



**EZ43 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK
VE BİYUYUMLULUK DAVRANIŞLARINA
NEODİNYUM VE SERYUM ALAŞIM
ELEMENTLERİ İLE ÇOK YÖNLÜ DÖVME
İŞLEMİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

**2024
DOKTORA TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

Özcan BÜYÜKGENÇ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI**

**EZ43 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK VE
BİYUYUMLULUK DAVRANIŞLARINA NEODİNYUM VE SERYUM
ALAŞIM ELEMENTLERİ İLE ÇOK YÖNLÜ DÖVME İŞLEMİNİN
ETKİLERİNİN İNCELENMESİ**

Özcan BÜYÜKGENÇ

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI**

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Doktora Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Aralık 2024**

Özcan BÜYÜKGENÇ tarafından hazırlanan “EZ43 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK VE BİYOUYUMLULUK DAVRANIŞLARINA NEODİNYUM VE SERYUM ALAŞIM ELEMENTLERİ İLE ÇOK YÖNLÜ DÖVME İŞLEMİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ ” başlıklı bu tezin Doktora Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI

.....

Tez Danışmanı, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından Oy Birliği ile Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora tezi olarak kabul edilmiştir. 24/12/2024

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. İsmail Hakkı KARA (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr. Harun ÇUĞ (KBÜ)

.....

Üye : Doç. Dr.Mehmet AKKAŞ (KÜ)

.....

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Özkan ESKİ (KÜ)

.....

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

Doç. Dr. Zeynep ÖZCAN

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



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

Özcan BÜYÜKGENÇ

ÖZET

Doktora Tezi

EZ43 MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK VE BİYOYUMLULUK DAVRANIŞLARINA NEODİNYUM VE SERYUM ALAŞIM ELEMENTLERİ İLE ÇOK YÖNLÜ DÖVME İŞLEMİNİN ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Özcan BÜYÜKGENÇ

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI

Aralık 2024, 145 sayfa

Bu çalışmada, EZ43A ve EZ43B Mg esaslı malzemelerin ilk defa üretimi ve Ekstrüzyon işlemi ile çok yönlü dövme yöntemleri sonrası mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesini kapsamaktadır.

Magnezyum elementine Çinko (Zn), Gadolinyum (Gd), Kalsiyum (Ca), Zirkonyum (Zr) ve farklı oranlarda Neodinyum (Nd) ile Seryum (Ce) alaşım elementleri ilave edilerek düşük basınçlı döküm yöntemi ile EZ43A ve EZ43B alaşımlarının üretilmesi sağlanmıştır.

EZ43A; %3 Zn, %2 Nd, %1 Ce, %1 Gd, %0.5 Zr, %0.5 Ca kimyasal bileşime sahip EZ43B ise; %3 Zn, %1 Nd, %2 Ce, %1 Gd, %0.5 Zr, %0.5 Ca kimyasal bileşime sahip olan bir alaşımdır.

EZ43A ve EZ43B alaşımlarının üretilmesinde uygulanan yöntem; ergiyik bazlı indüksiyon karıştırma ile alaşımlama ve döküm işlemi olup, döküm sonrası elde edilen EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ilk olarak Homojenizasyon ısıtma işlemi yapılmış, ardından numunelere Ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon işleminden sonra alaşımdan belli oranda parça alınarak çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuştur. Ardından ekstrüde edilen alaşımlar ile çok yönlü dövmeye tutulan alaşımların Mikroyapı, sertlik, çekme, korozyon, aşınma ve biyouyumlulukları incelenmiştir.

Alaşımların ergitimi kapalı sistem indüksiyon ocağında koruyucu gaz (Ar) kullanılarak ve dökümleri ise yine koruyucu gaz ($\text{CO}_2 + \%1\text{SF}_6$) altında yapılmıştır. Ergitme ve karıştırma tamamlandıktan sonra, kalıbın boyutlarına uygun olarak tasarlanmış olan ısıtma plakaları ile döküm kriterlerine uygun olarak tasarlanmış çelik kalıp 270°C 'ye ısıtılmış ve iç kısmı döküm öncesi $\text{CO}_2 + \text{SF}_6$ gazı ile doldurulduktan sonra gravite yöntemiyle döküm işlemi gerçekleştirilmiş ve döküm işleminden sonra iki kademeli silindirik ingot parça elde edilmiştir. EZ43A alaşımı ve EZ43B alaşımı ile ilgili olarak ayrı ayrı birer adet ingot parça elde edilmiştir.

