uzama değerine sahiptirler [20].

Çizelge 2.3. Magnezyum alaşımlarının isimlendirilmesinde kullanılan kısaltmalar.

A	Aluminyum	N	Nikel
B	Bizmut	P	Kurşun
C	Bakır	Q	Gümüş
D	Kadmiyum	R	Krom
E	Nadir Metaller	S	Silisyum
F	Demir	T	Kalay
H	Toryum	V	Godolinyum
J	Stronsiyum	W	İtriyum
L	Lityum	Y	Antimon
M	Mangan	Z	Kalay

2.2.2. Magnezyum-Aluminyum Alaşımları

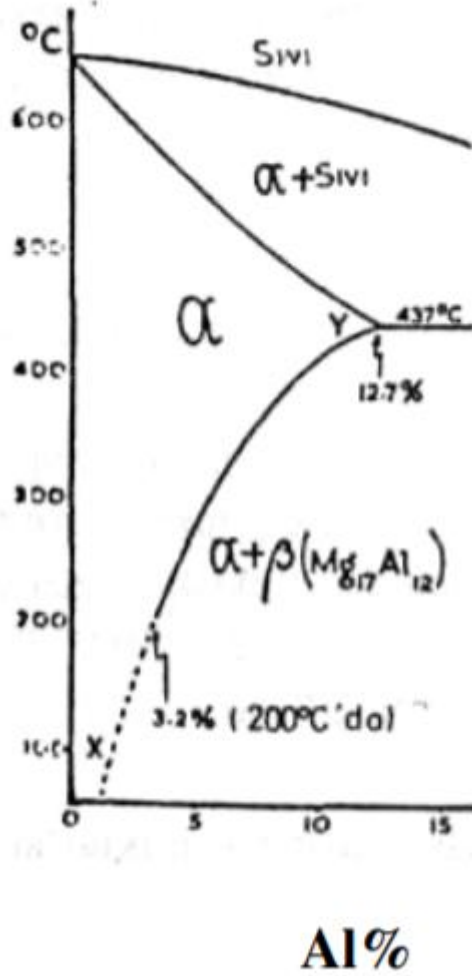
Mg-Al ikili sistemi en eski ve en çok kullanılan döküm alaşımlarıdır. AZ91, AM50 ve AM60 gibi alaşımlar halen tüm magnezyum alaşımı dökümünün büyük bir bölümünü oluştururlar [22]. Şekil 2.2, Mg-Al faz diyagramını göstermektedir [23]. Al'nin Mg içindeki maksimum çözünürlüğü, 25°C'de yaklaşık %2.1'dir ve 437°C ötektik sıcaklığa kadar çözünürlük % 12.6'ya kadar ulaşabilir. Buradaki karakteristikler Mg-Al alaşım sistemi alaşımlarının iyi dökülebilirlik, katı eriyik sertleşmesi ve çökeltme sertleşmesi sağlayabileceğini göstermektedir [24], [25].



Şekil 2.2. Magnezyum-Aluminyum ikili denge diyagramı.

Şekil 2.3'te görüldüğü gibi Mg-Al alaşım sistemleri %2 den daha fazla alüminyum içerdiği zaman döküm mikro yapısında Mg₁₇Al₁₂ intermetalığı görülür [29]. Alaşımlarda alüminyum içeriği %7'nin üzerinde ise aę yapısını tamamlamamış Mg₁₇Al₁₂ intermetalığı tane sınırları boyunca dağılım gösterir, meydana gelen faz farklılığından dolayı süneklik azalır kırılmalık artar. ≈700 K de çözelti Mg₁₇Al₁₂ intermetalığının çözünmesine sebep olur, katı eriyik sertleşmesi meydana gelir ve her iki durumda çekme mukavemeti ve sünekliği artırmaktadır. 373 K ile 473 K aralığında Mg₁₇Al₁₂ intermetalığı çökebilir ve bu çökelti partikülleri çekme mukavemetinin artmasını sağlar. Buna karşın Mg-Al alaşımları yapısal malzemeler olarak kullanılmak için gerekli özellikleri taşımamaktadır. Çinko, manganez, silisyum, nadir elementler gibi elementler

Mg-Al alaşım sistemine ilave edilerek özelliklerin geliştirilmesi sağlamaktadır [26]-[28].



şekil 2.3. Mg-Al sisteminin magnezyumca zengin olan bölümü.

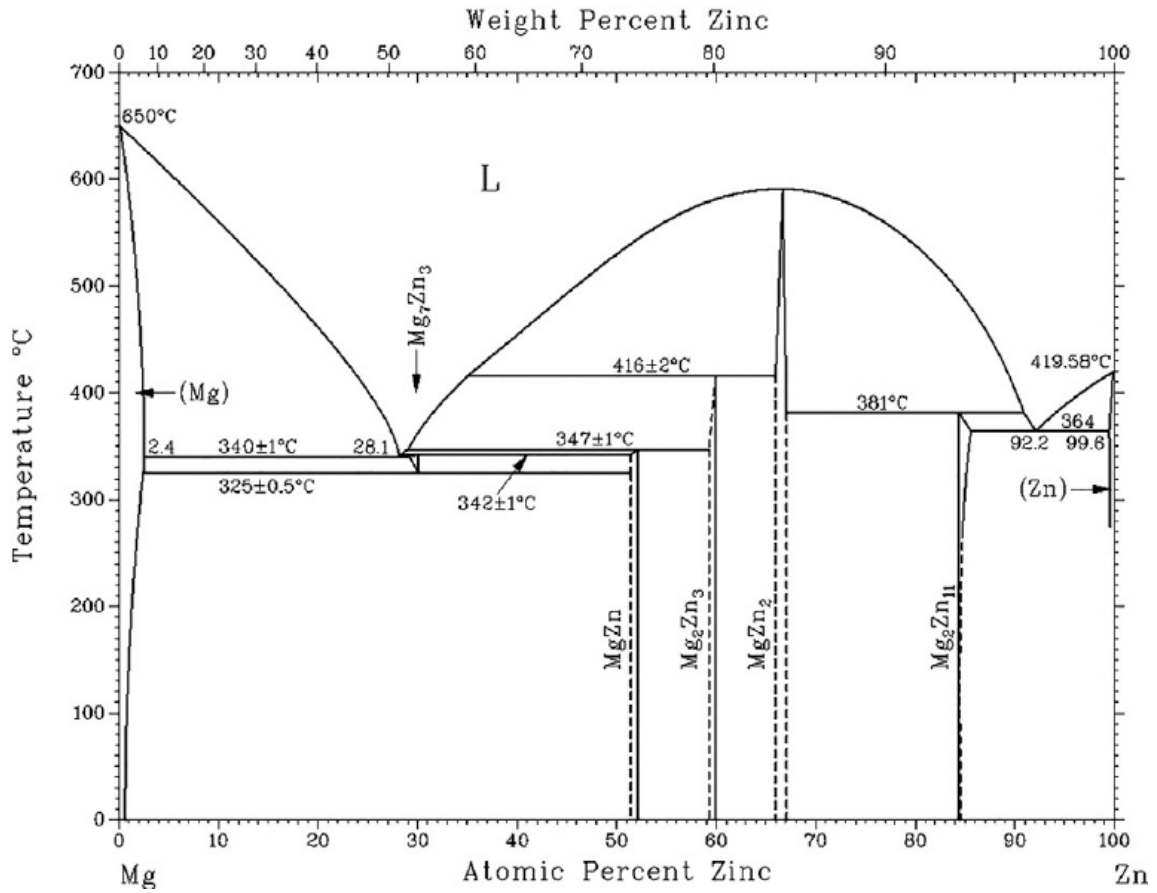
Yaygın olarak kullanılan magnezyum-alüminyum esaslı alaşımlar, izelge 2.4'te mekanik özellikleriyle birlikte verilmiştir [30]. En yaygın olarak kullanılan alaşımlar AZ91, AM50 ve AM60 alaşımlarıdır. AZ91 alaşımı yüksek direnç ve mükemmel dklebilme özelliklerine sahiptir. AM50 ve AM60 alaşımları ise yüksek süneklik ve kopma tokluğu özellikleri ile araçlarda jant ve gösterge panellerinde tercih edilmektedirler. AS ve AE serisi magnezyum alaşımları ise içerdiği nadir toprak elementleri alaşımları sayesinde yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

Çizelge 2.4. Mg-Al alaşımlarının özellikleri.

Alaşım		AZ31B	AZ61	AZ63	AZ80	AZ91	AM50	AM60B
Yoğunluk	g/cm ³	1,77	1,8	1,83	1,8	1,81	1,77	1,8
Kimyasal Kompozisyon	%Mg	97	92	90,7	91	89	Kalan	Kalan
	%Al	2.50- 3.50	5.80- 7.20	5.3-6.7	7.8-9.2	8.3-9.7	4.4-5.4	5.5-6.5
	%Zn	0.60- 1.40	0.40- 1.50	2.5-3.5	0.2-0.8	0.35-1.0	0.22	0.22
	%Mn	0.20	0.15	0.15	0.12	0.1	0.26-0.6	0.24-0.6
	%Si	0.10	0.10	0,3	0.1	0.1	0.1	0.1
	%Cu	0.050	0.050	0.25	0.050	0.03	0.01	0.01
	%Fe	0.0050	0.0050	0.0050	0.0050	0.005	0.04	0.0050
	%Ni	0.0050	0.0050	0.01	0.0050	0.0020	0.02	0.0020
	%Zr	-	-	-	-	-	-	-
Mekanik Özellikler	Çekme Dayanımı	260 MPa	310 MPa	197 MPa	380 MPa	230 MPa	220 MPa	225 MPa
	Akma Dayanımı (Gerinim 0.2%)	200 MPa	230 MPa	94 MPa	275 MPa	160 MPa	125 MPa	130 MPa
	Yırtılma Dayanımı	130 MPa	140 MPa	125 MPa	165 MPa	140 MPa	115 MPa	
	Kesme Modülü	17 GPa	17 GPa	17 GPa	17 GPa	17 GPa	17 GPa	17 GPa
	Elastik Modül	44.8 GPa	44.8 GPa	44.8 GPa	44.8 GPa	44.8 GPa	45 GPa	45 GPa
	Poisson Oranı	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
	Uzama Yüzdesi (in 50 mm)	15%	16%	4.5%	7%	3%	%10-15	%8-13
	Sertlik (HB)	49	60	50	82	63	60	65
	Çentikli Darbe Dayanımı (V-Çentikli)	4.30 J	4.10 J	4.10 J		3 J		2.8 J
Termal Özellikler	Isıl Genleşme (0-100°C/32-212°F)	26 µm/m°C	26 µm/m°C	26.1 µm/m°C	26 µm/m°C	25 µm/m°C	25.6 µm/m°C	26 µm/m°C
	Termal İletkenlik	96 W/Mk	70 W/Mk	77 W/Mk	76 W/Mk	72 W/Mk	62 W/Mk	61 W/Mk

2.2.3. Magnezyum-Çinko Alaşımları

Magnezyum-çinko (Zn) sistemi (Şekil 2.4) çoktan beri bilinen uygun ergimeli bir $MgZn_2$ bileşimi ile buna daha sonra eklenmiş iki yeni bileşim olan Mg_2Zn_3 ve $MgZn$ 'den oluşur. Katı fazlar belli bir homojenlik alanına sahiptir. Bu alana düşük sıcaklıkta az rastlanır. Çinkonun magnezyum içinde sıcaklığa göre eriyebilme sınırını veren eğrisi birçok araştırmaya konu olmuş olup eriyebilme kabiliyetindeki değişme, çökeltme sertleşmesini mümkün kılmaktadır. Pratik olarak Mg-Zn ultra-hafif alaşımların, magnezyumdan yana zengin α katı eriyik dendritleriyle $\alpha + MgZn$ ötekliğinden oluştuğu görülür [31]-[34].



Şekil 2.4. Mg-Zn Denge Diyagramı.

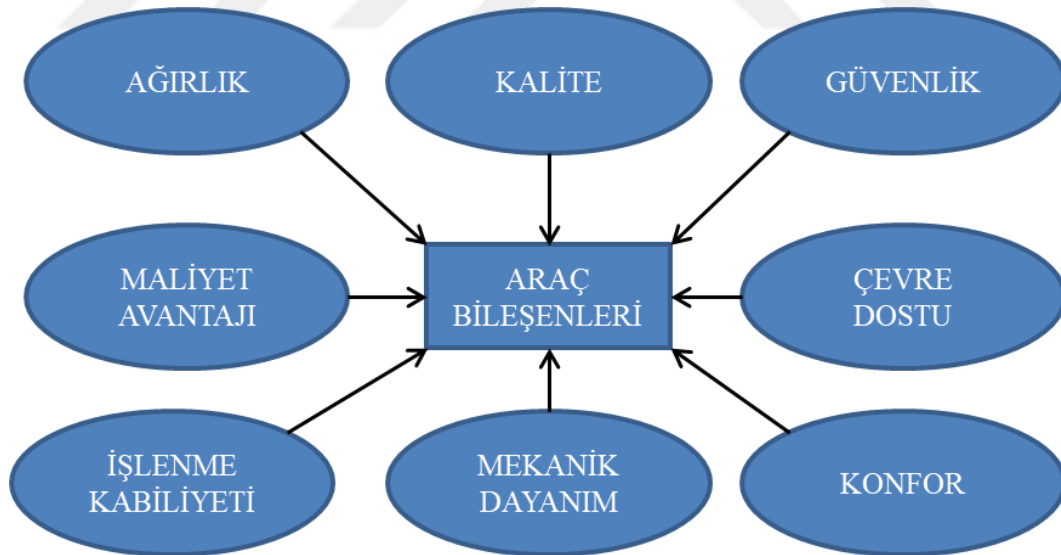
Çinkonun magnezyum alaşımlarında en yaygın kullanımı Magnezyum-Alüminyum ve çinko alaşımlarıdır (Mg-Al-Zn). Bu alaşımlarda Al oranı çinkodan daha fazladır. Mg-Al-Zn alaşımları, dayanım, iyi korozyon ve hafiflik özelliklerinden dolayı önem taşır. Alaşımların çoğu kokil kalıba dökümdür. Mg-Al alaşımlarına çinko ilavesi ile dayanım,

katı eriyik mukavemeti ve çökelme sertleştirilmesi ile artar. Magnezyumun %10'dan fazla alüminyum ve çinko ile alaşımlandırılması uygun değildir çünkü alaşımın sünekliği, gevrek metallerin arasında bileşik oluşmasından kaynaklı olarak azalır. Yapılan akademik çalışmalarda Mg-Zn-Al- (Nadir Toprak Metalleri) alaşımlarının Mg-Al-Zn alaşımlarına göre avantajları tespit edilmiştir. Bu alaşımlarda Zn oranı Al göre daha fazladır [31]-[34].

2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

2.3.1. Otomotiv

Belirli bir bileşen için Mg kullanımı gereksinime göre belirlenebilir. Çizelge 2.5, bir otomotiv uygulaması için araç bileşeninin farklı gereksinimlerini gösterilmiştir. Magnezyumu özel kılan hegzagonal yapısı ve mukavemet özellikleridir. Genel olarak, bir araç şanzıman sistemi, iç mekân, gövde ve şasiden oluşur ve bu kısımlarda magnezyum kullanım alanı bulur. Şekil 2.5'de bir araç bileşenlerinden istenilen özellikler gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Araç bileşenlerinin ihtiyaç duyduğu genel özellikler.

1930'lu yıllarda, Mg ilk kez ticari araçlarda kullanıldı. Volkswagen (VW) Beetle, transmisyon sistemi Mg alaşımı ile donatıldı. Bugüne kadar birçok sanayi şirketi, iletim sistemleri geliştirmek için Mg alaşımı kullandı. Bir iletim sistemleri, manifoldlar, dış kutusu ve tahrik milleri içeren motordan oluşmaktadır. Motor yüksek sıcaklıklara

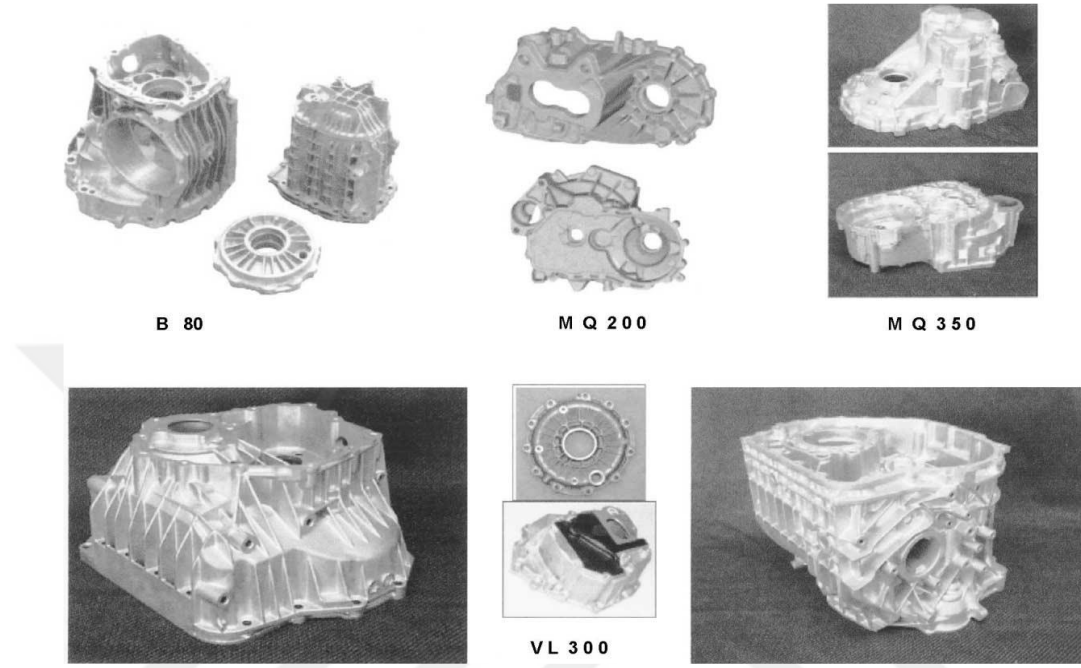
ulaştığından dolayı Mg alaşımları burada kullanım yeri buldu. VW Beetle, AS41 yapılmış 10 Kg ağırlığında bir krank miline sahiptir. Bu sayede Al krank mili kullanan araçlara göre %25 daha fazla motor ağırlık kazancı sağlanmaktadır. Mg alaşımlarının motorlarda kullanılmasının nedeni 150-200°C'de iyi sürünme direncine sahip olmasıdır. Bir spor otomobilde motorda krank milinin daha fazla titreşim sönümlenme kabiliyetine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu noktada WE54, QE22 vb. Mg alaşımları bu ihtiyaca cevap vermektedir.

Çizelge 2.5. Araç parçalarında Mg alaşımının mevcut ve potansiyel uygulaması [35].

Motor ve Şanzıman Parçaları	İç Aksam	Şasi Parçaları	Gövde Parçaları
Dişli Kutusu	Direksiyon Simidi	Jantlar	Döküm parçalar
Emme Manifoldu	Koltuk Bileşenleri	Rot kolları	Yakıt deposu kapağı
Krank Mili	Gösterge paneli	Motor beşiği	Kapı aksanları
Silindir Parçaları	Direksiyon Bileşenleri	Arka Tampon desteği	Ektürüze parçalar
Yağ pompası	Fren ve Debriyaj Pedalları		Saç Parçalar
Transfer kutusu	Hava yastığı tutucu		

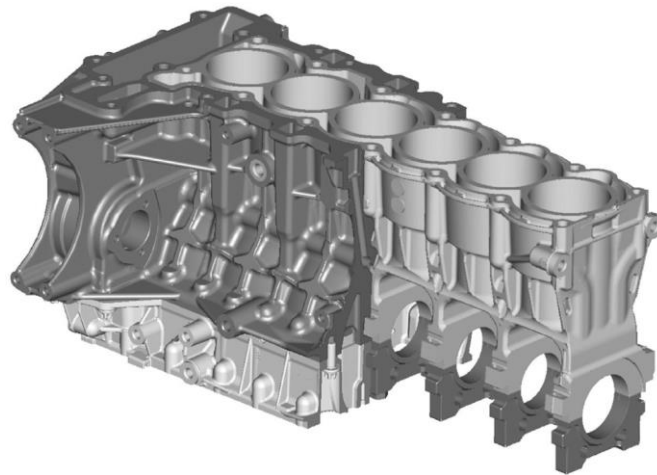
Genel olarak Al alaşımları bir aracın gövde iskeleti imalatında kullanım yeri bulunmaktadır. Mg ilk kez araç iskeletinde Al alaşımı yerine VW 3L Lupo'nun bagaj kapağında kullanıldı. Bir aracın şasisi (genel olarak süspansiyon ve jantları) iyi mukavemet dayanımına, hafifliğe, korozyon dayanımına ve porozitesiz yapıya sahip olmalıdır. 1970'lerde Porsche AM60 magnezyum alaşımını jantlarında kullanarak Al alaşımlarından %19 daha hafif ağırlığa sahip bir yapı elde etti [35]. 1960'ta VW / Audi tarafından tanıtılan AZ91'den üretilen B80 dişli kutusu muhafazası, böyle bir uygulama için bir materyal olarak magnezyumun rahatlıkla kullanılabileceğini gösterdi. Şekil 2.6 Mg şanzıman kutularının ürün yelpazesini göstermektedir. Otomatik şanzıman kutuları

da yakın gelecekte Mg alaşımlarından imal edileceği dűřünűlmektedir. Mg alaşımları kullanılarak genel otomotiv uygulamalarında Al alaşımlarına gűre %25'e kadar ağırlık avantajı sağlanmaktadır. Buda araçlarda yakıt tasarrufu ve karbon salınımlarının azalması anlamına gelmektedir [36].



Şekil 2.6. Mg alaşımlarından imal edilen Şanzıman kutuları [36].

Araçlarda kullanılan en űnemli parçalardan olan BMW firması tarafından űretilen magnezyum-aluminyum kompozit motor bloęu Őekil 2.7'de gűsterilmektedir. Motorda kullanılan karterde magnezyum alařımından yapılmıŐtır [37].



Őekil 2.7. BMW alűminyum-magnezyum kompozit motor bloęu.