Döküm işleminin ardından Alaşımların döküm işlemi sırasında üretimi gerçekleştirilen döküm parçaların mikro yapılarında muhtemelen oluşabilecek küçük oranlarda ki mikrosegregasyonlar ile homojen olmayan tane dağılımı ve boyutu gibi kusurları ortadan kaldırmak ve yine ekstrüzyon işlemi sırasında deformasyonu zorlaştıran düşük termal kararlılığa sahip ikincil fazların ana matris fazı içinde çözünmesini temin etmek amacıyla yapılan ekstrüzyon işlemi öncesi iki alaşıma da 400°C de 24 saat süren homojenleştirme ısıtma işlemi uygulanmıştır.

Homojenleştirme işlemi tamamlanan alaşımlar hidrolik pres ile 350°C sıcaklıkta 7:1 oranında 0.3 mm/sn basma hızında ekstrüzyon işlemine tabi tutuldu.

Ekstrüzyon işleminden sonra çok yönlü dövme işlemi uygulanacak olan EZ43A ve EZ43B alaşımları çok yönlü dövme işlemine başlamadan önce Ekstrüde edilmiş

numuneler uygun boyutlarda kesildi ve elde edilen bu numuneler sonra Biyet boyunca homojen sıcaklık dağılımının olması adına ısıtıl işlem fırınında 350 c sıcaklıkta iki saat bekletildi. Ardından dövme işlemi için gereken sıcaklığa gelen alaşımların ilk olarak birinci dövme işlemine geçildi. Birinci dövme işlemine tabi tutulan numuneler ikinci dövme işlemi öncesi tekrar tavlama fırınına alındı ve 350 c sıcaklıkta 30 dakika bekletildi. Alaşımların dövme işlem 30 ton kapasiteli hidrolik pres yardımı ile yapıldı. Dövme işlemine başlamadan önce dövme işleminde kullanılan kalıplar sıcaklık kontrollü prese bağlantılı kuşak kelepçe rezistanslar ile ısıtılıp 350 c olması sağlanmıştır.

Üretimi tamamlanan EZ43A ve EZ43B alaşımların; ekstrüzyon işlemi sonrası mikroyapı görüntüleme işlemleri, XRD analizi, SEM, EDX ve MAP görüntüleme işlemleri, sertlik ve çekme testi, daldırma korozyon testi, potansiyodinamik polarizasyon (Pd) testi, empedans testi, adhezif ve korozif aşınma testi, hidrojen evolution testi ile biyoyumluluk genotoksisite ve sitotoksisite testleri yapılmıştır. Biyoyumluluk testlerinde Genetik yapıyı bozup bozmadıklarına ve Bakterileri öldürüp öldürmediklerine bakılmıştır. Geno Toksitite testleri sonrasında her iki alaşımında Genetik yapıyı bozmadıkları izlenmiştir. Sito toksitite testlerinde ise EZ43A alaşımının Bakteri sayısında %142 den fazla artış sağladığı ve EZ43B alaşımının ise Bakteri sayısında %116 artış sağladığı izlenmiştir. Standartlara göre %70 den fazla olursa malzeme Biyoyumlu olduğundan her iki alaşımda biyoyumlu alaşım olduğu görülmüştür.

Birinci ve ikinci dövme işlemleri sonrası ise mikroyapı görüntüleme işlemleri, SEM, EDX ve MAP görüntüleme analiz işlemleri, sertlik testi, daldırma korozyon testi, potansiyodinamik polarizasyon (Pd) testi, empedans testi, adhezif ve korozif aşınma testi ve hidrojen evolution testleri yapılmıştır.

Korozyon testleri; 7.4 pH'a ve NaCl 8.0 g/l, KCl 0.4 g/l, CaCl₂ 0.14 g/l, NaHCO₃ 0.35 g/l, C₆H₆O₆ (glucose) 1.0 g/l, MgCl₂·6H₂O 0.1 g/l, MgSO₄·7H₂O 0.06 g/l, KH₂PO₄ 0.06 g/l, Na₂HPO₄·12H₂O 0.06 g/l. bileşime sahip Hank sıvısı içinde 37 °C'de yapılmıştır.

Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış EZ43A numunesi ile Çok yönlü dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunelerinin kıyaslandığında ise Bir kere Dövme işlemi Uygulanmış EZ43A numunesinin mesafeye bağlı ağırlık kaybının Ekstrüzyon işleminden sonra korozyon aşınma testi uygulanmış numuneye göre mesafeye bağlı ağırlık kaybının çok daha yüksek olduğu görülmektedir. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinin Mesafeye bağlı ağırlık kaybının Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış EZ43A numunesine göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış EZ43B numunesi ile bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin kıyaslandığında ise Bir kere Dövme işlemi Uygulanmış EZ43B numunesinin mesafeye bağlı ağırlık kaybının Ekstrüzyon işleminden sonra korozyon aşınma testi uygulanmış numuneye göre mesafeye bağlı ağırlık kaybının çok daha düşük olduğu görülmektedir.

Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin mesafeye bağlı ağırlık kaybının diğer numunelerle kıyaslandığında en düşük düzeyde olduğu gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : Magnezyum alaşımları, Ekstrüzyon, Korozyon, Mikroyapı ve mekanik özellikler, EZ43, Nadir toprak elementleri.

Bilim Kodu : 91514

ABSTRACT

Ph. D. Thesis

**INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF MULTI-DIRECTIONAL
FORGING PROCESS WITH NEODINIUM AND CERIUM ALLOY
ELEMENTS ON THE MECHANICAL AND BIOCOMPATIBILITY
BEHAVIOR OF EZ43 MAGNESIUM ALLOYS**

Özcan BÜYÜKGENÇ

**Karabük University
Institute of Graduate Programs
Department of Metallurgical and Materials Engineering**

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI

December 2024, 145 pages

This study covers the production of EZ43A and EZ43B Mg based materials for the first time and the investigation of their mechanical and corrosion properties after extrusion process and multidirectional forging methods.

Zinc (Zn), Gadolinium (Gd), Calcium (Ca), Zirconium (Zr), Neodymium (Nd) and Cerium (Ce) alloying elements were added to the Magnesium element and EZ43A and EZ43B alloys were produced by low pressure casting method.

EZ43A has a chemical composition of 3% Zn, 2% Nd, 1% Ce, 1% Gd, 0.5% Zr, 0.5% Ca and EZ43B has a chemical composition of 3% Zn, 1% Nd, 2% Ce, 1% Gd, 0.5% Zr, 0.5% Ca.

The method applied in the production of EZ43A and EZ43B alloys; alloying and casting process with melt-based induction stirring. Homogenisation heat treatment was first applied to the EZ43A and EZ43B alloys obtained after casting, and then extrusion process was applied to the samples. After the extrusion process, a certain amount of parts were taken from the alloy and subjected to multidirectional forging process. Then, the microstructure, hardness, tensile, corrosion, wear and biocompatibility of the extruded alloys and the alloys subjected to multidirectional forging were investigated.

The alloys were melted in a closed system induction furnace using protective gas (Ar) and cast under protective gas (CO₂+1%SF₆).

After the melting and mixing was completed, the steel mould, which was designed in accordance with the casting criteria with the heating plates designed in accordance with the dimensions of the mould, was heated to 270 C and the interior was filled with CO₂ + SF₆ gas before casting and the casting process was carried out by gravity method and after the casting process, two graded cylindrical ingot parts, one from each alloy, were obtained.

After the casting process, both alloys were subjected to homogenisation heat treatment at 400°C for 24 hours before the extrusion process in order to eliminate defects such as microsegregations and inhomogeneous grain distribution and size in small ratios that may possibly occur in the microstructure of the cast parts produced during the casting process of the alloys and to ensure that the secondary phases with low thermal stability, which make deformation difficult during the extrusion process, are dissolved in the main matrix phase.

After homogenisation, the alloys were extruded with a hydraulic press at 350 c at a ratio of 7:1 at a compression speed of 0.3 mm/sec.

After the extrusion process, the EZ43A and EZ43B alloys, which will be subjected to multidirectional forging process after the extrusion process, were cut to the appropriate dimensions before starting the multidirectional forging process, and these samples were then kept in the heat treatment furnace at 350 c for two hours in order to ensure homogeneous temperature distribution along the billet. Then, the alloys that reached the temperature required for the forging process were first subjected to the first forging process. The samples subjected to the first forging process were taken into the annealing furnace again before the second forging process and kept at 350 c for 30 minutes. The forging process of the alloys was carried out with the help of a hydraulic press with a capacity of 30 tonnes. Before starting the forging process, the moulds used in the forging process were heated with belt clamp resistances connected to the temperature-controlled press and 350 c was ensured.

After the extrusion process, microstructure imaging, XRD analysis, SEM, EDX and MAP imaging processes, hardness and tensile test, immersion corrosion test, potentiodynamic polarisation (Pd) test, impedance test, adhesive and corrosive wear test, hydrogen evolution test, biocompatibility genotoxicity and cytotoxicity tests were performed on EZ43A and EZ43B alloys. In biocompatibility tests, it was checked whether they disrupt the genetic structure and kill bacteria. After the genotoxicity tests, it was observed that both alloys did not disrupt the genetic structure. In cyto toxicity tests, it was observed that EZ43A alloy increased the number of bacteria by more than 142% and EZ43B alloy increased the number of bacteria by 116%. According to the standards, if more than 70% of the material is biocompatible, both alloys are biocompatible alloys.

After the first and second forging processes, microstructure imaging processes, SEM, EDX and MAP imaging analysis processes, hardness test, immersion corrosion test, potentiodynamic polarisation (Pd) test, impedance test, adhesive and corrosive wear test and hydrogen evolution tests were performed.

Corrosion tests were performed at pH 7.4 and NaCl 8.0 g/l, KCl 0.4 g/l, CaCl₂ 0.14 g/l, NaHCO₃ 0.35 g/l, C₆H₆O₆ (glucose) 1.0 g/l, MgCl₂-6H₂O 0.1 g/l, MgSO₄-7H₂O 0.06 g/l, KH₂PO₄ 0.06 g/l, Na₂HPO₄-12H₂O 0.06 g/l in Hank's fluid at 37 °C.

When the EZ43A specimen with adhesive wear after extrusion is compared with the EZ43A specimens with multiple forging processes, it is seen that the distance dependent weight loss of the EZ43A specimen with one forging process is much higher than the corrosive wear test after extrusion process. It was observed that the distance dependent weight loss of the EZ43A sample which was forged twice was lower than the EZ43A sample which was subjected to adhesive wear after extrusion.

When the EZ43B sample with adhesive wear after extrusion is compared with the EZ43B sample with forging process once, it is seen that the weight loss due to distance of the EZ43B sample with forging process once is much lower than the sample with corrosive wear test after extrusion process.

It was observed that the distance dependent weight loss of the EZ43B sample, which was forged once, was at the lowest level compared to the other samples.

Keywords: Magnesium alloys, Extrusion, Corrosion, Microstructure and mechanical properties, EZ43, Rare earth elements

Science Code : 91514

TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgi ve desteğini esirgemeyen, doktora çalışmam süresince değerli katkı ve yardımları ile beni yönlendiren, çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren Danışman hocam Prof. Dr. Hayrettin AHLATÇI hocama sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca çalışmalarım esnasında değerli katkılarını esirgemeyen Prof. Dr. Yunus TÜREN, Prof. Dr. Mehmet ÜNAL, Prof. Dr. İsmail ESEN ve Prof. Dr. İbrahim ÇAYIROĞLU hocalarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Laboratuvar çalışmalarımda yanımda olan Doktora öğrencisi Nurullah ŞAHİN'e teşekkür ederim.

Ve ayrıca bu günlere gelmemde maddi ve manevi desteğini esirgemeyen ailemin tüm bireylerine tüm kalbimle teşekkür eder, şükranlarımı sunarım.