Araç bileşenlerinden yoğun olarak kullanılan ve performansa etki eden bir diğer bileşen olan Şekil 2.8’de gösterilen jant Chevrolet Corvette model araçta magnezyum alaşımından yapılmıştır [37].



Şekil 2.8. Chevrolet Corvette model aracın magnezyum alaşımı jantı.

2.3.2. Havacılık

Son yıllarda, uçaklarda ağırlık azaltma ihtiyacının artırılması araştırmacıların yalnızca düşük yoğunluklu değil, aynı zamanda düşük maliyetli olması gereken materyalleri kullanmasına neden olmuştur. Tüm alaşımlar, fiber metal laminatlar (FML) ve yapısal plastikler bu amaç için çok kullanılmıştır. Al alaşımlarının geliştirilmesinde sınırlı yenilik, pahalı FML ve yapısal plastiklerin düşük darbe özellikleri bu uygulamada alternatif olarak kullanılmaya başlandı. Mg, askeri uçakların yanı sıra sıradan uçak ve helikopterlerin imalatında sıkça kullanılıyor. Bir sivil uçak olan Focke Wulf Condor 200, AM503 alaşımından yapılmış, en kaynaklanabilir metal alaşımlarından biri olarak kabul edilen motor, gövde ve kanat bileşenlerinden oluşuyordu [38]. II. Dünya Savaşı'nda, uçak parçalarını üretmek için Mg levhalar kullanılmıştır. B-36 Bombacısı, ABD XP56 ve F-80 avcı uçakları ekstrüze Mg'den yapılmıştır [39]. Şekil 2.9'da gösterilen F-22 raptor uçağı için geliştirilen F119 turbofan motor dış gövdesi WE43 magnezyum elektron alaşımından yapılmıştır [37].



Şekil 2.9. F-119 Turbofan Motoru.

2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ELDESİ

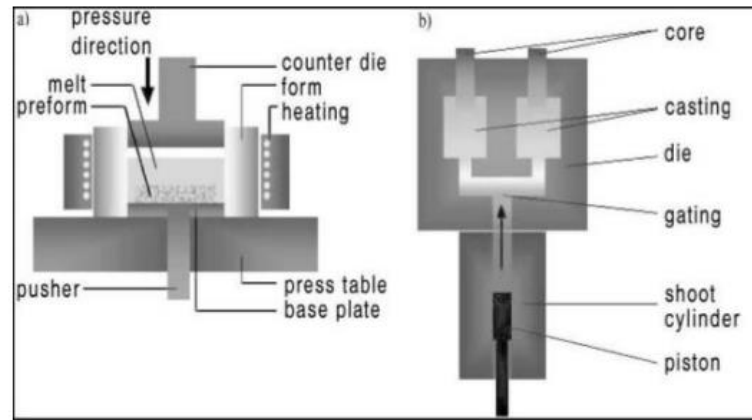
Yıllar boyunca, Mg bazlı alaşımların sentezi için birçok teknik denenmiştir. Elde edilen mikroyapısal özellikler, takip edilen sentez işlemine oldukça bağlıdır. Genel olarak iki faz kategorisi vardır: sıvı faz ve katı faz sentez yöntemleri [40]. Düşük işlem maliyeti ve iyi süneklik nedeniyle, katı faz yöntemine göre sıvı faz yöntemi tercih edilir. Sıvı faz sentezi, kum döküm, kalıp döküm, pres dökümü, karıştırıcı dökümü, sprey oluşturma ve yerinde sentezleme gibi döküm işlemlerini içerir. Mg alaşımları genellikle kum döküm ve pres döküm teknikleri kullanılarak dökülür [41], Mg-Al alaşımlarının dökümünde genelde pres döküm kullanılıyor olsa bile kum döküm yöntemi de tercih edilmektedir. Bu tez çalışmasında kum döküm yöntemi kullanılmıştır.

2.4.1. Pres Döküm

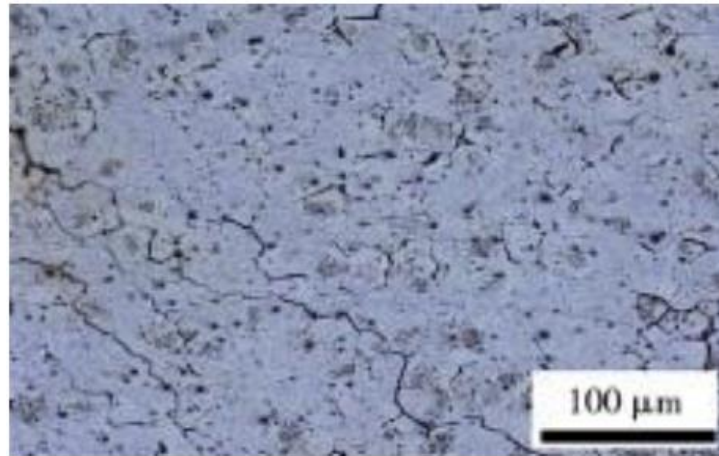
Pres döküm işlemi, dövme ve döküm işlemlerinin etkilerini birleştirir. 2 tip pres döküm, doğrudan ve dolaylı pres döküm yöntemlerini içerir. Doğrudan pres dökümünde, Şekil 2.10 (a) 'da gösterildiği gibi, erimiş metal alt kalıba dökülür ve kalıbın gereken şeklini elde etmek için üst kalıp tarafından basınç uygulanır. Dolaylı sıkışma tahmininde, Şekil 2.10 (b) 'de gösterildiği gibi, alt kalıp bir koşucu sistemi kullanılarak doldurulur. Erimiş metalin hızı, bir piston yardımıyla ayarlanabilir. Dalgıçla temasta bulunan eriyik önce katılaşır. Pistonun hızı, katılma süresini, türbülansı ve alçıdaki gaz kapanım sayısını belirler.

Dolaylı pres dökümünde doğrudan pres dökümün avantajlarından bazıları, daha yüksek malzeme verimine neden olan kılavuz sisteminin bulunmamasını, döküm üzerine uygulanan düzgün katılma basıncı nedeniyle optimum maliyet ve gözeneksiz döküm elde edilmesini içerir. Mg Metal Matris Kompozitler (MMK'lar) genellikle doğrudan pres döküm tekniği kullanılarak üretilir. Düşük ayırma maliyeti ve içsel şekillendirilmiş döküm imalatı nedeniyle, dolaylı pres döküm genellikle MMK'ların ön şekillerinin süzülmesinde kullanılır. Genel olarak, pres-döküm, küçük bir katılma sahip alaşımların sentezlenmesi için kullanılır.

Mg alaşımları için yararlı olduğu için oranı Sıkıştırılmış döküm AZ31 alaşımının tipik bir mikro yapısı, Şekil 2.11 [42]'de gösterildiği gibi, tane sınırları üzerindeki α -Mg ve β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazlarını göstermektedir. Yavaş soğuma nedeniyle daha büyük tane büyüklüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 2.10. Şematik Diyagram of (a) Doğrusal ve (b) Dolaylı Pres-Döküm.

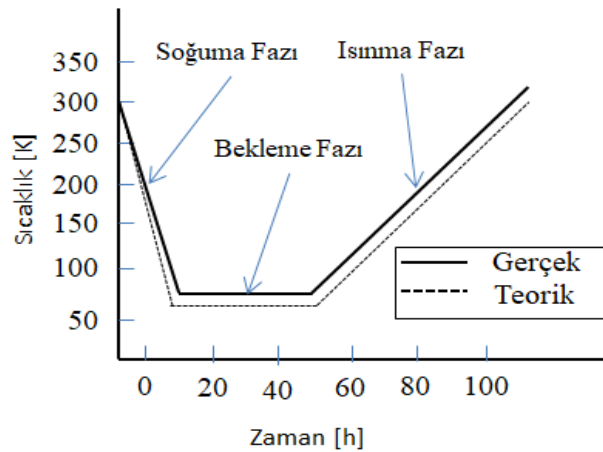


Şekil 2.11. Pres-Döküm AZ31 alaşımının mikroyapısı.

gerektiğinden diğer dökme metallere çok benzer. Bu inhibitörler, tek başına veya kombinasyon halinde kullanılan aşağıdaki bileşikleri içerir: kükürt, borik asit, potasyum floroborat ve amonyum florosilikat. Düşük maliyetli ahşap kalıp ekipmanları normalde genel amaçlı dökümler için kullanılır. Bununla birlikte, hassas üretim ile üretilen metal veya plastik kalıplar ve maça kalıbı takımları, yüksek düzeyde boyutsal kalitede magnezyum dökümleri üretmek için kullanılır. Belirgin oksidasyon eğilimi ve erimiş magnezyumun düşük yoğunluğu nedeniyle, geçitleme ve kanal sisteminin türbülanslı akışı en aza indirecek ve magnezyum dökümlerin sıralı katılaşmasını sağlayacak şekilde tasarlanması gerekmektedir [37].

2.5. KRİYOJENİK İŞLEM

Uzun yıllardan beri ısıl işlemlere, malzeme özelliklerini artırmak için ihtiyaç duyulmuştur. Bu işlem genellikle oda sıcaklığına göre ısıtma ya da soğutma ile yapılır. Soğuk işlem 20. yüzyıldan itibaren uygulama alanı bularak ısıl işlem ile karşılaştırılmıştır. Kriyojenik işlem yaklaşık olarak -80°C sıcaklıklarda yapılır. Sıvı azot kriyojen olarak (sıvı azot sıcaklığı (-196°C) kullanıldığında işlem derin kriyojenik işlem (DCT) olarak adlandırılır. Kriyojenik işlem genel olarak her türlü 0°C sıcaklıklar altında uğraşmak, malzemeyi belirli bir sıcaklığa kadar soğutmak, seçilen süre boyunca o sıcaklıkta tutmak ve daha sonra kademeli olarak oda sıcaklığına getirmektir. Şekil 2.13'te kriyojenik işlemin carious fazlarını gösteren bir sıcaklık-zaman çizimi gösterilmektedir [44].



Şekil 2.13. Kriyojenik işlem için sıcaklık-zaman eğrisi.

DCT işlemlerinin başlangıcında öncelikli olarak çelik ve diğer demir bazlı alaşımlar kullanıldı. Bu çalışmalar sonucunda DCT'nin aşağıdaki değişikliklere neden olduğu gözlemlendi:

- a) Östenitin martenzite tamamen dönüşümü
- b) Matris içine dağılmış ince karbür çökeltileri
- c) Kalıntı gerilim gidermesi

Zhirafar ve arkadaşları, AISI 4340 çelik üzerinde DCT gerçekleştirdi. DCT öncesi ve sonrası nötron kırınım metodu kullanılarak kalıntı östenit hacmini hesapladılar. Kalıntı östenit hacminin %5.7'den % 4.2'ye düştüğü gözlemlenildi [45]. Leskovek ve ark. [46] DCT'nin vakumlu ortamda ısıtılma işlemine tabi tutulmuş yüksek hız çeliğinin mikro yapı üzerindeki etkisini araştırdı. DCT sonrası alaşımın mikro yapısında kalıntı östenitteki azalmadan ayrı olarak lamel yapılara benzer karbür çökeltileri gözlemlenildi. Ayrıca, Rockwell C sertlik değerinin DCT'den sonra %5.26 oranında arttığını gözlemlenildi. Ayrıca, DCT'nin takım ömrünü %44 oranında geliştirdiğini gözlemlenildi. Huang ve ark. [30], M2 takım çeliğinde DCT gerçekleştirdiler. DCT sonrası karbürlerin varlığının %5 ila %11 aralığında arttığını gözlemlenildi. DCT'ye bağlı olarak, kırılmalara neden olan iç streslerin oluştuğunu ileri sürdüler. Bu iç streslerin oluşumunun ana nedeni olarak alaşım elementlerinin oranı ve difüzyon oranı olarak belirttiler. Difüzyon oranları DCT altında malzemenin tutulma süresine bağlıydı ve aşırı yoğun difüzyonda artan iç gerilmeler gözlemlenildi. Asl ve ark. AZ91 magnezyum alaşımı üzerinde yaptıkları derin kriyojenik işlemlerin mikroyapı ve aşınma direnci üzerine etkileri çalışmasında β - $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının morfolojisinin değiştiğini gözlemlemişlerdir. Ötektik β fazı matrise dağılmış bu değişikliklerle birlikte aşınma direncinin iyileştiğini gözlemlemişlerdir [10]. AZ31 Dökme alaşım üzerinde daha önce yapılmış olan çalışmada da kriyojenik işlemlerden sonra mikroyapıda çok sayıda ikincil faz parçacığının çökeldiği ve faz morfolojisinin önemli ölçüde değiştiği gözlemlenmiştir. Bu çalışmada elde edilen bir diğer bulguda alüminyum atomlarının çözünürlüğünün kriyojenik işlem sıcaklığı azaldıkça düştüğü yönünde olmuştur. Elde edilen mikroyapıdaki değişimler sonucunda düşük kriyojenik işlem sıcaklıklarında önemli ölçüde çekme ve uzama dayanımında artış gözlemlenmiştir [47].

Bu denklemde P yük (Kgf cinsinden), D bilya çapı (mm olarak) ve d numune üstündeki iz çapıdır (mm cinsinden) [48].

2.6.2. Çekme Testi

Çekme testi, numunenin uçları boyunca numuneye etki eden çekme kuvveti olarak tanımlanabilir. Tek eksenli, çift eksenli veya üç eksenli olabilir. Bu tez çalışması, malzemelerin mukavemeti hakkında tasarım verileri elde etmek için yaygın olarak kullanılan tek eksenli çekme testi kullanılmıştır. Tek eksenli gerilim testinde, numune artan tek eksenli bir yüke maruz kalır. Numunenin uzamasındaki değişiklikler not edilir. Elde edilen veriler mühendislik gerinim-gerilme eğrisi olarak çizilir. Denklem (2.2)'de mühendislik gerilimi formülü verilmiştir. Mühendislik gerilimi yükün (P), numunenin orijinal kesitine olan oranıdır (A_0) [42]. Standart bir mühendislik gerinim, gerilme eğrisi Şekil 2.15'te gösterilmiştir.

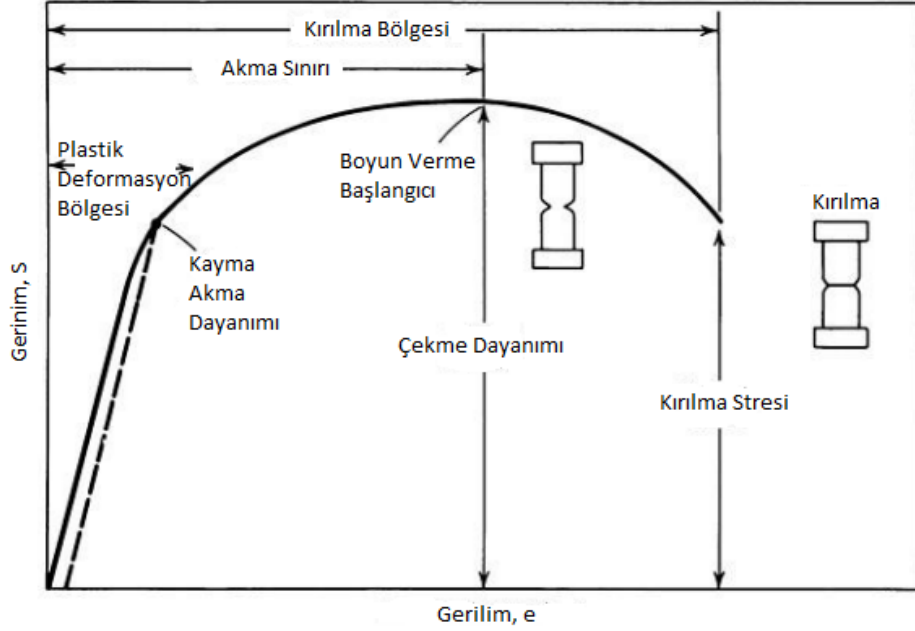
$$S=P/A_0 \quad (2.2)$$

Denklem (2.3)'te Mühendislik gerinimi formülü verilmiştir. Mühendislik gerinimi (e), uzunluk değişiminin (ΔL), orijinal uzunluğa (L_0) olan oranıdır.

$$e=\Delta L/L_0=(L-L_0)/L_0 \quad (2.3)$$

Çekme deneyinde parça, önce “elastik” şekil değiştirir daha sonra da “plastik” şekil değişimine maruz kalarak son olarak da parça kırılarak kopar. Elastik bölge malzemenin akma sınırına kadar olan bölümüdür. Plastik bölge akma sınırından sonra olan bölgedir. Çekme deneyinde malzemenin kopuncaya kadar gerçekleşen deformasyonu iki kademe gerçekleşir.

- Elastik deformasyon
- Plastik deformasyon



Şekil 2.15. Gerilim-Gerinim Eğrisi [49].

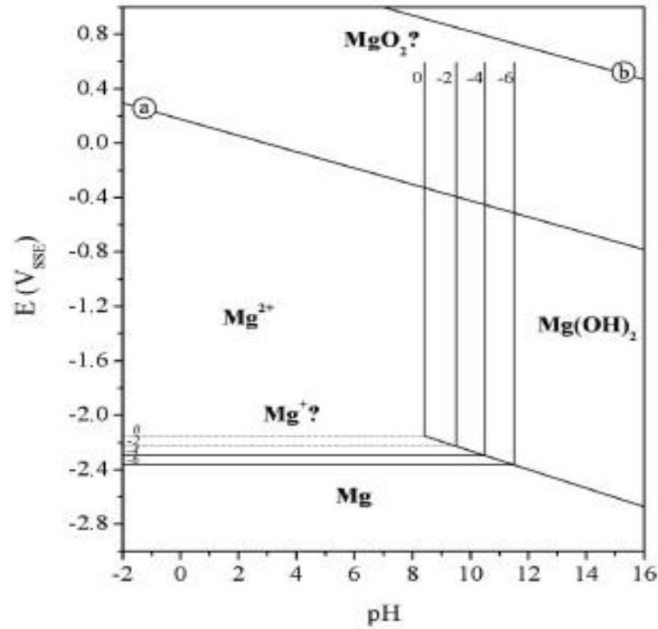
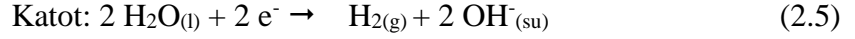
Numunenin hacmi deney boyunca sabit kalır. Başlangıçta, pekleşme kesit alandaki daralmadan daha fazladır. Belirli bir noktada, pekleşmenin devam etmesi için gerekli yükün aşılması gerekmektedir. Bu nokta, boynunun başladığı ve mühendislik stresinin azalmaya başladığı numunenin nihai gerilme dayanımıdır. Boyun verme malzeme kırılıncaya kadar devam eder. Malzemenin maksimum yüke ulaştığı nokta çekme dayanımı olarak tanımlanır [50].

2.7. KOROZYON

2.7.1. Magnezyumun Korozyonu

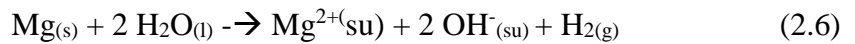
Mg'nin korozyonu basit bir işlem gibi görünmekle birlikte yoğun bir şekilde tartışılmaktadır. Mg'nin genel korozyon davranışının sadeliği, Mg-H₂O Pourbaix diyagramında, Şekil 2.16'da görülmektedir. Mg, metalik durumunda sadece çok düşük potansiyelerde (<-2.4 V vs. Standart Hidrojen Elektrodu (SHE)) bulunabilir ve bu potansiyelin üzerinde Mg²⁺ 'ya oksitlenir. Mg(OH)₂, pH 8'in üzerinde termodinamik olarak stabil bir korozyon ürünüdür ve K_{sp} (5.6 x 10⁻¹²) ile kontrol edilmelidir. Bu, diğer birçok metal-H₂O sistemlerine kıyasla alışılmadık derecede basit bir sistemdir. Varlığı tartışılabilir olan Pourbaix diyagramında iki tür listelenmiştir (Şekil 2.16): Tek değerli Mg⁺ ve MgO_x. Pourbaix şemasında (Çizgi (a)) su stabilite bölgesinin altına

yerleştirilmiş Mg oksidasyon için denge potansiyeli ile suyun azaltılması, Mg'nin sürülmesi için hali hazırda uygun bir katodik reaksiyondur. Korozyon yarı reaksiyonları genellikle formül 2.4 ve 2.5'te verildiği şekilde ifade edilir: [51]



Şekil 2.16. Mg-Su sistemi için Pourbaix diyagramı [51].

Birleştirilmiş korozyon reaksiyonu formül 2.6'da verildiği gibidir [51]:



İki reaksiyon arasındaki E_e farkı son derece büyük olduğundan, korozyon kinetiği hızlıdır ve OH⁻ üretimi ara yüzey pH'sını artıracak ve sonunda Mg(OH)₂'nin birikmesine yol açacaktır,



Bu reaksiyonla birlikte, H₂ de oluştuğundan, Mg yüzeyinden gelen gaz oluşumu, Mg(OH)₂'nin çökmesini ve kompakt bir tabaka oluşturmasını önler. Ortaya çıkan birikmiş korozyon ürünü, Mg yüzeyinde kırık, gözenekli, trombosit benzeri bir yapıya sahiptir [50].

2.7.2. Magnezyum ve Elektrokimyasal Seri

Mg bazlı malzemelerin korozyon direncinin düşük olması, sadece Pourbaix şemasında, Şekil 2.16'da özetlendiği gibi sulu bir ortamda termodinamik kararsızlığının bir sonucu değildir. Elektrokimyasal seriler redoks çiftlerini standart redüksiyon potansiyellerine göre sıralar (E^0). Daha negatif E^0 değerlerine sahip olan türlerin oksidasyon yoluyla elektronları serbest bırakma eğilimi daha yüksek olurken, daha pozitif E^0 değerine sahip olanların elektronları kabul etme ve azaltma olasılığı daha yüksektir. Bu mekanizma ile ilgili elektrokimyasal bir dizi element Çizelge 2.6'da standart hidrojen elektroduna (SHE) karşı tüm potansiyellerle birlikte gösterilmektedir.

Görülebildiği gibi, Mg elektrokimyasal serinin en üstüne oturur, böylece en aktif yapısal malzeme (Ca bir yapısal malzeme olarak düşünülmez) olarak tanımlanır. Bu konumun bir sonucu, elektrik temasında, bu spesifik ortamda Mg'den daha düşük bir denge potansiyeline sahip bir redoks çiftinin Mg ile galvanik bir çift oluşturabilmesidir [51]. Bu olasılık, Mg'nin elektrokimyasal serilerde kaçınılmaz olarak Mg'nin altında olan diğer elementlerle alaşımınmasını zorlaştırır ve böylece alaşım içinde kendiliğinden korozyona neden olabilir.

Çizelge 2.6. Bu tezde kullanılan ve bazı elementler için standart redüksiyon potansiyellerini gösteren elektrokimyasal seri [52].

ELEMENT	E ⁰ indirgeme/ SHE
$\text{Ca}^{2+} + 2 e^{-} \rightarrow \text{Ca}$	-2,87 V
$\text{Mg}^{2+} + 2 e^{-} \rightarrow \text{Mg}$	-2,37 V
$\text{Y}^{3+} + 3 e^{-} \rightarrow \text{Y}$	-2,37 V
$\text{Al}^{3+} + 3 e^{-} \rightarrow \text{Al}$	-1,66 V
$\text{Zr}^{4+} + 4 e^{-} \rightarrow \text{Zr}$	-1,45 V
$\text{Zn}^{2+} + 2 e^{-} \rightarrow \text{Zn}$	-0,76 V
$\text{Cr}^{3+} + 3 e^{-} \rightarrow \text{Cr}$	-0,74 V
$\text{Ni}^{2+} + 2 e^{-} \rightarrow \text{Ni}$	-0,23 V
$\text{Fe}^{3+} + 3 e^{-} \rightarrow \text{Fe}$	-0,41 V
$\text{Cu}^{2+} + e^{-} \rightarrow \text{Cu}^{+}$	0,16 V
$\text{Cu}^{2+} + 2e^{-} \rightarrow \text{Cu}$	0,34 V
$\text{Ag}^{2+} + e^{-} \rightarrow \text{Ag}$	0,80 V

2.7.3. Mg Alaşımlarının Korozyonunda Alaşım Elemanlarının Rolü

Özelliklerini geliştirmek için Magnezyum alaşım ilavesi olarak çok çeşitli elementler denenmiştir. Bir alaşım elementi seçerken, alaşımların korozyon özellikleri üzerindeki etkisi dikkate alınmalıdır. Literatürde galvanik çiftler nedeniyle hiçbir alaşımın potansiyel lokalize katot içermeyen saf Mg'ye eşdeğer korozyon oranlarına ulaşamayacağı fikri vardır [53].

2.7.3.1. *Aluminyum*

Mg'de düzenli olarak en çok kullanılan alaşım ilavesi Al'dir ve Mg alaşımlarının korozyon performansı üzerindeki etkileri tartışılmaktadır. Mg alaşımlarındaki Al miktarının artırılması, kuvvetlerini artırır ve β fazının ($Mg_{17}Al_{12}$) oluşumu ve ötektik fazın (α -Mg ve β - $Mg_{17}Al_{12}$ karışımı) oluşması nedeniyle süneklikte bir azalmaya neden olur. Genel olarak Aluminyumun Magnezyum alaşımlarına ilavesinin korozyon performansını arttırdığı kabul edilir.

Tutarlı bir şekilde bildirilen iki gözlem, bir Mg alaşımındaki Al içeriğindeki bir artışın hem Ecorr hem de Volta potansiyelinde pozitif bir artış oluşturduğu yönündedir. Al içeriğinin artırılması, döküm eriyiğinde olası bir Al-Fe fazının oluşumu yoluyla alaşımın saflığını da azaltır ve sonuç olarak, bu fazın oluşumunu önlemek için Mn, genellikle Al ile eklenir [51].

2.7.3.2. *Çinko*

Çinko (Zn), çok sık kullanılan Mg alaşımları serisinin (AZ serisi) bir alaşım ilavesidir. Bir Mg alaşımının Zn içeriğinin artırılmasının, korozyon sırasındaki izin verilen yüzeyde zenginleşerek korozyon hızını azalttığı gözlemlenmiştir. Mg alaşımlarının β -fazında Zn varlığının, β -fazını daha güçlü bir katot yaptığı rapor edilmiştir. Bu güçlü katot oluşumu da korozyon direncini artırmaktadır [51].

2.7.4. **Magnezyum Alaşımlarının Korozyonu**

Genellikle metalik özellikte olan malzemelerin etkileşimde oldukları ortam ile girdikleri elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda yapılarında meydana gelen istenmeyen değişikliklere korozyon denir. Bu tanıma bakılınca, oluşumunu sağlayan reaksiyonun türüne göre "kimyasal" ve elektrokimyasal" olmak üzere iki çeşit korozyon olayından bahsetmek mümkündür. Kimyasal korozyon, metal ve alaşımlarının gaz ortamlar içerisindeki oksitlenmesidir (kuru korozyon). Metal ve alaşımlarının sulu ortamlar içerisindeki bozulmaları ise elektrokimyasal korozyon (ıslak korozyon) olarak adlandırılır. Her iki korozyon türünün de gerçekte elektrokimyasal mekanizma ile ortaya çıktığı bilinmektedir. Magnezyum alaşımları korozyon türlerinden biri olan çukurcuk korozyonuna karşı dayanıksızdır. Çukurcuk korozyonu metal yüzeyinde çok küçük çukurlar oluşturarak oluşan korozyon türüdür. Bu korozyon türünde parçalar kısa bir süre içerisinde delinerek kullanılmaz hale gelmektedir. Ayrıca bu korozyon türünde

çukur diplerinde oluşan mekanik gerilme yoğunlaşması gerilmeli korozyon olarak tanınan çatlama olayını başlatabilir. Çukurcuk korozyonu genellikle klor ve brom iyonları içeren nötr ortamlardan (örneğin NaCl, CaCl₂, MgCl₂) oluşur. NaCl ve oksijen bakımından çok zengin olan deniz ortamı, çukurcuk korozyonunda çok etkili olan bir ortamdır. [51] Korozyon davranışlarını tahmin etmek, malzemeyi tanımak ve çevresel şartları kontrol altına almak için korozyon deneyleri yapılır. Bu test yöntemlerinden birincisi en basit yöntem olan kütle kaybı yöntemi diğeride elektrokimyasal korozyon testidir. Elektrokimyasal testler 2 şekilde yapılır. Potansiyodinamik polarizasyon testi olarak adlandırılan kısa süreli korozyon testi ve AC elektrokimyasal empedans spektrumu (EIS) testi olarak adlandırılan uzun süreli korozyon testi.

Mg alaşımlarının korozyonu, kütle kaybı, hidrojen toplama gibi çeşitli teknikler ve hepsi birbirleriyle uyum içinde korozyon oranları sağlaması gereken elektrokimyasal empedans spektroskopisi dahil çeşitli elektrokimyasal teknikler kullanılarak incelenebilir [54]. Mg alaşımları, galvanik malzeme serisinde daha asil olan ikinci bir malzemeye bağlandıklarında galvanik korozyona ve ayrıca alaşımın içindeki mikro galvanik korozyona karşı hassastırlar. Mg alaşımı korozyonunun karmaşıklığı, Çizelge 2.7'de gösterildiği gibi ortak Mg alaşımları için bildirilen korozyon dirençlerinin karşılaştırılmasıyla takdir edilebilir.

Çizelge 2.7. Mg alaşımlarının karşılaştırmalı korozyon oranlarının listesi [51].

Korozyon Dayanımı	Metod
AZ80>AZ91>AZ31	EIS
AM60>AZ31	Kütle kaybı
Saf Mg>AZ91>ZE41	Kütle kaybı, Hidrojen
Saf Mg=AZ3>AZ91>AM30>AM60>ZE41	Hidrojen
WE43>ZE41>AZ91	Kütle Kaybı
ZK60>AM60>AZ31>AZ91	EIS
AZ91>AZ61>AZ31	Kütle kaybı

Yapılan çalışmalarda bile, tutarlı bir eğilim mevcut değildir. Bu tutarsızlıkların iki ana nedeni olabilir bunlar:

- Kirleticilerin varlığı ve
- Mikroyapısal etkiler.

Cu, Fe, Ni gibi döküm sırasında ortaya çıkan safsızlıklar alaşım için belirli bir tolerans limitinin üstünde bulunduğu anda alaşım korozyon direnci üzerinde zararlı etkilere sahip olabilir [55]. Bakır (Cu) yapıda mevcut olduğunda β -fazında toplanır, bu da onu daha güçlü bir katot yapar [56]. Öte yandan Fe, Mg matrisi içerisinde serbestçe dağıtılabilir veya katodik Fe-Al veya Fe-ikincil metal fazları oluşturabilir. Eriyik dibine çökecek olan çözünmeyen Mn-Fe kompleksleri oluşturmak için döküm eriyiğine Mn eklenir, böylece nihai dökümdeki Fe içeriği azalır [57]. Bununla birlikte, bazen Fe kaçınılmaz olarak kalır ve yüksek Fe: Mn oranının artırılmış katalitik aktiviteye sahip olacağından Mn içeren fazlarda toplanabilir [58]. Kirleticilerin varlığı sadece alaşımların toplu korozyon performansını değil, aynı zamanda mikroyapı özelliklerini de etkiler.

2.7.5. Kütle Kaybı Yöntemi

En eski ve en basit korozyon ölçme yöntemi kütle kaybı yöntemidir. Bu yöntemde kupon numuneler atmosfer açık ortamda ya da çözelti içerisine bırakılır ve belirli bir süre sistemde bekletildikten sonra çıkarılır. Testlerden önce ve sonra numuneler tartılarak kütleleri alınır. Numune ağırlıklarının alınmasında gerçekleştirilecek hataların yanında korozyon hızının küçük olduğu ortamlarda, tartılabilir bir kütle kaybı olabilmesi için metal kuponlarının uzun süre korozif ortamda kalması kütle kaybının dezavantajları olarak bilinmektedir. Kütle kaybı yöntemi ile korozyon hızı belirlenirken çözünmenin homojen olması gerekmektedir. Korozyon ürünlerinin tamamen çözünerek metal yüzeyinden uzaklaştırılması gerekmektedir. Eşitlik 2.8'de kütle kaybının hesaplanması gösterilmiştir [59].

$$\text{Kütle Kaybı} = \left(\frac{\text{İlk kütle} - \text{Son kütle}}{\text{İlk Kütle}} \right) \times 100 \quad (2.8)$$

2.7.6. Elektro Kimyasal İmpedans Spektroskopisi

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS), küçük genlikli bir AC bozulma sıklığı ile, elektrokimyasal bir sistemin empedansının değişiminin çalışmasını içerir.

Empedans spektroskopisi tahribatsız bir tekniktir ve malzemenin zamana bağlı özellikleri hakkında bilgi verir, aynı zamanda pillerin korozyonu veya deşarjı gibi devam eden işlemler hakkında da bilgi verir. Örneğin; yakıt hücreleri, bataryalar veya başka herhangi bir elektrokimyasal işlemdeki elektrokimyasal reaksiyonlar.

Genel olarak, empedans, Ohm yasasının sınırlaması olmadan, bir elektrik akımının akışına dayanma kabiliyeti olarak bilinir. Daha spesifik bir şekilde empedans; akım çeşitli dirençlerden, kapasitörler veya indüktörlerden oluşan bir devre içinden akarken gerçekleşen karmaşık bir direnç olarak tanımlanabilir.

Empedans kavramı hem doğru hem de alternatif akımda çalışan sistemler için kullanılabilir olsa da EIS tekniği yalnızca alternatif akım geçişi yapan sistemlere odaklanır. Ayrıca, yukarıda bahsedildiği gibi, sistemden geçen bozulmanın genliği, doğrusallığı korumak için yeterince küçük olmalıdır. Doğrusal bir sistem, süperpozisyonun önemli özelliğine sahip olan sistemdir ki bu özellik; girdi birkaç sinyalin ağırlıklı toplamından oluşuyorsa, çıkış sadece sistemin sinyallerin her birine verdiği tepkilerin üst üste binmesi (ağırlıklı toplam) şeklinde olmasıdır. Bu teknik kullanılarak analiz edilen çoğu element, çok çeşitli çalışma koşulları için doğrusal bir davranış göstermez. Bununla birlikte, çok küçük tanımlı bir aralık için bu özellik analizden yararlanmak için kullanılabilir [60].

Doğrusallığın önemini açıklamak için önce direnç kavramı tanımlanmalıdır. Ohm kanunu direnci, voltaj (E) ile akım (I) arasındaki oran olarak tanımlar.

$$R(t) = E(t)/I(t) \quad (2.9)$$

Ancak bu ilişki sadece bir devre elemanı (ideal direnç) ile sınırlıdır. İdeal bir direnç birkaç basitleştirici özelliğe sahiptir:

- Tüm akım ve voltaj seviyelerinde Ohm Yasasını izler.
- Direnç değeri frekanstan bağımsızdır.
- Bir rezistörden geçen AC akım ve voltaj sinyalleri birbirleriyle aynı fazdadır.

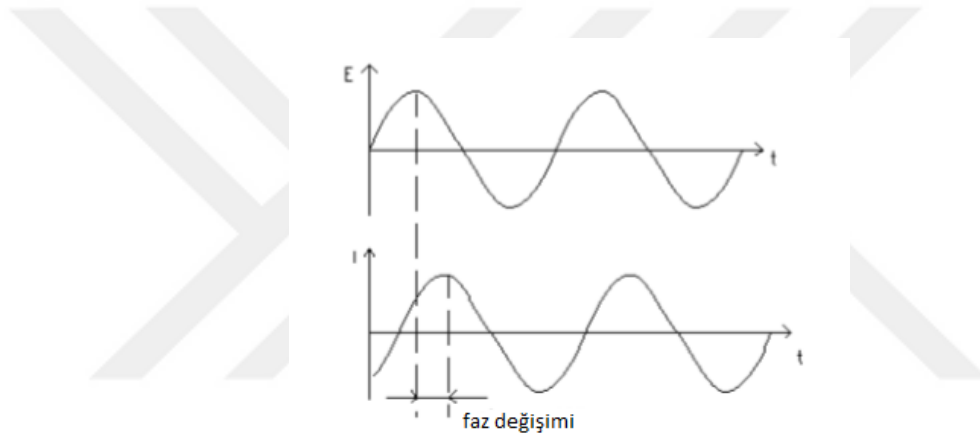
Devre elemanları çok daha karmaşık davranış sergilediklerinden dolayı basit direnç kavramı terk edilerek daha genel bir devre parametresi olan empedans kullanılır. Direncin aksine, empedans yukarıda listelenen basitleştirici özelliklerle sınırlı değildir. Elektrokimyasal empedans, genellikle bir elektrokimyasal hücreye bir AC potansiyeli

uygulanarak hücre içerisindeki akımın ölçülmesi ile tayin edilir. Sinüzoidal potansiyel bir uyarım uygulayarak, uyarım frekansını ve harmoniklerini içeren bir AC akım sinyal yanıtı elde edilir. Bu akım sinyali sinüzoidal fonksiyonların toplamı olarak analiz edilebilir (bir Fourier serisi). Doğrusal (veya sözde doğrusal) bir sistemde, sinüzoidal bir potansiyelle verilen mevcut cevap, aynı frekansta bir sinüzoid olacaktır, ancak Şekil 2.17.'de gösterildiği gibi grafik faz olarak kaydırılır.

Zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilen uyarma sinyali şu şekildedir:

$$E(t) = E_0 \cos(\omega t) \quad (2.10)$$

$E(t)$ t zamanındaki potansiyeldir, E_0 sinyalin genliğidir ve ω radyal frekanstır



Şekil 2.17. Potansiyel girişi ve akım çıkışı arasındaki ilişki.

Benzer şekilde çıkış akımını I_0 , radyal frekans ve faz kayması ile ifade edilebilir:

$$I(t) = I_0 \cos(\omega t - \phi) \quad (2.11)$$

Bu yeni potansiyel ve akım tanımlarını kullanarak, Ohm yasasına benzer bir ifade şöyle yazılabilir:

$$Z(t) = E(t)/I(t) = E_0 \cos(\omega t) / I_0 \cos(\omega t - \phi) = Z_0 (\cos(\omega t) / \cos(\omega t - \phi)) \quad (2.12)$$

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. DENEYSEL MALZEMELER

Deneylerde Yıldırım Anot Ltd. şirketinde dökülen kimyasal analizi Çizelge 3.1’de verilen AZ63 alaşımlı magnezyum anot çubukları kullanılmıştır. Deneyde kullanılan numuneler T6 ısıl işleme tabi tutulmuştur. Numunelere T6 ısıl işlemi yapılırken 400°C’de 24 saat çözeltiye alma işlemi yapıldıktan sonra 220°C’de 1 saat yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Kullanılan malzemenin kimyasal analizi ESAN Eczacıbaşı A.Ş.’de OBLF Ve OS model cihaz kullanılarak yapılmıştır.

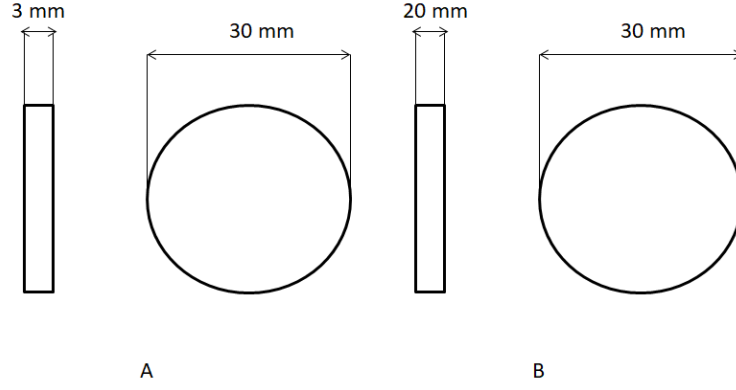
Çizelge 3.1. AZ63 Magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi.

Element	Al	Zn	Mn	Si	Mg
%	5,12	2,54	0,18	0,01	92,15

Deneylerde kullanılan numuneler, AZ63 yuvarlak kesitli malzemedan kesme cihazında, saniyede 0,4 mm hızla kesildikten sonra hassas CNC tornalarda çekme testlerinde kullanılacak standart numuneler ile sertlik ölçümleri, mikroyapı ve korozyon incelemeleri için kullanılacak disk numuneler Şekil 3.1’deki gibi imal edilmiştir. Numunelere yapılan kriyojenik işlemler Çizelge 3.2’de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Numunelere yapılan işlemler.

Numune kodları	Kriyojenik İşlem	İşlem Zamanı (saat)
İşlemsiz AZ63	Kriyojenik İşlem Yok	Yok
AZ63 (24h)	-80°C	24
AZ63 (48h)	-80°C	48



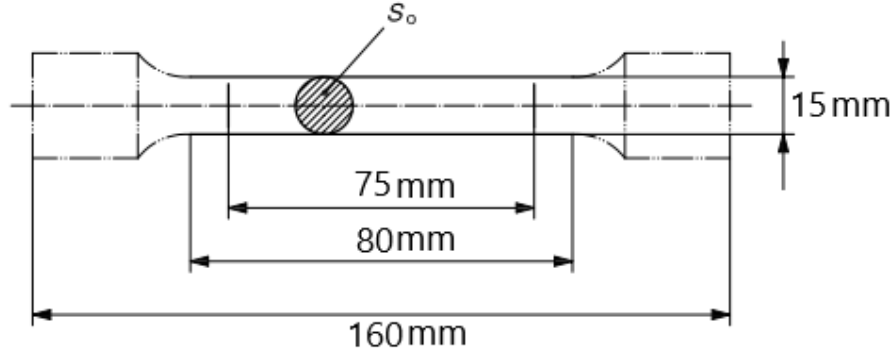
Şekil 3.1. Deneysel numune ölçüleri A) Korozyon deneylerinde kullanılan numune ölçüsü, B) Sertlik ve Mikroyapı testlerinde kullanılan numune ölçüsü.

3.2. DENEYLERİN YAPILIŞI

Deneysel testlerde SEM ve EDS analizleri Düzce Üniversitesi bünyesinde bulunan Bilimsel ve Teknolojik Araştırmalar Uygulama ve Araştırma Merkezinde (DUBİT), Korozyon testleri, Düzce Üniversitesi Korozyon Araştırma Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Çekme testleri, Teknorot Otomotiv Ürünleri San. Tic. A.Ş.'de, Kimyasal analiz testleri, Eczacıbaşı ESAN A.Ş.'de, Sertlik Testleri, Karaman Döküm Tic. Ltd. Şti.'de ve Mikroyapı testleri TR Mekatronik Sistemler A.Ş. bünyesinde bulunan laboratuvarlarda gerçekleştirilmiştir.

3.2.1. Çekme Testi

Anot olarak kullanılmak üzere Yıldırım Anot firmasından alınan işlenmemiş anot çubuklarından çekme numunesi çıkartıldıktan sonra çekme numuneleri T6 ısıl işlemine tabi tutularak bu numunelere yapılacak işlemler için 3'er adet çekme numunesi olacak şekilde toplamda 9 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Tüm çekme çubuklarına kriyojenik işlem uygulandıktan hemen sonra çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler ISO 6892-1 standardına göre yapılmıştır. Çekme çubuğu ölçüleri Şekil 3.2'de verilmiştir.



Şekil 3.2. Çekme çubuğu ölçüleri.

3.2.2. Sertlik Testi

Dökümü yapılan numunelerden 30 mm çapında her kriyojenik işlem için 2'şer adet numune çıkartılmıştır ve bu numuneler üzerinden 3'er adet her kriyojenik işlem için toplam 6 adet sertlik değeri alınarak ortalamaları alınmıştır. Sertlik testleri için Karaman Döküm bünyesinde bulunan BMS 3000 OBPC Brinell sertlik cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri 10 mm bilya ile 500 Kgf yük altında gerçekleştirilmiştir. Testler ISO 6506-1 standardına göre yapılmıştır.