Yine tez çalışmamıza KBÜBAP-24-DS-144 Proje No ile “Bilimsel Araştırma Destek” sağlayan Üniversitemiz Bilimsel Araştırmalar Proje (BAP) birimine teşekkürü bir borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	viii
TEŞEKKÜR.....	xii
İÇİNDEKİLER	xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xvii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xxiii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xxv
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	11
MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	11
2.1. MAGNEZYUM.....	11
2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI.....	13
2.3. ALAŞIM ELEMENTLERİ	16
2.3.1. Nadir Toprak (Re) Elementleri.....	16
2.3.1.1. Neodinyum (Nd)	19
2.3.1.2. Gadolinyum (Gd).....	21
2.3.1.3. Seryum (Ce)	23
2.3.2. Mg-RE Çoklu Alaşım Sistemleri.....	26
2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ PLASTİK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ.....	27
2.4.1. Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP)	28
2.4.2. Ekstrüzyon	30
2.4.3. Çok Yönlü Dövme Yöntemi.....	31

BÖLÜM 3	35
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
3.1. ÜRETİM.....	35
3.2. HOMOJENİZASYON İŞLEMİ	38
3.3. EKSTRÜZYON İŞLEMİ	39
3.4. ÇOK YÖNLÜ DÖVME İŞLEMİ.....	42
3.5. EKSTRİZYON VE ÇOK YÖNLÜ DÖVME İŞLEMİ SONRASI YAPILAN DENEYLER.....	44
3.5.1. Optik Mikroyapı Görüntüleme İşlemleri	44
3.5.2. XRD Analizi	45
3.5.3. SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlemleri	45
3.6. MEKANİK TESTLER	45
3.6.1. Sertlik Testi.....	45
3.6.2. Çekme Testi	46
3.7. AŞINMA TESTLERİ.....	46
3.7.1. Adhezif Aşınma Testi	46
3.7.2. Korozyf Aşınma Testi	47
3.8. KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU	48
3.8.1. Daldırma Korozyon Testi	48
3.8.2. Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi	50
3.8.3. Empedans Testi.....	50
3.8.4. Hidrojen Evolution Testi	51
3.9. BİYUYUMLULUK HÜCRE KÜLTÜRÜ TESTLERİ	52
3.9.1. MTT Sitotoksosite Testi	52
3.9.2. In-vitro Mikronükleus Genotoksosite Testi.....	52
 BÖLÜM 4	 54
DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	54
4.1. ALAŞIM KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ	54

Sayfa

4.1.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan XRD Analiz Sonuçları ve Değerlendirme	54
4.1.2. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Mikro Yapı Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi	55
4.1.3. Bir Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Mikro Yapı Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi	57
4.1.4. İki Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Mikro Yapı Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi	58
4.1.5. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi	62
4.1.6. Bir Dövme İşlemi Sonrası Yapılan SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi	65
4.1.7. İki Dövme İşlemi Sonrası Yapılan SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi	68
4.2. MEKANİK ÖZELLİKLERİN KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	73
4.2.1. Sertlik Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	73
4.2.2. Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	74
4.2.3. Aşınma Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi.....	75
4.2.3.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Aşınma Testi ve Değerlendirilmesi.....	76
4.2.3.2. Bir Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Aşınma Testi ve Değerlendirilmesi.....	83
4.2.3.3. İki Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Aşınma Testi ve Değerlendirilmesi.....	89
4.3. KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	96
4.3.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Daldırma Korozyon Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	96
4.3.2. Bir Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Daldırma Korozyon Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	101

Sayfa

4.3.3. İki Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Daldırma Korozyon Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	103
4.4. POTANSİYODİNAMİK POLARİZASYON (PD) TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	110
4.4.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	110
4.4.2. Bir Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	111
4.4.3. İki Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	113
4.5. HİDROJEN EVOLÜTİON TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	116
4.5.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Hidrojen Evolution Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	117
4.5.2. İki Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Hidrojen Evolution Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi	121
4.6. EMPEDANS TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	123
4.7. BİYUYUMLULUK HÜCRE KÜLTÜRÜ TESTLERİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ.....	124
4.7.1. Genotoksisite Testi	124
4.7.2. Sitotoksisite Testi	125
BÖLÜM 5	127
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	127
5.1. GENEL SONUÇLAR	127
5.2. ÖNERİLER	133
ÖZGEÇMİŞ	145