3.2.3. Korozyon Testi

Korozyon deneylerinde elektrokimyasal elektrokimyasal impedans spektroskopisi Gamry 3000 model cihaz ile Gamry Echem Analyst programı ile ölçülmüştür. Ağırlık kaybı deneyleri 5 farklı numunenin toplam ağırlığı alınarak %3,5 NaCl çözeltisinde bekletildikten sonra numunelerin toplam ağırlıkları hesaplanarak matematiksel formül yardımı ile değişim hesabı yapılmıştır.

3.2.4. Taramalı Elektron Mikroskobu

Kriyojenik işlemler ve işlemsiz numunelerden kriyojenik işlemlerden sonraki faz değişimlerini ve korozyon testleri sonrası yapısal değişimlerini gözlemlemek için SEM görüntüleri alınarak karşılaştırmalar yapılmıştır. SEM görüntüleri alınan numunelerdeki faz dağılımlarını belirlemek için EDS analizleri ile faz değişim karşılaştırılması yapılmıştır. Bu işlemler için FEI marka Quanta FEG 250 model SEM cihazı kullanılmıştır.

3.2.5. Mikroyapı Görüntüleri

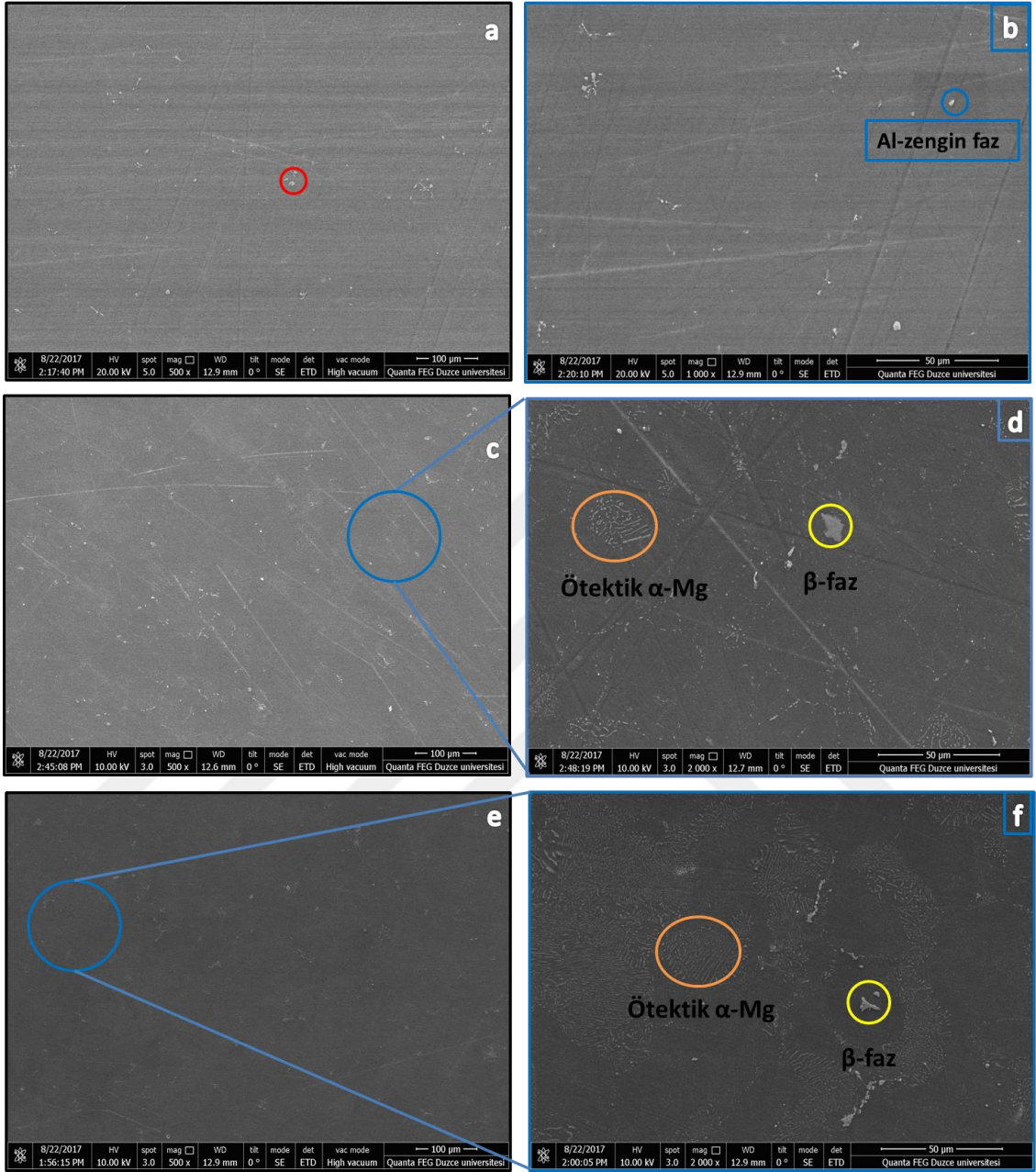
Kriyojenik işlem yapılmış ve işlem görmemiş numunelerden kriyojenik işlemlerden sonraki faz değişimlerini gözlemlemek için optik mikroskop numuneleri hazırlanmıştır. Numuneler hazırlanırken sırası ile 1000, 2000 ve 4000 numaralı zımparalar ile zımparalanmıştır ve ardından parlatma cihazında 0,01 μ 'luk alümina çözelti ile parlatılmıştır. Parlatılan numuneler %5'lik Nital (%5 nitrik asit + %95 etil Alkol) çözeltisi ile dağlanmıştır. Dağlanan numuneler Nikon MA100 model optik mikroskopta 100x büyütmede incelenmiştir.



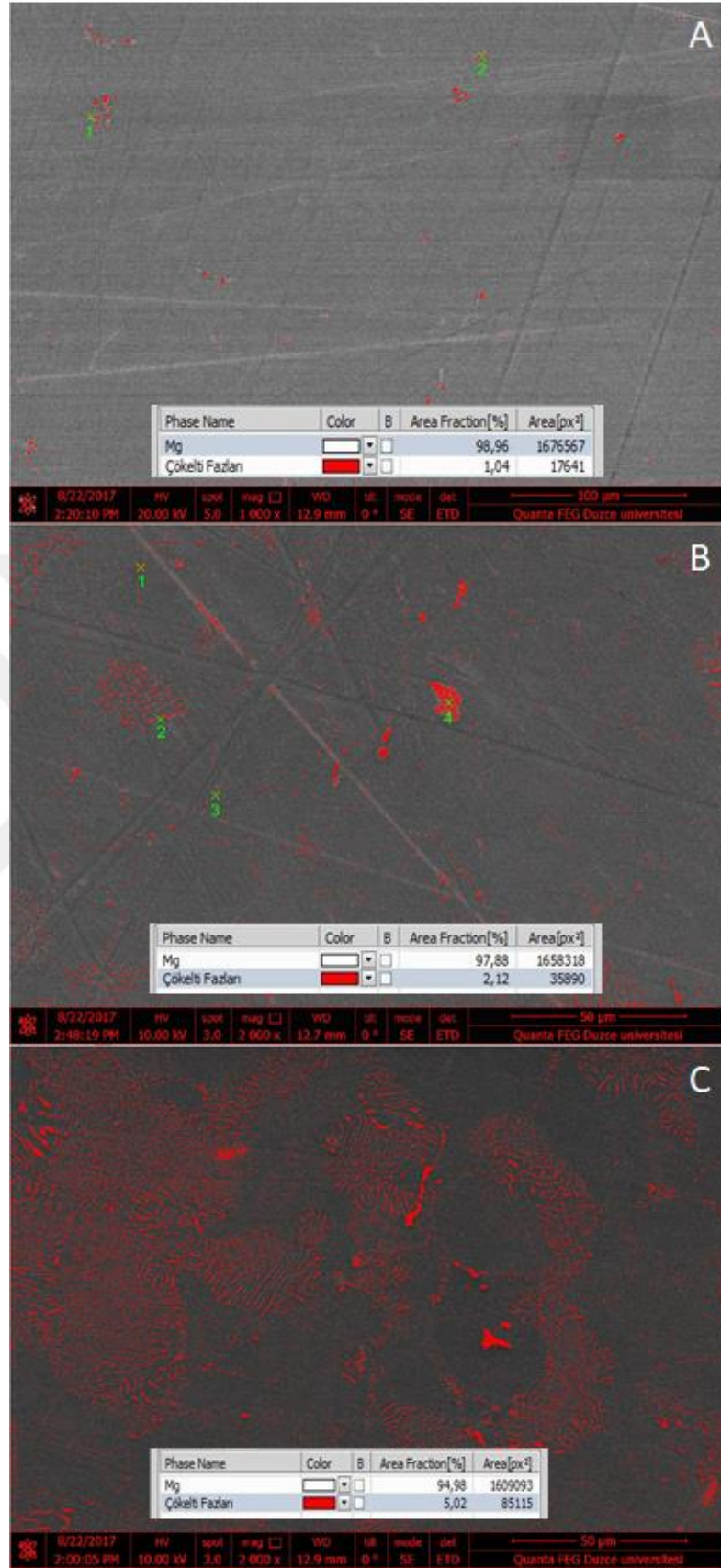
4. BULGULAR VE TARTIŞMA

4.1. KRIYOJENİK İŞLEM SONUCU ELDE EDİLEN MİKROYAPI VE SEM GÖRÜNTÜLERİ

Şekil 4.1’de farklı kriyojenik işlemlerden sonra AZ63 magnezyum alaşımlarının SEM görüntüleri verilmektedir. Kriyojenik işlemsiz makro yapıda tek bir form görülmekte olup kısmi Al-Mn esaslı çökelti fazlarına rastlanmıştır. Al-Mn zengin çökelti fazının mikro görüntüsü Şekil 4.1. b’de görülmektedir. Kriyojenik işlem görmüş numunelerde ise daha üniform ve yüksek miktarda Mg-Al çökelti fazları gözlemiştir. Şekil 4.1’de artan kriyojenik işlem süresi ile Al-Mn fazlarının azaldığı ve Mg-Al tipi β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazlarının yapıya daha homojen dağıldığı gözlemlenmektedir. Ayrıca kriyojenik işlem ile ötektik α fazları ve β fazları daha belirgin hale gelmiş ve boyutları ve miktarı artmıştır. Yapılan EDS sonuçları sonrasında Al elementinin belirli oranlarda yapıda daha fazla çökeldiği anlaşılmaktadır. Asl ve ark. AZ91 magnezyum alaşımı üzerinde yaptıkları çalışmalarda kriyojenik işlemlerle birlikte β fazlarının mikro yapıya homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir [10]. Huang Zhiquan ve ark. AZ31 magnezyum alaşımı üzerinde çalışmış ve benzer sonuçlar elde etmişlerdir [47]. Yapılan araştırmalar da kriyojenik işlemler sonrasında ani kafes daralmaları meydana gelmiş ve bunun sonucunda ikincil α ve β fazlarının çökmesi için alan ekstra alanlar ortaya çıktığı saptanmıştır. Bunun yanında matris sıkıştıkça stres ve deformasyon enerjisi ortaya çıktığı bunda içsel enerjiye dönüşerek mikroyapıda iyileşmelere olanak sağladığı belirlenmiştir [47]. SEM görüntüleri üzerinden “NIS-Elements” programı yardımı ile renklendirilerek hesaplanan çökelti fazlarının dağılım oranı Şekil 4.2’de verilmiştir. Faz dağılım oranları incelendiğinde İşlemsiz AZ63’te çökelti fazlarının oranı %1,04 iken AZ63 (24)’te %2,12, AZ63 (48)’de %5,02 olarak hesaplanmıştır. Bu da kriyojenik işlem süresi arttıkça çökelti fazlarının oranının kayda değer şekilde arttığını göstermektedir. Bunun yanında tane boyutunda incelmede Şekil 4.1’de verilen mikroyapılarda görülmektedir. T.J. Chen ve Ark. AZ63 magnezyum alaşımları üzerinde yaptığı çalışmalarda tane boyutundaki incelmenin sonucunda malzemenin çekme dayanımında 5 kata varan artış gözlemlenmiştir [61].



Şekil 4.1. Farklı kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin SEM görüntüleri karşılaştırmaları ve genel faz tanımları; (a) İşlemsiz AZ63 mikro yapı (b) İşlemsiz AZ63 mikroyapı detay (c) AZ63 (24h) mikroyapı, (d) AZ63 (24h) mikroyapı detay, (e) AZ63 (48h) mikroyapı, (f) AZ63 (48h) mikroyapı detay.



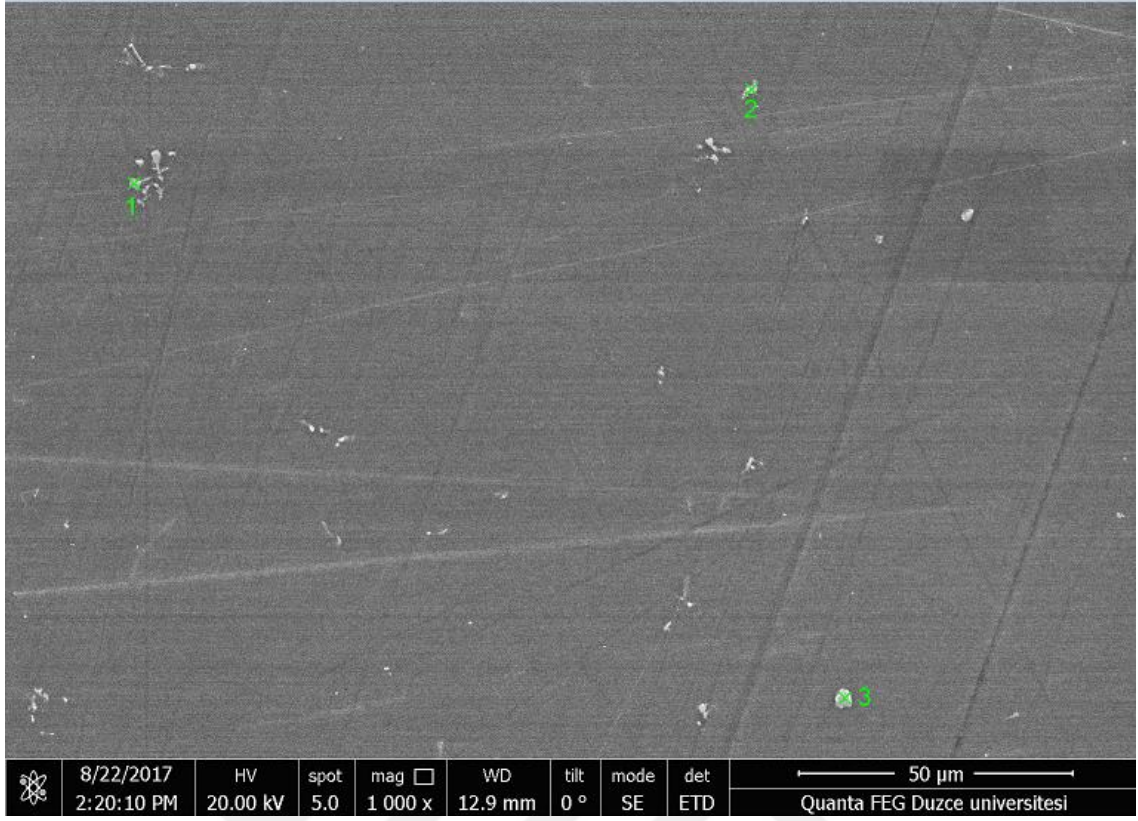
Şekil 4.2. Çökelti fazlarının renklendirilmiş dağılım oranları A) işlemsiz AZ63 B) AZ63 (24) C) AZ63 (48).

Şekil 4.1’de verilen işlemsiz AZ63, AZ63 (24h) ve AZ63 (48h) numunelerinin genel yüzey taraması sonucunda elde edilen genel faz dağılım değerleri Çizelge 4.1’de verilmiştir.

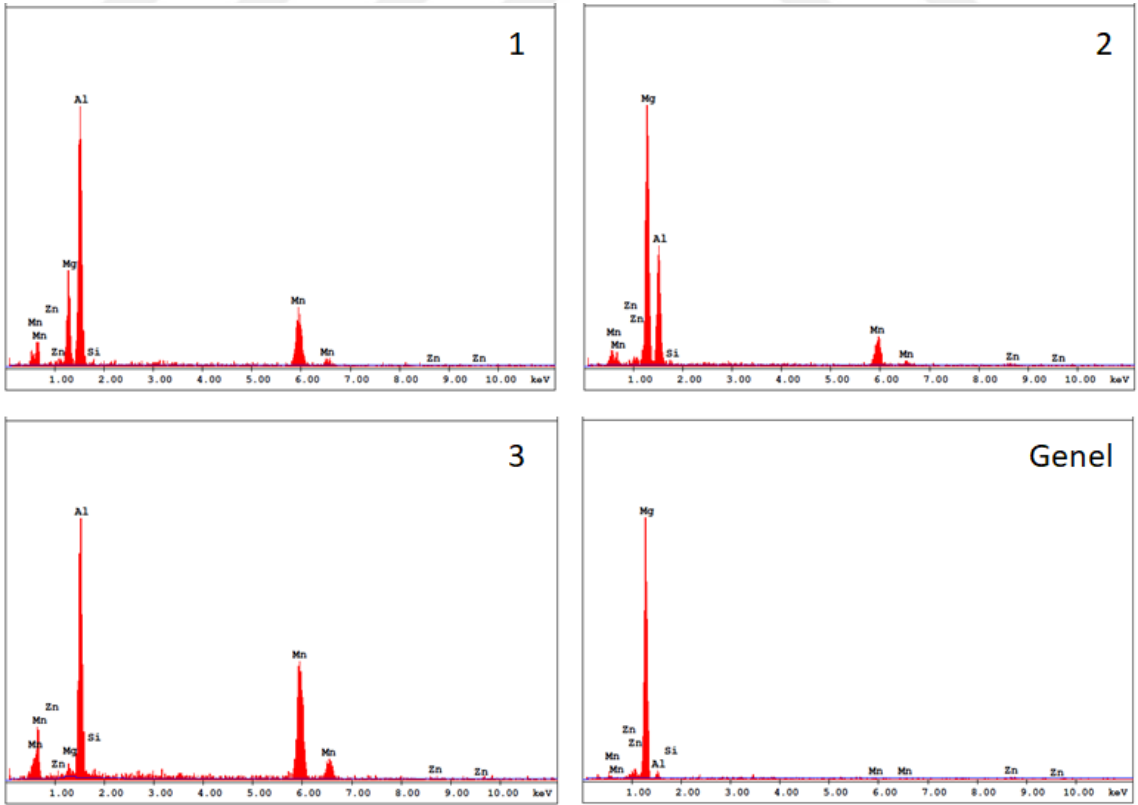
Çizelge 4.1. Çökelmiş fazların genel karşılaştırmalı EDS sonuçları (ağırlıkça %).

Numune	Mg	Al
İşlemsiz AZ63	93,78	6,22
AZ63 (24h)	92,03	7,97
AZ63 (48h)	90,88	9,12

SEM ve EDS analizleri daha detaylı olarak incelendiğinde işlemsiz numuneden dökümden kaynaklı olarak Al-Mn intermetaliklerinin oluştuğu görülmektedir. Döküm sırasındaki segregasyon, nihai malzemede intermetalik fazların çökmesine neden olmaktadır, daha önce yapılmış çalışmalarda kriyojenik işlemler sonucunda Mg alaşımlarında Al-Mn intermetaliklerinin çökmesi gözlemlenmiştir. Bu intermetalikler, alaşımda kirletici etkisi olan Fe’yi uzaklaştırmak için Mn ilave edilmesinin bir sonucu olarak oluşmaktadır. Döküm ergiğinde, Al-Mn-Fe, erimiş Mg’de çökebilir ve bu çökelti, katılaşma sırasında döküm içerisinde kalırlar [51]. Şekil 4.3’te ve Çizelge 4.2’de EDS analizi sonucunda elde edilen bulgularda yapıya dağılan Al-Mn intermetalik fazlarının varlığı açıkça görülmektedir.



Şekil 4.3. İşlemsiz numunenin SEM görüntüsü.



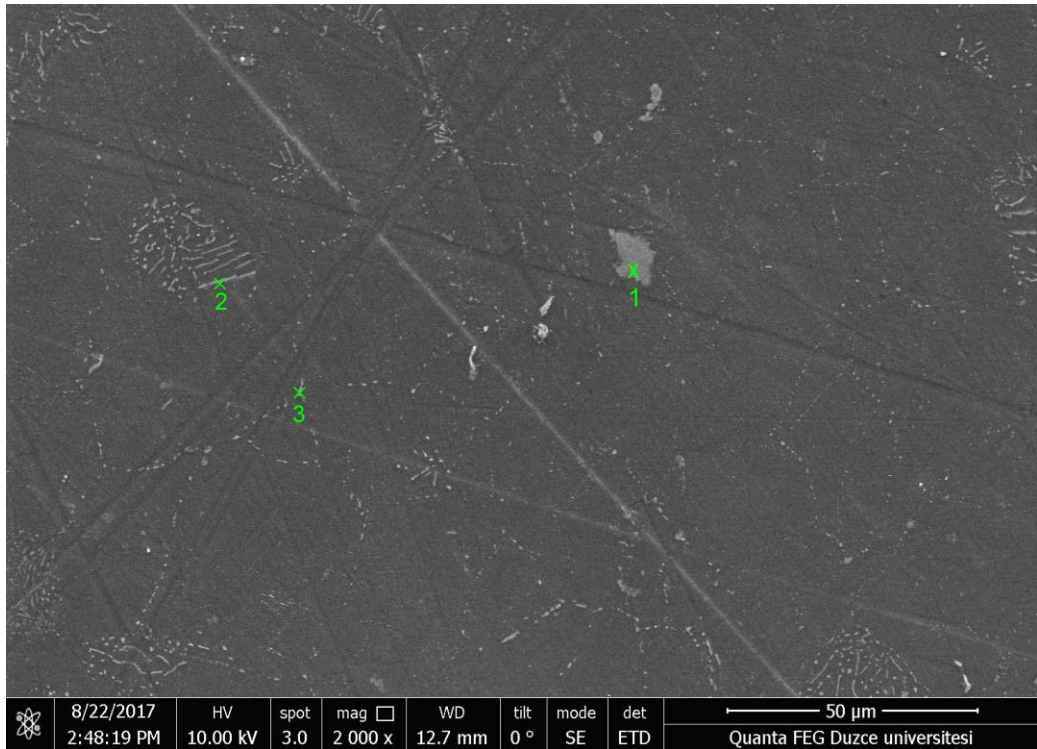
Şekil 4.4. İşlemsiz numune EDS analiz sonuçları.

Çizelge 4.2. İşlemsiz numune EDS analiz değerleri.

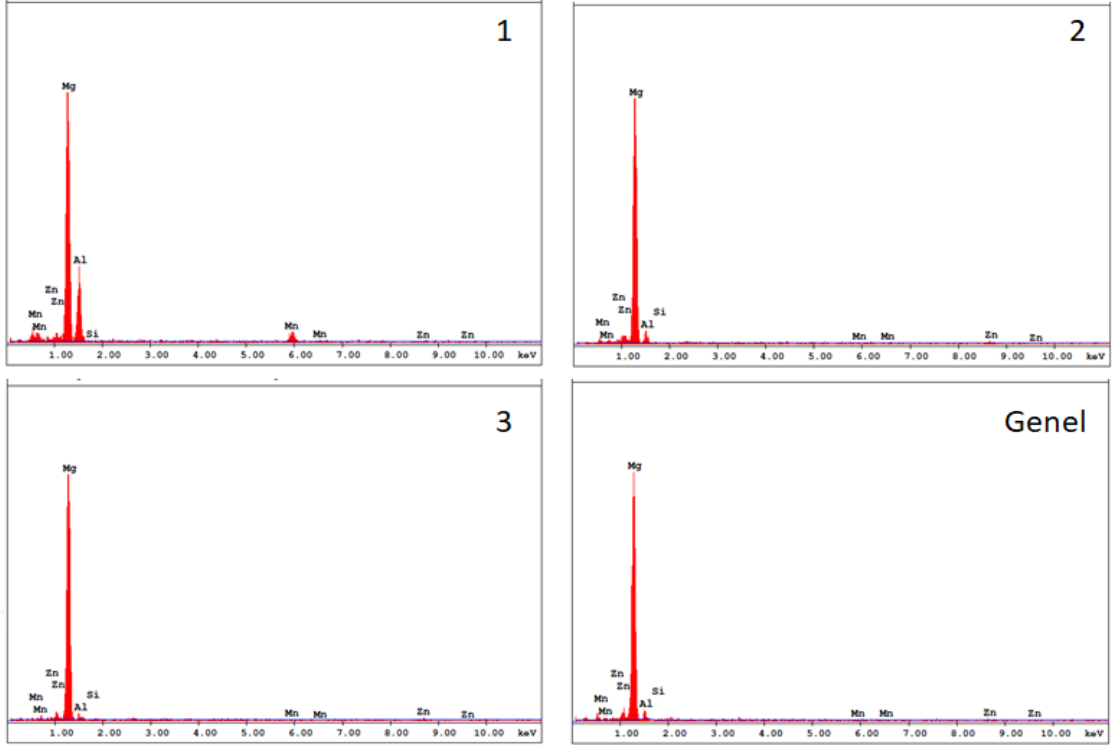
Ölçüm Noktası	Mg	Al	Si	Mn
1	15,37	53,76	1,15	29,72
2	43,77	37,33	1,00	17,91
3	1,54	44,47	0,95	53,04
Genel	93,78	6,22	-	-

Çizelge 4.2’de görüldüğü üzere 1 numaralı parçacık Al-Mn-Mg-Si bileşenli intermetalik, 2 nolu parçacık ise Mg-Al-Mn-Si esalı intermetalik ve 3 nolu parçacık ise Mn-Al yoğunluklu intermetalik parçacıktır.

Numunelere kriyojenik işlem uygulandığında Al-Mn intermetaliklerinin yerini β fazlarının (Al-Mg yoğunluklu) aldığı görülmektedir. Çizelge 4.3’te verilen EDS sonuçları da bunu göstermektedir. Faz değişiminin yanında Şekil 4.5’te görüldüğü üzere tane incilmesi de gözlemlenmekte ve bu ince taneli β fazlarının yapıya daha homojen olarak dağıldığı gözlemlenmektedir.



Şekil 4.5. AZ63 (24h) Numaralı numunenin SEM görüntüsü.

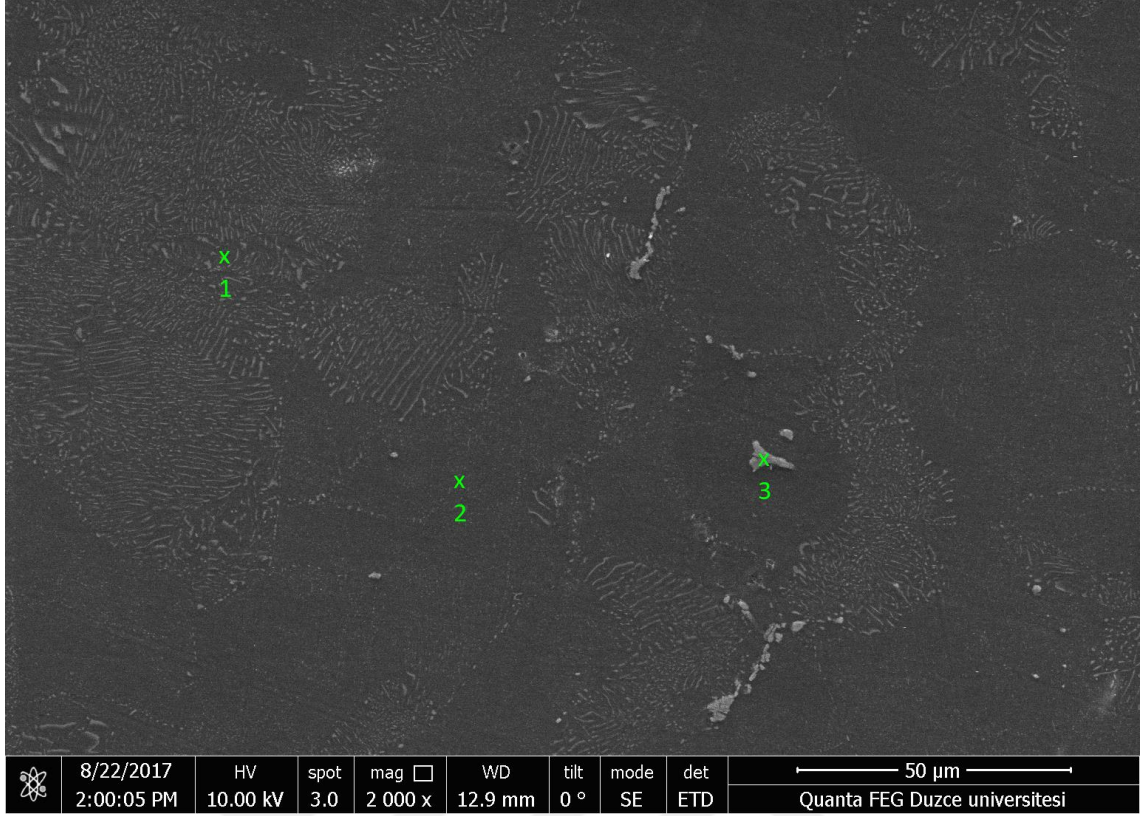


Şekil 4.6. AZ63 (24h) numaralı numune EDS analiz sonuçları.

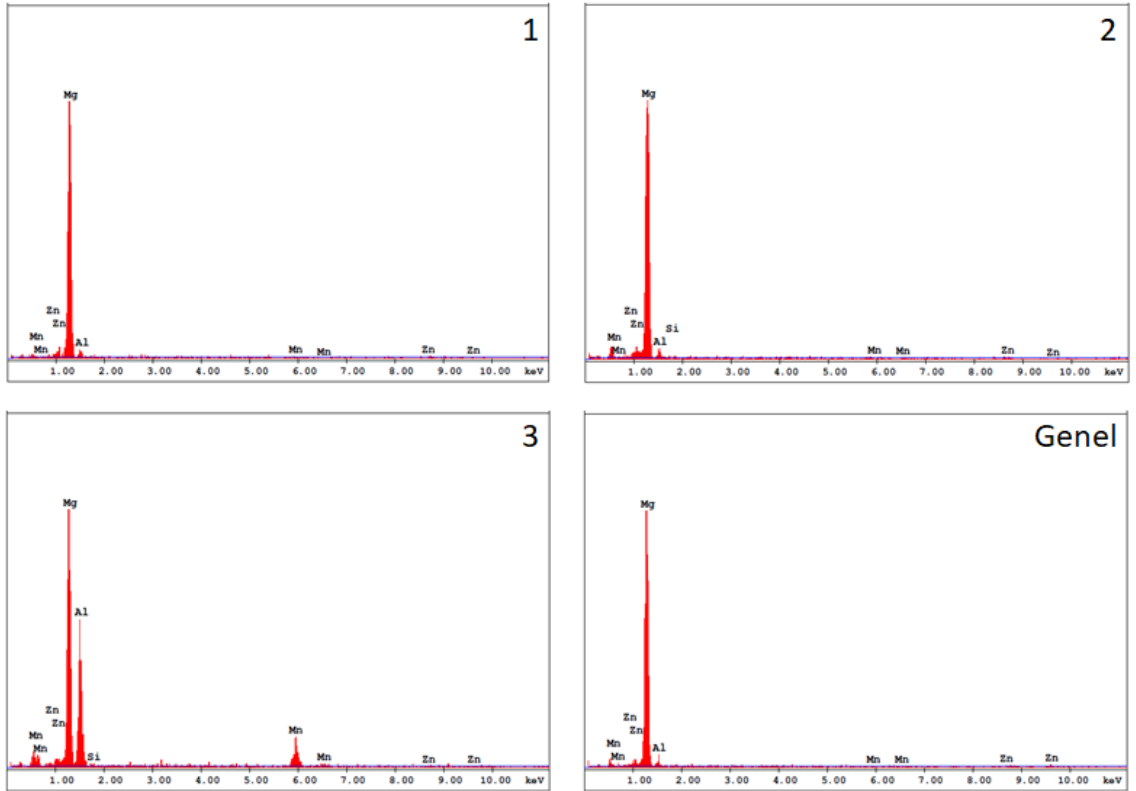
Çizelge 4.3. AZ63 (24h) numaralı numune EDS analiz değerleri.

Ölçüm Noktası	Mg	Al	Mn
1	57,22	35,33	7,45
2	88,59	10,41	-
3	94,69	5,31	-
Genel	92,03	7,97	-

AZ63 (48h) Numaralı numunenin SEM görüntüleri ve EDS analizlerine bakıldığında ise (Şekil 4.7) tanelerin tamamen ince yapıya hale geldiği ve β fazlarının (Al-Mg) yapıya tamamen dağıldığı görülmektedir. Genel olarak EDS değerleri incelendiğinde (Çizelge 4.4) Al faz çökeltilerinin arttığı görülmektedir. Yapılan çalışmalar sonucunda ani soğumaların kafes yapısını daralmaya zorlaması ve mikroyapıda faz değişimlerinin oluşmasına ve çökeltme fazlarında artışa sebep olmaktadır [47]. Elde edilen SEM görüntüleri ve EDS analizleri sonucunda da çökeltme fazlar gözle görülür şekilde arttığı ve yapıya dağılarak tanelerin incelendiği görülmektedir.



Şekil 4.7. AZ63 (48h) Numaralı numunenin SEM görüntüsü.

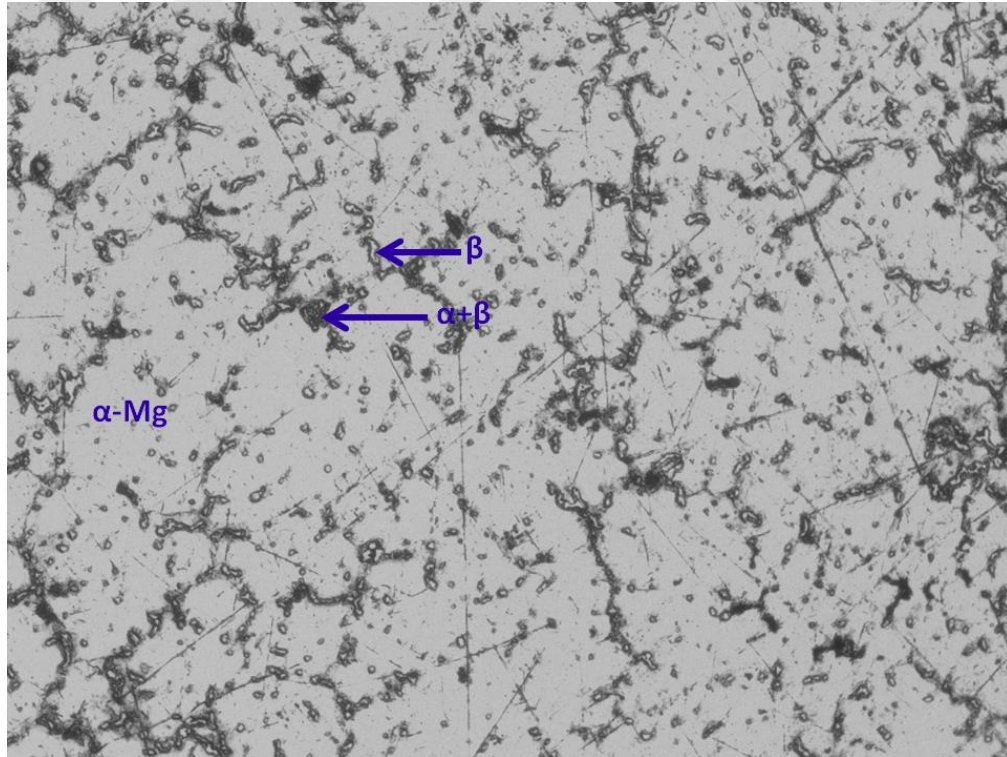


Şekil 4.8. AZ63 (48h) numaralı numune EDS analiz sonuçları.

Çizelge 4.4. AZ63 (48h) numaralı numune EDS analiz değerleri.

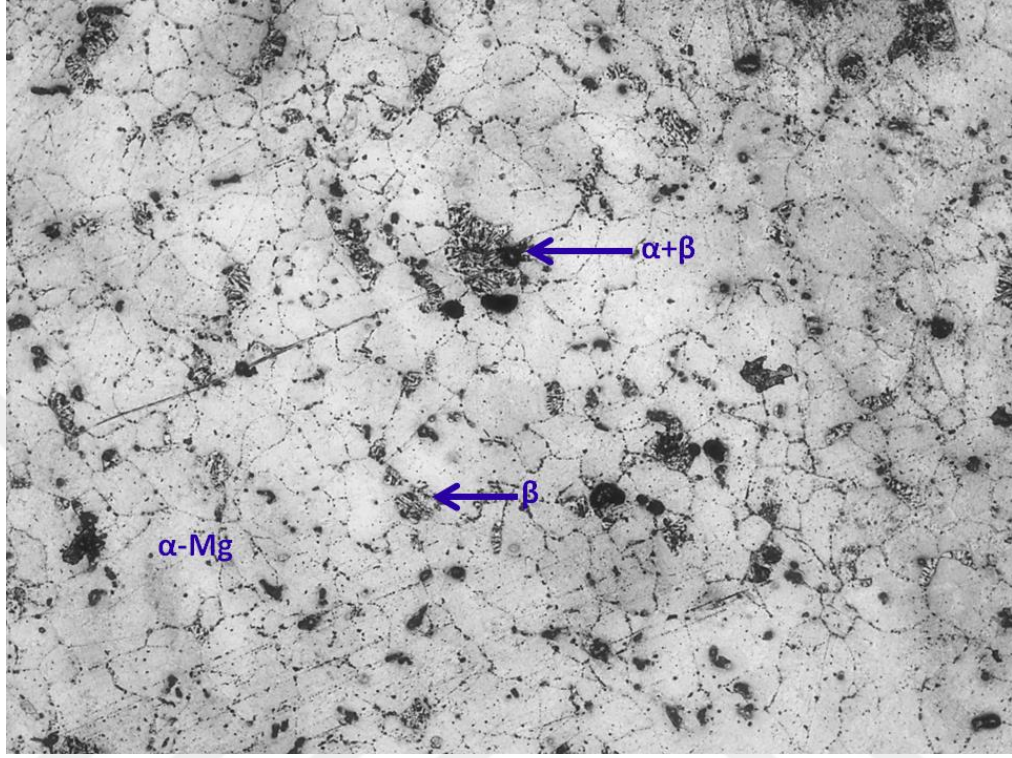
Ölçüm Noktası	Mg	Al	Mn
1	93,00	7,00	-
2	91,28	8,72	-
3	43,22	41,71	14,64
Genel	90,88	9,12	-

İşlemsiz numunenin ve kriyojenik işlemlenmiş numunelerin mikroyapıları incelendiğinde, Şekil 4.9’da verilen işlemsiz numunenin mikroyapısında ötektik α -fazlar ve β -fazların geniş bir alanda yapıya dağıldığı α -Mg yapılarının içinde de β -fazların yer aldığı görülmektedir. Benzer çalışmalara bakıldığında da Mg-Al ikili faz diyagramında görülen β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazı α -Mg tanelerinin sınırlarında bulunmaktadır. Tane sınırlarında bulunan intermetalik yapıların içinde farklı fazlar olan Mg₁₇Al₁₂, Al₃Mg₂ ve Mg₂₄Al₁₇ fazları aynı tane sınırı içerisinde oluşabilmektedir [62].



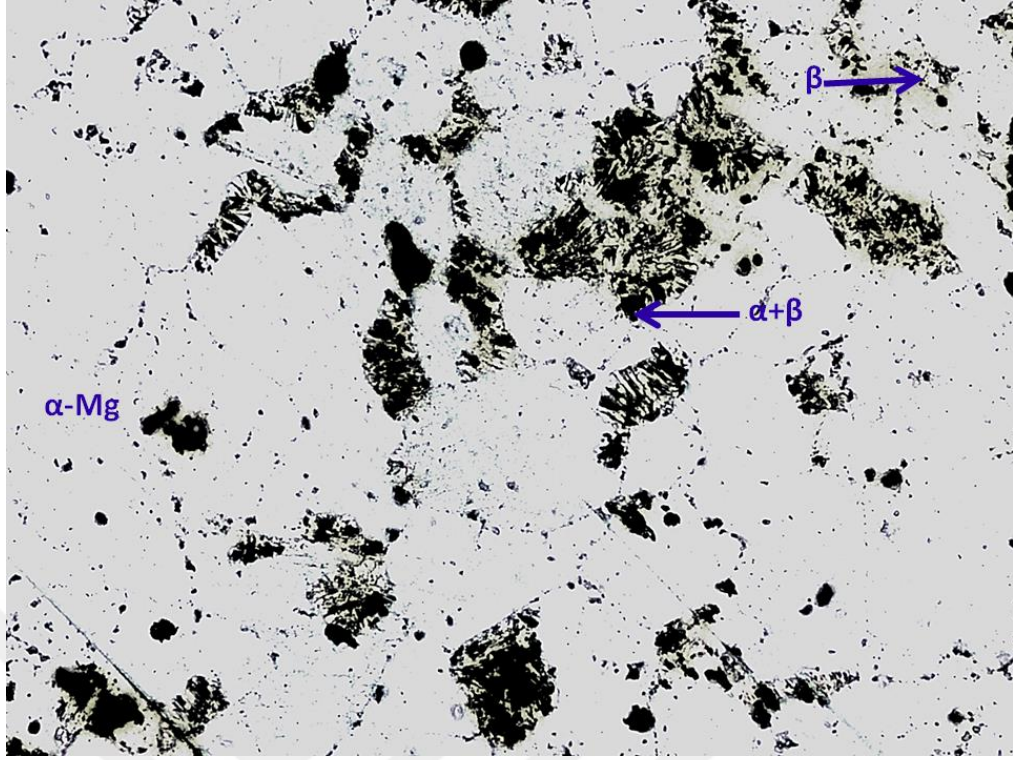
Şekil 4.9. İşlemsiz AZ63 Mikroyapı (100x Büyütme).

24 saat kriyojenik işleme tabi tutulmuş numunenin Şekil 4.10'da verilen mikroyapısı incelendiğinde $\alpha+\beta$ fazlar'nın miktarının arttığı görülmektedir. Tane sınırlarının içinde bulunan intermetalik fazların daha fazla çökeldiği görülmektedir.



Şekil 4.10. AZ63 (24h) mikroyapı (100x Büyütme).

48 saat kriyojenik işleme tabi tutulmuş numunenin Şekil 4.11'de verilen mikroyapısı incelendiğinde, $\alpha+\beta$ fazlarının tane sınırlarında daha belirgin hale geldiği görülmektedir. Tane sınırları içerisinde bulunan intermetalik fazların daha yoğun bir şekilde çökerek mikroyapıya dağıldığı gözlemlenmektedir. Daha önce yapılan benzer çalışmalarda da Mg-Al fazlarının arasına Al metalinin çökerek tane sınırlarında farklı intermetalik fazların oluşabileceği görülmektedir [63].



Şekil 4.11. AZ63 (48h) Mikroyapı (100x Büyütme).

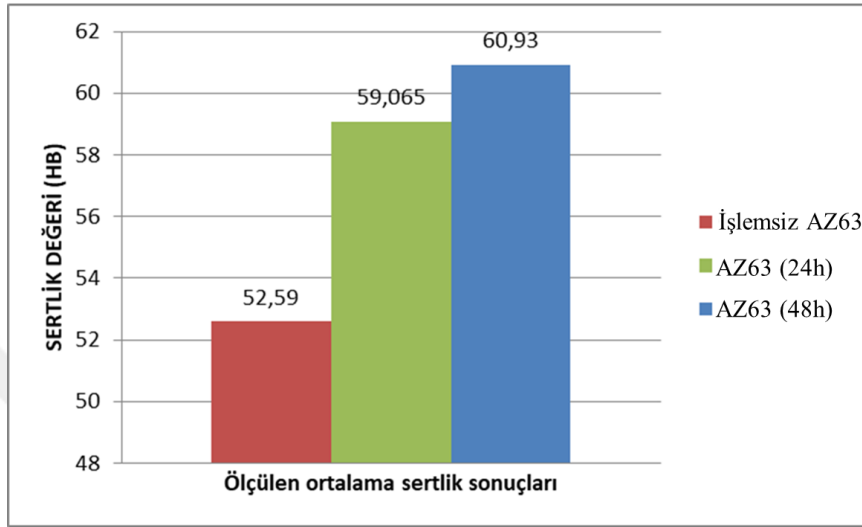
Mikroyapılardaki intermetalik fazların artması kriyojenik işlemle birlikte kafes yapısının daralarak mikroyapısal morfolojiyi değiştirmeye zorlayarak fazların çökmesini sağladığı şeklinde yorumlanmaktadır [47]. Elde edilen mikroyapılarda da artan kriyojenik işlem süresi ile ortaya çıkan intermetalik fazların arttığı görülmektedir.

4.2. SERTLİK DENEYİ SONUÇLARI

Sertlik değeri birçok endüstriyel uygulamalarda çok önemli bir yer almaktadır. Genellikle mühendislik malzemeleri kullanılmadan önce sertlik değerlerine bakılır ve kullanım yerine göre bir seçim kriteri oluşturularak malzeme seçimi yapılır. Sistemlerin darbe direnci göz önüne alınarak, bir arada çalışacak parçaların özellikleri göz önüne bulundurularak parçaların sertlik değeri ile birlikte bir seçim kriteri oluşturulur. Alüminyum, magnezyum gibi alaşımların sertlikleri ölçülürken genellikle Brinell sertlik değeri, çelik alaşımlarında çoğunlukla Rockwell sertlik değeri, plastik parçalarda da Shore D sertlik değerleri tercih edilir.

Yapılan kriyojenik işlemler sonucunda sertliklere bakıldığında sertliğin arttığı Şekil 4.12'deki sertlik ölçüm değerleri grafiğinde görülmektedir. Yapılan kriyojenik işlemler

sonucunda sertlik değerinde %15'lik bir artış elde edilmiştir. Sertlik değerlerinin artması kriyojenik işlem sonucunda kafes yapısının soğuma ile birlikte daralmaya zorlanması ve bunun neticesinde morfolojik yapıdaki enerjinin yapıda faz değişimlerine yol açması sonucunda çökelen fazların artması ile birlikte sertliğin arttığı söylenebilir. Sertlik değerlerindeki artış ile aşınma dirençlerinin de arttığı tespit edilmiştir [51].

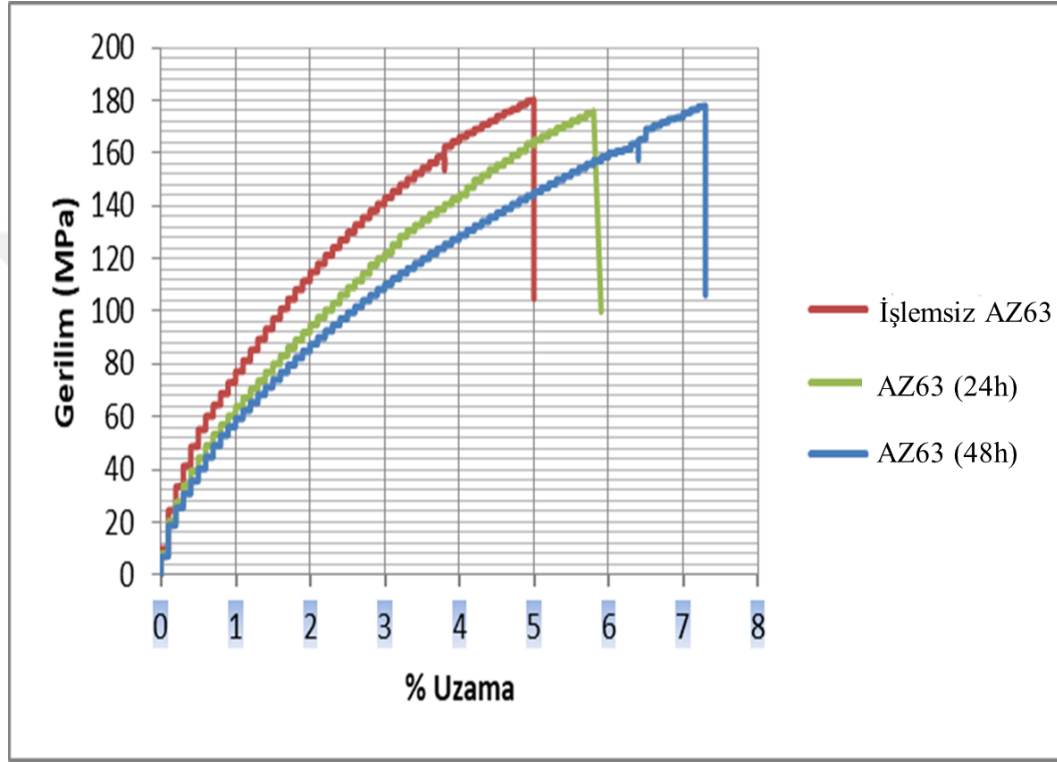


Şekil 4.12. Kriyojenik işlem sonrası sertlik değişimleri.

4.3. ÇEKME DENEYİ SONUÇLARI

Kriyojenik işlemin gerilim-uzama grafiğine olan etkisi Şekil 4.13 ve Çizelge 4.5'de açıkça görölmektedir. Yapılan kriyojenik işlemlerden sonra numunelerin çekme dayanımları arasında bir fark gözlemlenmezken uzama dayanımlarında önemli değişimler görölmüştür. Artan Kriyojenik işlem süresi alaşımanın deformasyon oranını yükseltmiştir. Bu olumlu değişimden malzeme mikroyapısındaki çökelen α ve β ($Mg_{17}Al_{12}$) fazlarının sorumlu olduğu söylenebilir. Yapılan çalışmalarda da β -fazındaki artışın magnezyum alaşımlarındaki dayanımı arttırdığına dair çalışmalar mevcuttur. Huang Zhiquan ve ark. yaptığı çalışmalarda da AZ31 magnezyum alaşımına değişik sıcaklıklarda uygulanan kriyojenik işlemler sonucunda uzama değerlerinde artış elde etmişlerdir. Ayrıca düşük kriyojenik sıcaklıklarda daha iyi mekanik dayanım değerlerini elde edilmiştir [47]. Huang Zhiquan ve ark. yapmış oldukları çalışmaya ait değişkenler Çizelge 4.6'da çekme deney sonuçları Şekil 4.14'te görölmektedir. Şekil 4.14 incelendiğinde her ne tür kriyojenik işlem uygulanırsa uygulansın hem çekme hem de % uzama değeri önemli ölçüde artmaktadır. Çekme test değerleri ve uzama değerleri

azalan kriyojenik işlem sıcaklığıyla düşmektedir. Oda sıcaklığında şekillendirilme kabiliyeti çok kısıtlı olan magnezyum alaşımlarının kriyojenik işlemle birlikte uzama değerlerinin artması, bu tür alaşımların oda sıcaklığında şekillendirilme kabiliyetine önemli derecede katkı sağlamaktadır. Huang Zhiquan ve ark. çekme ve uzama dayanımındaki bu değişimin yapıda çökelen ikincil fazların varlığına (α ve β) ve tane incelmesine bağlı olduğunu açıklamaktadır.



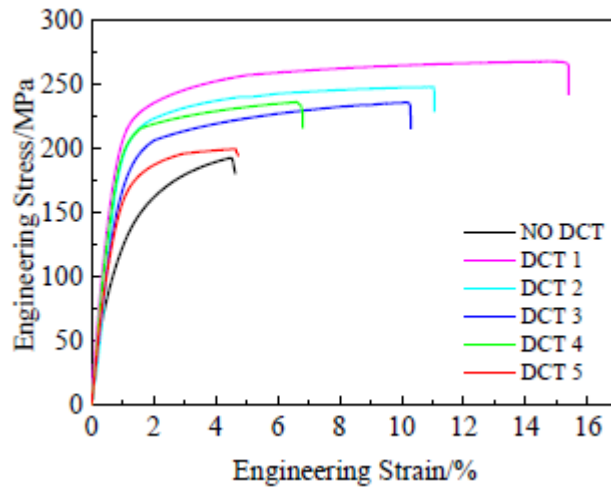
Şekil 4.13. Farklı kriyojenik işlemler sonucunda elde edilen Gerilim-%Uzama eğrileri.

Çizelge 4.5. Farklı kriyojenik işlemler sonucunda elde edilen mekanik özellikler.

	İşlemsiz AZ63	AZ63 (24h)	AZ63 (48h)
Çekme Dayanımı	177,6	176,4	177,1
%Uzama	5	5,9	7,3
Akma Dayanımı	79,5	85	89

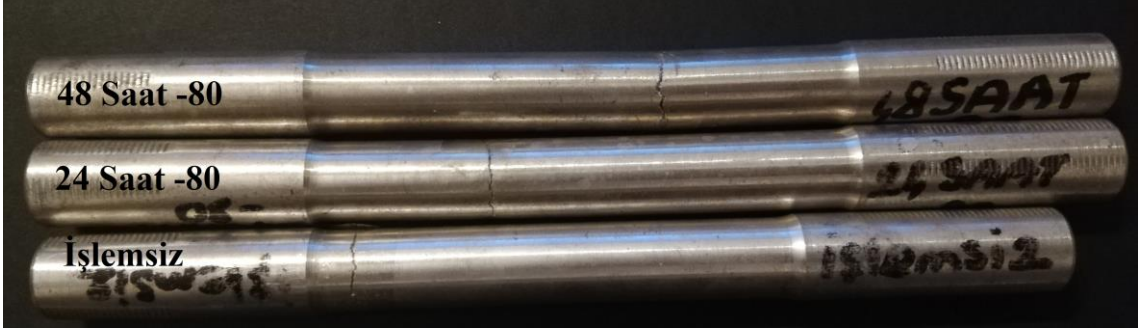
Çizelge 4.6. AZ31 alaşımına uygulanan kriyojenik işlem parametreleri [46].

Sample	Cryogenic temperature/°C	Cryogenic time/h	Cooling rate/°C·min ⁻¹
DCT1	-60	12	1
DCT2	-120	12	1
DCT3	-180	12	1
DCT4	-60	2	2
DCT5	-120	2	2



Şekil 4.14. Kriyojenik işlemin çekme değerlerine etkisi [47].

Yapılan çekme sonuçları sonucunda AZ63 magnezyum alaşımında kırılma gerçekleşirken boyun verme bölgesi oluşmamaktadır. Boyun verme bölgesi oluşmasa bile magnezyum alaşımlarının çekme testinde Şekil 4.15'te görüldüğü gibi homojen bir uzama gözlemlenerek anlık bir kırılma olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 4.16'daki kırılma yüzeyleri incelendiğinde işlemsiz numune kırık yüzeyinin çok düzlemsel kırıldığı AZ63 (48h) numaralı numunede bu kırılmanın daha kaba ve deforme olarak daha sünek kırıldığı açıkça görülmektedir. Bu kırılma yüzeyi değişimi de uzamada elde edilen değişimle açıklanabilir. Bu çalışmada çekme dayanımı değişmezken malzemenin uzama oranında yaklaşık 1,5 kat artış olduğu gözlemlenmiştir. Bu artışında sebebin mikroyapıda çökelen ikincil fazların artışı ve tane incelmesinin bir sonucu olarak ortaya çıktığı düşünülmektedir.



Şekil 4.15. Çekme numuneleri genel görünümü.



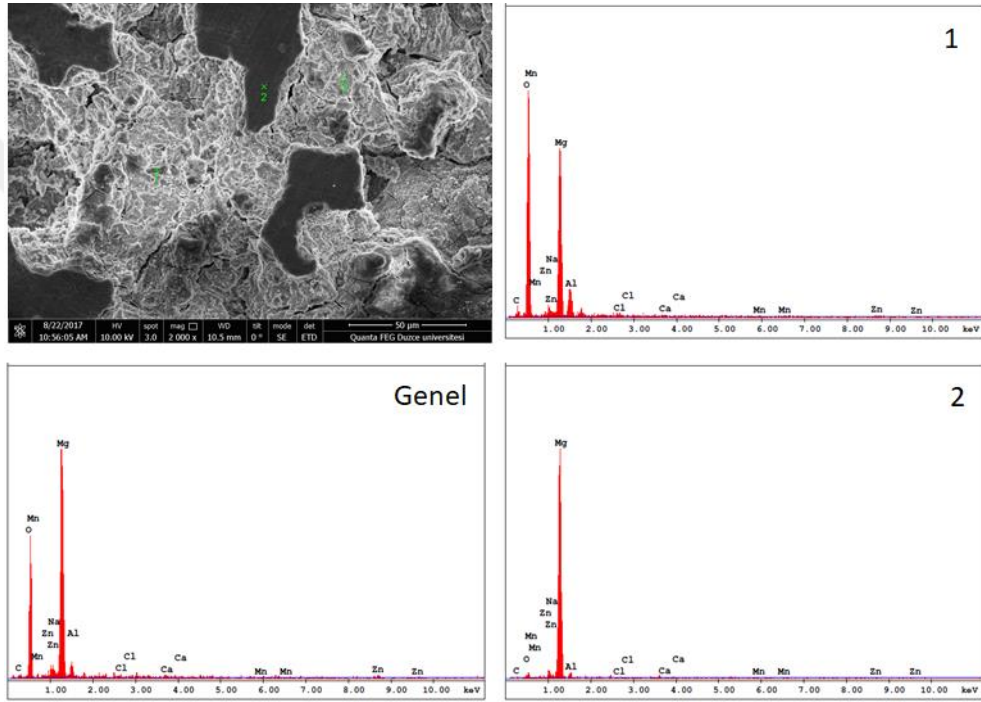
Şekil 4.16. Çekme testi sonrası kırık yüzeyleri genel görünümü.

4.4. KOROZYON DENEYİ SONUÇLARI

Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi (EIS) testleri sonucunda numunelerin SEM görüntüleri incelenmiştir ve EDS analizleri yapılmıştır. Elde edilen SEM görüntüleri ve EDS analizleri sonuçları Şekil 4.17, Şekil 4.18, Şekil 4.19 ve Çizelge 4.7, 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Görüldüğü gibi işlemsiz numune yüzeyinde çok kaba korozyon ürünleri net bir şekilde gözlenebilirken, AZ63(24h) ve AZ63(48h) numaralı numune yüzeylerinin tuz çözeltisi ile kaplanarak çok daha düzgün (pürüzsüz) olduğu ve sınırlı korozyon ürünlerinin olduğu gözlemlenmiştir. Magnezyum alaşımlarının en büyük sorunu çukurcuk korozyonuna karşı dayanımının düşük olmasıdır. İşlemsiz numunede çukurcuklar yoğun olarak gözlemlenirken, kriyojenik işlemlenmiş numunelerde daha pürüzsüz yüzeyler gözlemlenmiştir.

Literatürde yapılan çalışmalarda Mg-Al alaşımlarının mikrogalvanik korozyonu uzun zamandır matrisin Mg-Al β -fazına bağlanması ile ilişkilendirilmekte olsada, intermetallikler genellikle göz ardı edilmiştir. Bilhassa Al-Mn intermetalliklerinin akım

potansiyeli, Mg matrisinininkine kıyasla β -fazından daha pozitif olup, bu tür intermetalikler potansiyel olarak daha katodik davranış göstermektedir [64]. Al-Mn intermetaliklerinin, Mg alaşımlarının korozyonunda aktif katot olarak rol aldığını tespit edilmiştir [51]. Yapılan korozyon testlerinde Çizelge 4.7’de görüldüğü gibi işlemsiz numune yüzeyinde çok fazla oksit tabakası oluştuğu görülmüştür. Şekil 4.17’de verilen SEM görüntüsünde de numune yoğun korozyon ve yüzeyindeki kaba çukurlar net şekilde görülmektedir. Ayrıca oldukça az miktarda korozyon ürünleri (Na-Cl) yapıda tespit edilmiştir.



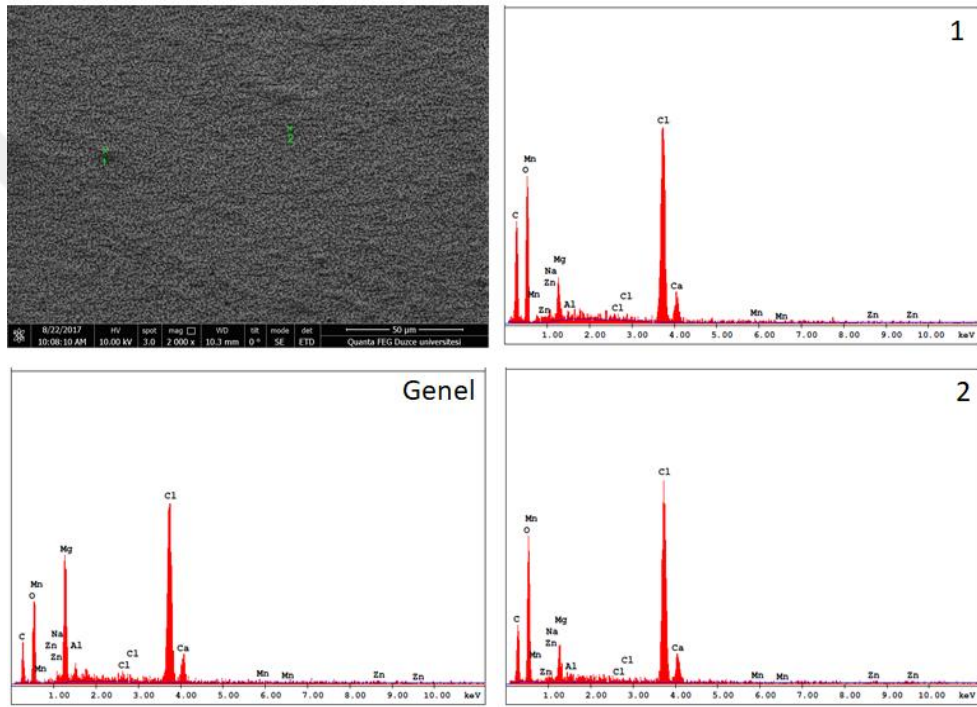
Şekil 4.17. İşlemsiz numune korozyon deneyi sonrası sem görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 4.7. İşlemsiz numune korozyon deneyi sonucu elde edilen EDS değerleri.

Ölçüm Noktası	Mg	O	Al	C	Na	Cl
1	30,45	55,37	7,63	4,90	0,37	0,64
2	91,49	3,95	3,88	-	-	-
Genel	48,44	41,33	4,93	2,47	2,36	-

Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde ise işlemsiz numunede elde edilen sonuçların aksine AZ63 (24h) numaralı numunede Çizelge 4.8’de görüldüğü gibi elde

edilen EDS analizlerinde numune yüzeyinde klor iyonlarının biriktiği ve yüzeyi tamamen kapladığı görülmektedir. Yapılan kütle kaybı testi sonuçlarında da ağırlık artışı gözlemlenmiş olup tuz çözeltilerinin numune yüzeyinde birikerek ağırlığı arttırdığı düşünülmektedir. Yüzeyde biriken ve bir nevi yüzey kaplaması işlemi gören bu korozyon ürünleri, malzemenin korozyona uğramasını engellemiş ve daha düzgün yüzeyler meydana getirilmiştir. Bu da malzemenin korozyon direncini artırmıştır. Şekil 4.18’de elde edilen SEM görüntüsünde numune yüzeyinin tamamen tuz çözeltisi ile kaplandığı görülmektedir.

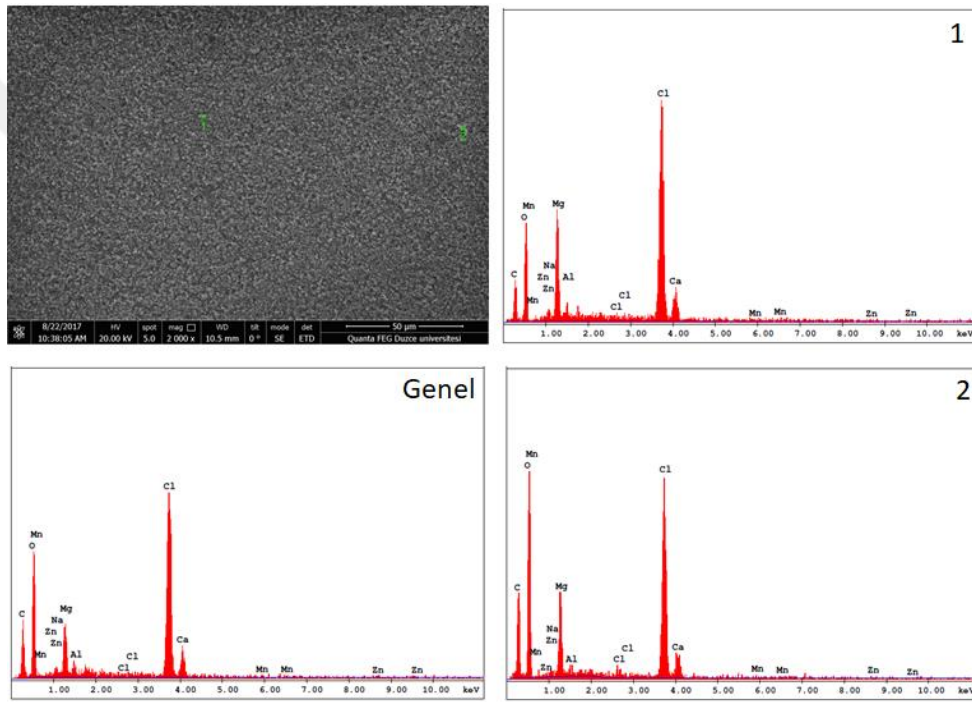


Şekil 4.18. AZ63 (24h) numaralı numune korozyon deneyi sonrası sem görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 4.8. AZ63 (24h) numaralı numune korozyon deneyi sonucu elde edilen EDS değerleri.

Ölçüm Noktası	Mg	O	Al	C	Na	Cl
1	4,29	46,05	0,65	20,65	1,74	26,28
2	4,78	50,24	0,90	13,42	4,43	28,22
Genel	16,45	36,56	1,83	12,99	0,82	30,44

AZ63 (48h) numaralı numunede AZ63 (24h) numaralı numuneye göre yüzeyde daha düşük Mg piki gözlemlenmiştir. AZ63 (24h) numaralı numunedekine benzer olarak AZ63 (48h) numunede yüzeyde biriken klor elementlerinin artışı daha da fazla ağırlık artışına sebep olmuştur. Şekil 4.19’da verilen SEM görüntüsünde de numune yüzeyinin tamamen kaplandığı görülmekte ve Çizelge 4.9’da görüldüğü gibi elde edilen EDS analizlerinde numune yüzeyinde klor iyonlarının biriktiği ve yüzeyi tamamen kapladığı görülmektedir. Western Üniversitesinde AM50 magnezyum alaşımları üzerinde yapılan çalışmada da düşük yoğunluklu tuz çözeltilerindeki korozyon testlerinde de benzer sonuçlar elde edilmiştir [51].



Şekil 4.19. AZ63 (48h) numaralı numune korozyon deneyi sonrası sem görüntüsü ve EDS analizleri.

Çizelge 4.9. AZ63 (48h) numaralı numune korozyon deneyi sonucu elde edilen EDS değerleri.

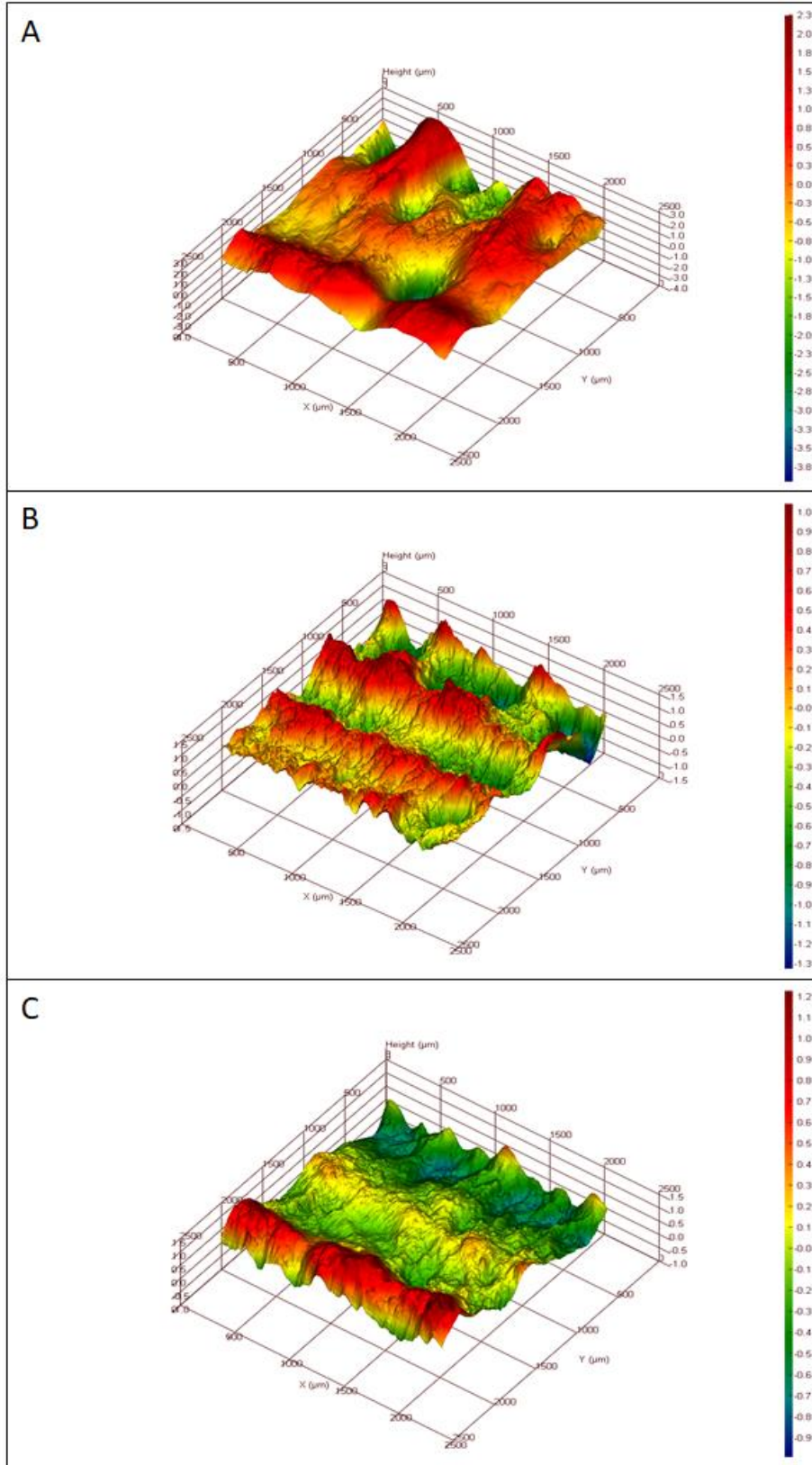
Ölçüm Noktası	Mg	O	Al	C	Na	Cl
1	13,18	38,18	1,86	11,10	1,68	32,70
2	7,91	51,34	0,60	16,96	0,86	21,58
Genel	6,77	46,89	1,85	13,90	1,75	28,44

Yapılan yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçları Çizelge 4.10'da verilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarından da görüleceği üzere işlemsiz numune ile kriyojenik işlemler karşılaştırıldığında yüzey pürüzlülüğünün AZ63(48h) numunede işlemsiz numuneye göre çok düşük olduğu görülmektedir. İşlemsiz numunede ortalama yüzey pürüzlülüğü 10,82 µm iken AZ63 (48h) numunede sadece 1,63 µm olarak ölçülmüştür. Ayrıca en yüksek yüzey pürüzlülük değeri işlemsiz numunede 56,21µm olarak ölçülürken AZ63 (48h) numunede 11,11 µm olarak ölçülmüştür. Atomik kuvvet mikroskobu ile çıkarılan yüzey topografik görüntüsünde Şekil 4.20'de verilmiştir. Elde edilen sonuçlardan da görüldüğü üzere kriyojenik işlem sonucunda yüzey pürüzlülük değerlerinin kayda değer şekilde azaldığı gözlemlenmektedir.

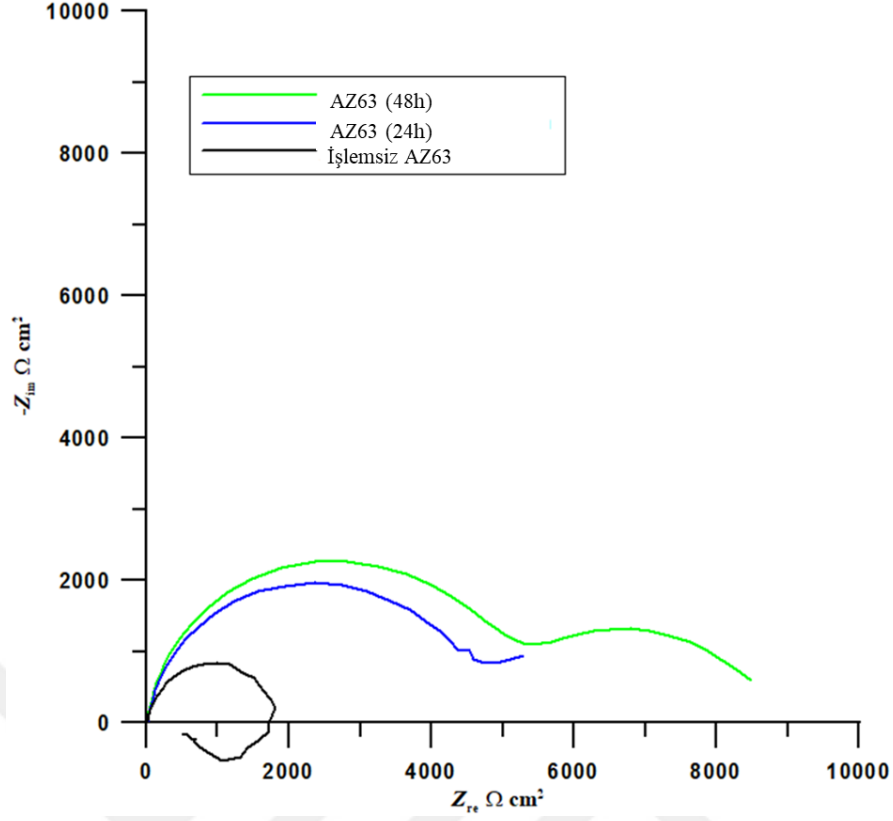
%3,5 Oranında NaCl içeren çözeltide EIS yöntemi elde edilen Nyquist diyagramları Şekil 4.21'de, bu eğrilerden elde edilen direnç değerleri Çizelge 4.11 ve 4.12'de verilmiştir. %3,5 NaCl çözeltisinde elde edilen empedans diyagramları işlemsiz numunede tam daire şeklinde oluşurken, 24 saatlik kriyojenik işlemler numunenin korozyon direnci işlemsiz numuneye göre artış gösterirken, 48 saatlik numune en iyi korozyon dayanımını göstermiştir.

Çizelge 4.10. Korozyon deneyi sonrası yüzey pürüzlülük değerleri.

Numune	Ra (µm)	Rz (µm)
İşlemsiz AZ63	10,82	56,21
AZ63 (24h)	6,77	37,89
AZ63 (48h)	1,63	11,11



Şekil 4.20. Farklı kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin korozyon deneyi sonrası elde edilen yüzey pürüzlülük grafiği A) İşlemsiz AZ63, B) AZ63 (24h), C) AZ63 (48h).



Şekil 4.21. %3,5 NaCl çözeltisinde elde edilen Nyquist eğrileri.

Korozyon dayanımındaki bu artış Al'ın döküm eriyiğindeki doygunluğuna bağlı olarak, Al-fazı ($Mg_{17}Al_{12}$), toplam Al içeriğinde ağırlıkça %> 3 olduğunda, β -fazının, Mg alaşımlarının mikro galvanik korozyonunu çalıştıran bir katod olduğuna dair değerlendirmeler yapılmıştır [65]-[67]. Bu çalışmalarda β -fazının alaşımın gelişmiş katodik kabiliyetine katkıda bulunduğu çeşitli faktörlerle tespit edilmiştir. Mg alaşımlarında büyük taneler, β -fazının Al-Mn ve intermetallikler üzerinde katodik etkisini arttırması, Mg-Al-Zn alaşımlarında Zn içeriğinin artmasıyla daha iyi katodik yetenek sergilemesi ve AZ91'e göre daha düşük β -fazına sahip olan AZ31'in korozyon direncini arttırmıştır [68];

Korozyon direncindeki bu gelişme birçok çalışmada gösterilmiş ve bir takım özellik ve işlemlere bağlanmıştır;

- (i) β - fazı, Mg matrisi ile katodik olarak birleşmez [69],
- (ii) β -fazının ısı ile ortadan kaldırılması, korozyon direncini azaltır [70];
- (iii) İnce β -faz parçacıklarının sayısındaki bir artış korozyon direncini artırır [70],

- (iv) Yüzeye mekanik yıpratma işleminin uygulanması, β -fazını kaldırır ve korozyon direncini azaltır [71],
- (v) Maruz kalma süresindeki artış, korozyon direncinin artmasına neden olan maruz kalan β -fazını artırır [67], ve
- (vi) Döküm Mg malzemede küçük β -fazlarının fazla olması korozyon direncini artırır [47].

Küçük tane boyutlarının, β -fazının bir korozyon bariyeri olmasına izin verirken; tane büyüklüğünün artmasının β -fazının katodik aktivitesini başlattığı öne sürülmektedir. [65]. β -fazının Mg alaşımlarının korozyonu üzerindeki etkisi en iyi β -fazının alaşım mikroyapısındaki dağılımı açısından değerlendirilir[65]-[67]. β -fazı, su stabilite bölgesinin altındaki sulu klorür ortamlarında bir korozyon potansiyeline sahiptir, bu da yapıyı korozyona duyarlı hale getirir. Bir Mg alaşımında β -fazı bulunduğunda α -Mg matrisinden çok daha düşük bir çözünme hızına sahiptir, bu da korozyon bariyeri olarak davranmasına neden olur [72]. Ayrıca Mg alaşımlarının ötektik fazından (α -Mg ve β -fazın karışımı olan aşırı doymuş bölge) daha düşük korozyon oranlarına sahiptir [73].

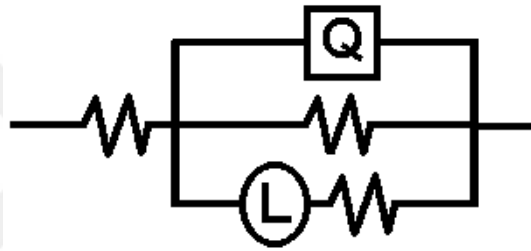
Fazların yanı sıra korozyon direncindeki artış tane büyüklükleri ile de açıklanabilir;

Mg alaşımlarındaki tane büyüklüğü, döküm prosedüründen büyük ölçüde etkilenir ve alaşımın sadece fiziksel özelliklerini değil aynı zamanda korozyon performansını da etkiler. Mg alaşımlarındaki taneciklerin büyüklüğünün korozyon davranışını etkilediği, tanecik boyutunda azalma ile korozyon oranında düşüş olduğu belirlenmiştir [74]. Fakat buna zıt olarak, tane boyutunun küçültülmesinin yararlı etkisinin; daha iyi pasif bir tabaka oluşumu, β -faz ağının koruma kapasitesinde gelişme ve korozyon ürün tabakasının çatlamasında azalma olduğu ortaya koyan çalışmalarda bulunmaktadır [75]. Tane boyutunun sonucu olarak faz dağılımı, korozyon davranışını da etkileyebilir. Mg-Al alaşımlarındaki Mg taneciklerinin ortasındaki yüksek Al içeriği, tanelerin korozyon direncini artırabilir [76].

Tipik korozyon direnç devreleri Şekil 4.22 ve 4.23'te gösterilmiş ve elde edilen LPR ölçümleri Çizelge 4.11 ve Çizelge 4.12'de verilmiştir. Görüldüğü üzere işlemsiz numunenin toplam korozyon direnci $2652 \Omega \cdot \text{cm}^2$ olarak ölçülürken, AZ63 (24) numaralı numunede bu değer, $5078 \Omega \cdot \text{cm}^2$, ve AZ63 (48) numaralı numunede $8638 \Omega \cdot \text{cm}^2$ olarak ölçülmüştür.

Çizelge 4.11. %3,5 NaCl ortamından EIS ve LPR ölçümlerinden belirlenen işlemsiz numunenin korozyon parametreleri.

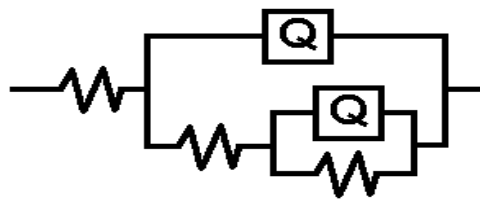
Numune	R_s	R_{po}	$\frac{Q}{(CPE_{layer})}$	n_{layer}	R_{ct}	L	$R=R_{po}+R_{ct}$
	Ω	$\Omega.cm^2$	P ($\mu F/cm^2$)	$0 \leq n \leq 1$	$\Omega.cm^2$	-	$\Omega.cm^2$
İşlemsiz AZ63	21	1812	117,7	0.8	840	470,8	2652



Şekil 4.22. İşlemsiz numune R(QR(LR)) devresi.

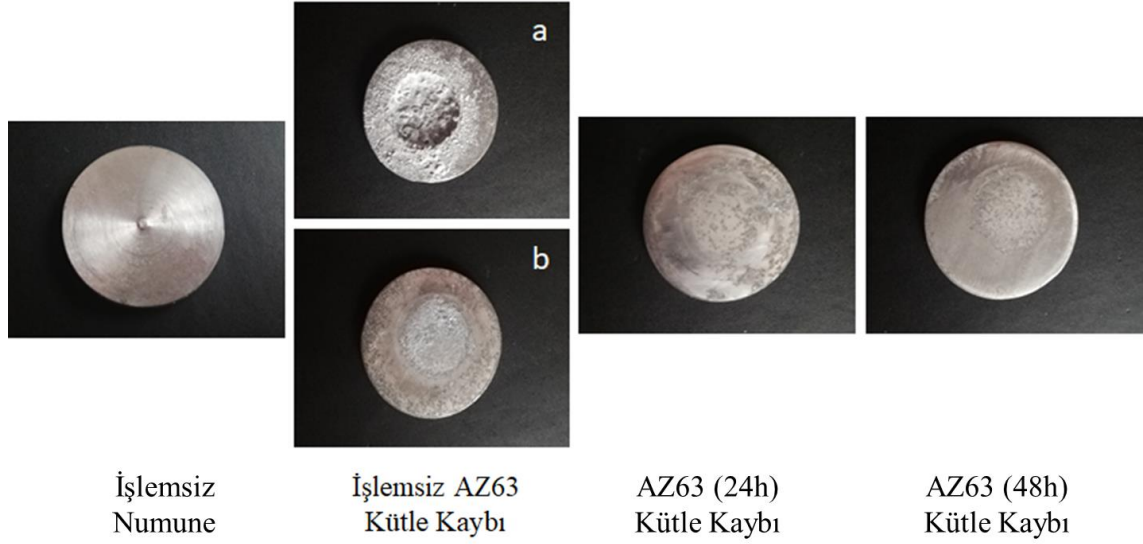
Çizelge 4.12. %3,5 NaCl ortamından EIS ve LPR ölçümlerinden belirlenen kriyojenik işlemli numunelerin korozyon parametreleri.

Numune	R_s	R_{po}	$\frac{Q}{(CPE_{layer})}$	n_{layer}	R_{ct}	$\frac{Q}{(CPE_{dl})}$	n_{dl}	$R=R_{po}+R_{ct}$
	Ω	$\Omega.cm^2$	P ($\mu F/cm^2$)	$0 \leq n \leq 1$	$\Omega.cm^2$	P ($\mu F/cm^2$)	$0 \leq n \leq 1$	$\Omega.cm^2$
AZ63 (24h)	23,6	4042	10,22	0,92	1036	836,6	0,8	5078
AZ63 (48h)	21	5076	10,47	0.8	3562	675,7	0,8	8638



Şekil 4.23. Kriyojenik işlemli numunelerin R(Q(R(QR))) devresi.

Ayrıca, EIS testi için kullanılan Şekil 4.24'teki numunelerde de görüldüğü üzere işlemsiz “a” ve “b” numuneleri aşırı korozyona maruz kalmış ve çok kaba yüzeyler ortaya çıkmıştır. Kriyojenik işleme tabi tutulan numunelerdeki elektrokimyasal korozyon direncindeki artış net bir şekilde makro düzeyde bile görülmektedir. Artan kriyojenik işlem süresi ile daha düzgün yüzeyler elde edilmiş ve korozyon direnci çok önemli miktarda artmıştır.



Şekil 4.24. EIS deneyinde kullanılan numunelerin genel görünümü.

Elde edilen korozyon dayanımındaki artışlar Jiarun Li ve ark. Mg-Al-Zn üzerinde yaptıkları korozyon çalışmasında korozyon dayanımındaki artışın sebebini çökelen β -Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazlarının katodik olarak davranarak bir korozyon bariyeri olarak davrandığına dayandırmaktadırlar [77]. Yapılan başka çalışmalarda da intermetalik fazların daha pozitif davranarak katodik davrandığı ortaya konulmuştur [64]. Elde edilen mikroyapı görüntüleride incelendiğinde kriyojenik işlem ile ve artan kriyojenik işlem süresi ile intermetalik fazların mikroyapıda yoğunlaştığı görülmektedir.

4.4.1. Kütle Kaybı Sonuçları

Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin %3,5 NaCl çözeltisinde 24 saat oda sıcaklığında bekletildikten sonra elde edilen Çizelge 4.13'te verilen ağırlık değişim sonuçlarında işlem görmeyen numunenin ağırlığının azaldığı kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde ağırlığın arttığı gözlemlenmiştir. Ağırlık artışı kriyojenik işlem süresi uzadıkça arttığı gözlemlenmiştir. Bu ağırlık artışı da yapılan kriyojenik

işlemler sonucunda elde edilen SEM görüntüleri ile karşılaştırıldığında sodyum ve klor elementlerinin yüzeye yapıştığı ve yüzeyi tamamen kapladığı görülmüştür. İşlemsiz numunede ağırlık azalması görülürken kriyojenik işlem uygulanmış numunede ağırlık artımı mikroyapıda bulunan α -Mg ve β -fazı bileşiklerinin sodyum ve klorla çok hızlı bağ yaparak yüzeyin sert bir tabaka ile kaplanmasını sağlamış ve ana metalin çözeltiyle tepkimeye girmesini engellediği şeklinde yorumlanmaktadır. Şekil 4.25'te kütle kaybı testinden sonra numunelerin genel görünüşleri verilmektedir. Görüldüğü üzere işlemsiz numunede gözle görülür biçimde çukurcuklar oluşurken kriyojenik işlem görmüş numunelerin şekli yapısal olarak korunmuştur.

Çizelge 4.13. Kriyojenik işlemler sonucunda elde edilen ağırlık değişim sonuçları.

Numune	İşlemsiz AZ63	AZ63 (24h)	AZ63 (48h)
5 Numune Toplam İlk Ağırlık (g)	6,0036	6,2749	5,6795
5 Numune Toplam Son Ağırlık	5,9816	6,2886	5,7033
% Ağırlık Değişimi	-0,27	0,22	0,42



Şekil 4.25. 24 Saat Kütle kaybı testi sonrası numunelerin genel görünümü.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında AZ63 magnezyum alaşımına -80°C 'de 24 saat ve 48 saat kriyojenik işlem uygulanmıştır ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- İşlemsiz numunede Al-Mn intermetalikleri yoğun olarak gözlemlenirken, kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde β -fazlarının daha yoğun olduğu gözlemlenmiştir. Bunun yanında işlemsiz numunede üniform olmayan bir yapı elde edilirken, kriyojenik numunelerde daha üniform bir yapı gözlemlenmiştir. Kriyojenik işlem süresi artığında çökelen fazların arttığı ve yapının daha üniform hale geldiği bunun yanında tane yapısının da incelendiği gözlemlenmiştir.
- Yapılan sertlik testleri sonucunda işlemsiz numuneye göre kriyojenik işlem uygulanmış numunelerde %15'e kadar sertlik artışının olduğu gözlemlenmiştir. Bu artışın da kafes yapısındaki daralmadan, çökelen fazların artışından ve tane yapısının incelenmesi sonucu olduğu düşünülmektedir.
- Kriyojenik işlem uygulanmış numunelerin çekme dayanımlarında bir artış gözlemlenmezken uzama değerlerinde önemli farklılıklar oluşmuştur. İşlemsiz numuneye göre kriyojenik işlem uygulanan numunenin uzama miktarı 1,5 kat artmıştır. Bu değişim yapıda çökelen fazlardan ve bunların yoğunluklarından kaynaklı olduğu düşünülmektedir.
- Kriyojenik işlem görmemiş numunenin çok hızlı korozyona uğradığı ve yüzey yapısının bozulduğu gözlemlenirken, kriyojenik işleme tabi tutulan numuneler de tuz bileşenlerinin yapıya homojen olarak dağılıp yapışarak numunenin korozyonunu önlediği gözlemlenmiştir. Artan β -fazlarının katodik davranarak korozyon dayanımını artırdığı söylenebilir. Ayrıca yüzey pürüzlülük değerleri incelendiğinde de işlemsiz numunenin ortalama Ra değeri $10,82\ \mu\text{m}$ olarak ölçülürken 48 saat işlem uygulanmış numunenin yüzey pürüzlülük değeri $1,63\ \mu\text{m}$ olarak ölçülmüştür.
- Yapılan elektrokimyasal test sonuçlarında elde edilen veriler incelendiğinde

çözeltide ölçülen direnç değerlerinin işlemsiz numunede $2652 \Omega \cdot \text{cm}^2$ olarak ölçülürken kriyojenik işlemlili numunede $8638 \Omega \cdot \text{cm}^2$ değerine ulaştığı gözlemlenmiştir. Bu değerde numunenin korozyon dayanımında önemli bir artış olduğunu göstermektedir. Ancak, korozyon mekanizmasının aydınlatılması amacıyla “Tafel Ekstrapolasyon” yönteminin yapılması gerekmektedir. Özellikle kriyojenik işlemin anodik ve katodik reaksiyonlara etkisi iyice aydınlatılmadığıdır. Bunun yanı sıra EIS yöntemi ile elde edilen elektrokimyasal parametreler; “Dinamik Elektrokimyasal Empedans Spektroskopisi” yöntemi kullanılarak zamana bağlı olarak araştırılmalıdır.

- EDS analizlerinde, AZ63 alaşımının yüzeyinde kriyojenik işlem süreci ve süresine bağlı olarak “Al” elementinin ağırlıkça yüzdesinin sırasıyla yaklaşık %28 ile %46 oranında arttığı görülmektedir. Yüzeyde görüntülenen “Al” elementi, metal yüzeyinde muhtemel Al_2O_3 tabakasının oluşumuna neden olarak AZ63 metalini korozyona karşı koruma ihtimali vardır. Bunun kanıtlanması için XRD analizleri yapılmalıdır.
- Magnezyum hafiflik ve mukavemet değerleri kısmi kullanıma imkân verse de korozyon dayanımı sebebi ile kullanım kısıtları oluştuğu bilinmektedir. Bu çalışmada mukavemet artışı sağlanamamada kısmi sertlik değer artışı, önemli miktarda deformasyon iyileştirmesi ve çok önemli miktarda korozyon direnci artışı sağlanmıştır. Bu bağlamda
- Bu malzemeye daha uzun süre sığ kriyojenik işlem uygulanabilir. Ayrıca derin kriyojenik işlem uygulaması yapılarak mekanik ve korozyon değerleri incelenebilir. Yine korozyon direnci artışındaki mikro yapısal mekanizmalar SEM ve TEM kullanılarak tespit edilebilir.

6. KAYNAKLAR

- [1] J. Davis, "Superplasticity in thin magnesium alloy sheets and deformation mechanism maps for magnesium alloys at elevated temperatures," Society of Automotive Engineers Technical Paper, Philadelphia, USA, Rep. 910551, 1991.
- [2] G. Cole, "Magnesium into the next millennium," in *International Magnesium Association*, Rome, Italy, 1999, ss. 21.
- [3] A.A. Nayeb-Hashemi, J.B. Clark, *Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys*, 1. Baskı, Ohio, USA: ASM International, 1988, böl. 3, ss. 43.
- [4] H. Friedrich, S. Schumann, "The second age of magnesium," in *Dead Sea Magnesium Conference*, Jerusalem, Israel, 2000, ss. 9.
- [5] E. Aghion, B. Bronfin and D. Eliezer, "The role of the magnesium industry in protecting environment," *Journal of Material Processing Technology*, c. 117, sayı 3 ss. 381-385, 2001.
- [6] T. Sweeder, "Demand for Lightweight Technology," in *International Magnesium Association*, Minnesota, USA, 2000, ss. 760.
- [7] I.P. Moreno, T.K. Nandy, J.W. Jones, J.E. Allison, T.M. Pollock, "Microstructural stability and creep of rare-earth containing magnesium alloys," *Scripta Materialia*, c. 48, sayı 4, ss. 1029-1034, 2003.
- [8] A.A. Luo, "Recent magnesium alloy development for elevated temperature applications," *International Materials Review*, c. 49, sayı 4, ss. 13-30, 2004.
- [9] M.O. Pekguleryuz and A.A. Kaya, "Creep resistant magnesium alloys for powertrain applications," *Advanced Engineering Materials*, c. 5, sayı 12, ss. 866-878, 2003.
- [10] K.M. Asl and A. Tari, F. Khomamizadeh, "Effects of deep cryogenic treatment on microstructure, creep and wear behaviors of AZ91 magnesium alloy," *Materials Science and Engineering*, c. 523, sayı 1, ss. 27-31, 2009.
- [11] F. Czerwinski, *Magnesium Injection Molding*, 1. Baskı, New York, USA: Springer Science Business Media, 2008, ss. 1- 79.
- [12] K.U. Kainer, *Magnesium Alloys and Technology*, 1. Baskı, Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2003, böl. 1, ss. 1-22.
- [13] R.S. Busk, "Lattice parameters of magnesium alloys," *Transactions of the American Institute of Mining*, c. 188, sayı 1, ss. 1460-1464, 1950.
- [14] F.W. Von Batchelder and R.F. Raeuchle, "Lattice constants and brillouin zone overlap in dilute magnesium alloys," *Physical Review*, c. 105, sayı 4, ss. 59-61, 1957.
- [15] D. Garvin, V.B. Parker, H.J. White, "Codata Thermodynamic Tables Selections for Some Compounds of Calcium and Related Mixtures: A Prototype Set of Tables," *Alche Journal*, c. 35, sayı 5, ss. 887, 1987.

- [16] C.S. Roberts, *Magnesium and Its Alloys*, 1. Baskı, New York, USA: Wiley & Sons, 1960, bl. 5, ss. 145-218.
- [17] B.L. Mordike and T. Ebert, "Magnesium: Properties, applications, potential," *Materials Science and Engineering*, c. 302, sayı 1, ss. 37-45, 2001.
- [18] M. M. Avedesian, ve H.Baker, *Magnesium and Magnesium Alloys*, 1. Baskı, Ohio, USA: ASM International, 1999, ss. 12-25.
- [19] J. Davis, "The role of the magnesium industry in protecting the environment," Society of Automotive Engineers Technical Paper, Detroit, USA, Rep. 910551, 1991.
- [20] Anonim, (2014,15 Temmuz). *Magnesium Alloy* (Iron Boar Labs) [Online]. Erişim: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/AM60A-AM60A-F-M10600-Magnesium>
- [21] J. T. Black, R. A. Kohser, *DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing*, 10. Baskı, New York, USA: John Wiley & Sons, 2012, bl. 7, ss. 153.
- [22] K. Andrej, R. Tomasz, "Structural Stability of Mg-6Al-2Sr Magnesium Alloy," *Solid State Phenomena*, c. 176, sayı 79, ss. 75-82, 2010.
- [23] Anonim, (2019, 12 Kasım). *Material Science Article* (AZO Material) [Online]. Erişim: <https://www.azom.com/articles.aspx>
- [24] L. Barber, "Characterization of the Solidification Behavior and Resultant Microstructures of Magnesium-Aluminum Alloys," M.S. Thesis, Materials Science and Engineering, Worcester Polytechnic Institute, Worcester, England, 2004.
- [25] Y. Wang, M. Xia, Z. Fan, X. Zhou, G.E. Thompson, "The effect of Al8Mn5 particles on grain size of as-cast Mg-Al-Zn AZ91D alloy," *Intermetallics*, c. 18, sayı 8, ss. 1683-1689, 2010.
- [26] Z. Zhang, "Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications," Ph.D. Dissertation, Faculty of Sciences, Genie Universities, Quebec, Canada, 2000.
- [27] A. Suziki, N.D. Saddock, L. Riester, E. Curzio, J.W. Jones, T. Pollock, "Effect of Sr Additions on the Microstructure and Strength of a Mg-Al-Ca Ternary Alloy," *Metallurgical and Materials Transactions*, c. 38, sayı 6, ss. 420-427, 2007.
- [28] M. D. Nave, A. K. Dahle, D. H. Stjohn, "Eutectic Growth Morphologies in Magnesium-Aluminium Alloys," *Magnesium Technology*, c. 35, sayı 3, ss. 233-242, 2000.
- [29] B. Oğuz, *Demir Dışı Metallerin Kaynağı*, 1. Baskı, İstanbul, Türkiye: Oerlikon Yayınları, 1990, bl. 1, ss. 1-10.
- [30] P. Robinson, *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 9.Baskı, Ohio, USA: ASM International, 1990, bl. 8, ss. 1450-1550.
- [31] R. J. Chadwick, "The constitution of the alloys of magnesium and zinc," *Journal of the Institute of Metals*, c. 39, sayı 12, ss. 285-299, 1928.
- [32] W. Hume-Rothery, ve E.D. Rounsefell, "The System Magnesium-Zinc," *Journal of the Institute of Metals*, c. 41, sayı 1, ss. 119-138, 1929.

- [33] J.B. Clark, ve F.N. Rhgnes, “Central region of the magnesium-zinc phase diagram,” *Transactions of the American Institute of Mining*, c. 209, sayı 1, ss. 425-430, 1957.
- [34] J. J. Park, ve L. L. Wyman, “Phase Relationships in Magnesium Alloys,” Wright Air Development Center Technical Report, Ohio, USA, Rep. 142110, 1988.
- [35] P. Bhale, “Effect of deep cryogenic treatment on microstructure and properties of AE42 magnesium alloy,” M.S. Thesis, Master of Technology, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2015.
- [36] H. Friedrich, S. Schumann, “Research for a new age of magnesium in the automotive industry”, *Journal of Materials Processing Technology*, c. 117, sayı 2, ss. 276-281, 2001.
- [37] A. A. Luo, “Magnesium casting technology for structural applications”, *Journal of Magnesium and Alloys*, c. 1, sayı 3, ss. 2-22, 2013
- [38] J. Mizrahi, “The cutting edge”, *Airpower*, c. 25, sayı 4, ss. 540-560, 1998.
- [39] M. Lean “The Effects and Economic Impact of Corrosion,” in *International Magnesium Association*, Minnesota, USA, 1995, ss. 1-15.
- [40] M.M. Avedesian, H. Baker, *ASM Specialty Handbook- Magnesium and Magnesium Alloys*, 1. Baskı, Ohio, USA: ASM International, 1999, ss. 24.
- [41] H. Friedrich, S. Schumann, “The route from the potential of magnesium to increased applications in cars,” in *International Magnesium Association*, Munich Germany, 2003, ss. 612.
- [42] J. Tao, Y. Zhang, F. Fan, Q. Chen, “Microstructural Evolution and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy Prepared by Casting-solid Extrusion Forging During Partial Remelting,” *Defence Technology*, c. 9, sayı 3, ss. 146, 2013.
- [43] J.C. Hogg, H. Westengen, D.L. Albright, *Extraction, Refining and Fabrication of Light Metals*, 1. Baskı, Ottawa, Canada: Pergamon, 1991, böl. 3, ss.215-220.
- [44] P. Baldissera and C. Delprete, “Deep cryogenic treatment: a bibliographic review,” *The Open Mechanical Engineering Journal*, c. 2, sayı 2, ss. 1-11, 2008.
- [45] S. Zhirafar, a. Rezaeian, M. Pugh, J. Mater, “Effect of cryogenic treatment on the mechanical properties of 4340 steel” *Journal of Materials Processing Technology*, c. 186, sayı 3, ss. 298-303, 2007.
- [46] V. Leskovšek, M. Kalin, J. Vizintin, “Influence of deep-cryogenic treatment on wear resistance of vacuum heat-treated HSS,” *Vacuum*, c. 80, sayı 6, ss. 507-518, 2006.
- [47] Huang Zhiquan, Wei Jianchun, Huang Qingxue, Ma Lifeng, Gao Xiangyu, Yue Zhaohan, “Effect of Cryogenic Treatment Prior to Rolling on Microstructure and Mechanical Properties of AZ31 Magnesium Alloy,” *Rare Metal Materials and Engineering*, c. 47, sayı 10, ss. 2942-2948, 2018.
- [48] P. Robinson, *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials*, 9.Baskı, Ohio, USA: ASM International, 1990, böl. 8, ss. 447.
- [49] P. Robinson, *ASM Handbook Volume 2: Properties and Selection: Nonferrous*

- Alloys and Special-Purpose Materials*, 9. Baskı, Ohio, USA: ASM International, 1990, böl. 8, ss. 24-117
- [50] H. Kuhn, D. Medlin, *ASM Handbook Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation*, Ohio, USA: ASM International, 2007, böl. 1, ss. 38.
- [51] Robert M. Asmussen, "The Influence of Microstructure on the Corrosion of Magnesium Alloys," Ph.D. Dissertation, Western University, Program in Chemistry, Ontario, Canada, 2014.
- [52] P. Atkins, J. Paula, *Atkins Physical Chemistry*, 7. baskı, Oxford, England: OUP Oxford, 2001, böl. 7, ss. 222-235.
- [53] T.J. Warner, N.A. Thorne G. Nussbaum, W.M. Stobes, "A cross sectional TEM study of corrosion initiation in rapidly solidified magnesium-based ribbons," *Surface and Interface Analysis*, c. 19, sayı 1-12, ss. 386-392, 1992.
- [54] A.D. King, N. Birbilis, J.R. Scully, "Accurate electrochemical measurement of magnesium corrosion rates; a combined impedance, mass-loss and hydrogen collection study," *Electrochimica Acta*, c. 121, sayı 1, ss. 394-406, 2014.
- [55] M. Liu, P.J. Uggowitzer, A.V. Nagasekhar, P. Schmutz, M. Easton, G. Song, A. Atrens, "Calculated phase diagrams and the corrosion of die cast Mg-Al alloys," *Corrosion Science*, c. 51, sayı 3, ss. 602-619, 2009.
- [56] R.C. Zeng, J. Zhang, W. Huang, W. Dietzel, K.U. Kainer, C. Blawert, W. Ke, "Review of studies on corrosion of magnesium alloys," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, c. 16, sayı 2, ss. 763-771, 2006.
- [57] I.J. Polmear, "Magnesium alloys and applications," *Materials Science and Technology*, c. 10, sayı 1, ss. 1-16, 1994.
- [58] H. Matsubara, Y. Ichige, K. Fujita, H. Nishiyama, K. Hoduchi, "Effect of impurity Fe on corrosion behaviour of AM50 and AM60 magnesium alloys," *Corrosion Science*, c. 66, sayı 1, ss. 203-210, 2013.
- [59] C. Verma, M. A. Quraishi, E. E. Ebenso, I. B. Ibot and A. El Assyry, "3-Amino alkylated indoles as corrosion inhibitors for mild steel in 1M HCl: Experimental and theoretical studies," *Journal of Molecular Liquids*, c. 219, sayı 1, ss. 647-660, 2016.
- [60] Gisela Auxiliadora Cepeda Arque, "Development and Implementation of Techniques to Characterize Solid Oxide Fuel Cells," M.S. Thesis, Chemical and Industrial Processes Engineering, Padova University, Padova, Italy, 2016.
- [61] T.J. Chen, L.K. Huang, X.F. Huang, Y. Ma, Y. Hao, "Effects of mould temperature and grain refiner amount on microstructure and tensile properties of thixoforged AZ63 magnesium alloy," *Journal of Alloys and Compounds*, c. 556, sayı 1, ss. 167-177, 2013.
- [62] L. Elen, Y. Türen, E. Koç, "AZ91 Mg Alaşımına Farklı Oranlarda Sb İlavesi İle Katılma Hızının Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi", *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, c. 11, sayı 2, ss. 451 - 463, 2019.
- [63] L. Falcon, B. Bedolla, J. Lemus, C. Leon, "Corrosion behavior of Mg-Al/TiC composites in NaCl solution", *International Journal of Corrosion*, c. 10, sayı 1, ss. 507-518, 2011.
- [64] F. Andreatta, I. Apachitei, A.A. Kodentsov, J. Dzwonczyk, J., Duszczyk, "Volta

- potential of second phase particles in extruded AZ80 magnesium alloy,” *Electrochimica Acta*, c. 51, sayı 17, ss. 3551-3557, 2006.
- [65] G. Song, A. Bowles, D.H. St. John, “Corrosion resistance of aged die cast magnesium alloy AZ91D,” *Materials Science and Engineering*, c. 366, sayı 1, ss. 74-86, 2004.
- [66] R. Ambat, N.N. Aung, W. Zhou, “Evaluation of microstructural effects on corrosion behaviour of AZ91D magnesium alloy,” *Corrosion Science*, c. 42, sayı 8, ss. 1433-1455, 2000.
- [67] M.C. Zhao, M. Liu, G. Song, A. Atrens, “Influence of the β -phase morphology on the corrosion of the Mg alloy AZ91,” *Corrosion Science*, c. 50, sayı 7, ss. 1939-1953, 2008.
- [68] Y. Cheng, T. Qin, H. Wang, Z. Zhang, “Comparison of corrosion behaviour of AZ31, AZ91, AM60 and ZK60 magnesium alloys,” *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, c. 19, sayı 3, ss. 517-524, 2009.
- [69] A. Pardo, M.C. Merino, A.E. Coy, F. Viejo, R. Arrabal, S. Feliu Jr., “Influence of microstructure and composition on the corrosion behaviour of Mg/Al alloys in chloride media,” *Electrochimica Acta*, c. 53, sayı 27, ss. 7890-7902, 2008.
- [70] H.Y. Hsiao, W.T. Tsai, “Effect of heat treatment on anodization and electrochemical behaviour of AZ91D magnesium alloy,” *Journal of Materials Research*, c. 20, sayı 10, ss. 2763-2771, 2005.
- [71] M. Laleh, F. Kargar, “Effect of surface nanocrystallization on the microstructural and corrosion characteristics of AZ91D magnesium alloy,” *Journal of Alloys and Compounds*, c. 509, sayı 37, ss. 9150-9156, 2011.
- [72] G. Galicia, N. Pebere, B. Tribollet, V. Viver, “Local and global electrochemical impedances applied to the corrosion behaviour of an AZ91 magnesium alloy,” *Corrosion Science*, c. 51, sayı 2, ss. 1789-1794, 2008.
- [73] H. Krawiec, S. Stanek, V. Vignal, J. Lelito, J. Suchy, “The use of microcapillary techniques to study the corrosion resistance of AZ91 magnesium alloy at the microscale,” *Corrosion Science*, c. 53, sayı 10, ss. 3108-3113, 2011.
- [74] K. Ralston, N. Birbilis, “Effect of grain size on corrosion: A review,” *Corrosion*, c. 66, sayı 7, ss. 1-13, 2010.
- [75] J. Liao, M. Hotta, S. Motoda, T. Shinohara, “Atmospheric corrosion of two field exposed AZ31B magnesium alloys,” *Corrosion Science*, c. 71, sayı 1, ss. 53-61, 2013.
- [76] N. Aung, W. Zhou, “Effect of heat treatment on corrosion and electrochemical behaviour of AZ91D magnesium alloy,” *Journal of Applied Electrochemistry*, c.32, sayı 1, ss. 1397-1401, 2002.
- [77] J. Li, K. Wan, Q. Jiang, H. Sun, Y. Li, B. Hou, L. Zhu, M. Liu, “Corrosion and Discharge Behaviors of Mg-Al-Zn and Mg-Al-Zn-In Alloys as Anode Materials”, *Metals*, c. 6, sayı 3, ss. 65, 2016.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : İsmail Deniz Kağan DEMİR
Doğum Tarihi ve Yeri: 18/05/1991 ANKARA
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta : i.d.kagandemir@gmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Y. Lisans	Kompozit Mal. Tek.	Düzce Üniversitesi	2020
Lisans	Metalurji ve Malz. Müh.	Sakarya Üniversitesi	2013
Lise	Sayısal	Eskişehir Fatih Anadolu Lisesi	2009

İŞ DENEYİMİ

Yıl	Yer	Görev
2013-2014	Karaman Döküm San. Tic. Ltd. Şti. (DÜZCE)	Üretim Sorumlusu
2014-2015	ENTİL A.Ş. (ESKİŞEHİR)	Üretim Mühendisi
2015-2017	Karaman Döküm San. Tic. Ltd. Şti. (DÜZCE)	Üretim Müdürü
2017-2018	Gedik Döküm San. A.Ş. (SAKARYA)	Çelikhane Üretim Mühendisi
2018-Halen	TR Mekatronik Sistemler A.Ş. (DÜZCE)	AR-GE Mühendisi

YAYINLAR

İ. Demir ve İ. Uygur, “Kriyojenik İşlem Uygulanmış Dökme Demir Malzemelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi,” *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, c. 5, sayı 1, ss. 210-219, 2017.

İ. Demir, “AZ63 Magnezyum Alaşımının Korozyon Direncine Kriyojenik İşlemin Etkisi,” *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, c. 8, sayı 2, ss. 1-8, 2019.