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Mg-Nd faz diyagramı (Tekumalla vd., 2014).....	20
Şekil 3.1. Atmosfer kontrollü indüksiyon döküm ünitesinin şematik görünümü (Elen, 2021)	36
Şekil 3.2. Kalıp ve ısıtıcı (a) Çelik döküm kalıbı (b) Isıtma plakaları	37
Şekil 3.3. Yolluğa yerleştirilen seramik döküm filtresi görüntüsü	37
Şekil 3.4. Üretilen Döküm İngot parçanın kalıptan çıktıktan sonraki görüntüsü.....	37
Şekil 3.5. Ergitme işleminden bir görüntü	38
Şekil 3.6. a) Alaşımın folyolanmış görüntüsü b) Alaşımın folyo içinde kuma gömülme işlemi c) Alaşımın homojenleştirme fırınına konulmuş hali.	39
Şekil 3.7. Ekstrüzyon işleminin yapıldığı hidrolik pres.....	41
Şekil 3.8. Ekstrüzyon Öncesi Numune (60x32mm).....	41
Şekil 3.9. Tavlama fırınından görüntü	41
Şekil 3.10. Ekstrüzyon işlemi sonrası numune (10x10x110mm)	42
Şekil 3.11. Ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi. (Elen, 2021)	42
Şekil 3.12. Çok yönlü Dövme işlemi uygulanan numune görüntüleri a) Bir dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesi b) İki dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin parçalanmış hali c) İki dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesi... ..	43
Şekil 3.13. Çok yönlü dövme işleminde kullanılan aparatlar	44
Şekil 3.14. Çekme testi numunesinin görüntüsü.....	46
Şekil 3.15. Hidrojen Evolution Test düzeneği	51
Şekil 4.1. (a) EZ43A ve (b) EZ43B alaşımlarının XRD elementel tepki spektrum sonuçları	55
Şekil 4.2. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A alaşımının mikroyapı görüntüleri A) 10x B) 20x C) 50x D) 100x	56
Şekil 4.3. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B Alaşımının Mikroyapı Görüntüleri a) X10 b) X20 c) X50 d) X100	56
Şekil 4.4. EZ43A alaşımına bir dövme işlemi sonrası uygulanan mikroyapı görüntüleri a) 10x b) 20x c) 50x d) 100x	57
Şekil 4.5. EZ43B alaşımına bir dövme işlemi sonrası uygulanan mikroyapı görüntüleri a)20x b) 50x c) 100x	58
Şekil 4.6. EZ43A alaşımına iki dövme işlemi sonrası uygulanan mikroyapı görüntüleri a)10x b) 20x c) 50x d) 100x	59

Şekil 4.7. EZ43B alaşımına iki dövme işlemi sonrası uygulanan mikro yapı görüntüleri a)10x b) 20x c) 50x d) 100x	60
Şekil 4.8. EZ43A alaşımının mikro yapı görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (50x) b) Bir dövme işlemi sonrası (50x) c) İki dövme işlemi sonrası (50x).....	61
Şekil 4.9. EZ43B alaşımının mikro yapı görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (50x) b) Bir dövme işlemi sonrası (50x) c) İki dövme işlemi sonrası (50x)	61
Şekil 4.10. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A alaşımının SEM analizi görüntüleri a) 1kx b) 2kx c) 4kx	62
Şekil 4.11. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımının SEM analizi görüntüleri a) 1kx b) 2kx c) 3kx	63
Şekil 4.12. a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarının SEM-EDX spektrum görüntüleri (2kx).....	63
Şekil 4.13. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımının MAP görüntüsü.....	65
Şekil 4.14. EZ43A alaşımının bir dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a) 500x b) 1kx c) 2kx d) 4kx	65
Şekil 4.15. EZ43B alaşımının bir dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a) 500x b) 1kx c) 2kx d) 4 kx	66
Şekil 4.16. Bir dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait SEM-EDX görüntüleri.....	66
Şekil 4.17. Bir dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait MAP görüntüleri	67
Şekil 4.18. EZ43A alaşımının iki dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a)500x b)1kx c) 2kx d)4kx	68
Şekil 4.19. EZ43B alaşımının iki dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a)500kx b) 1kx c) 2kx d)4kx	69
Şekil 4.20. İki dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait SEM-EDX görüntüleri.....	69
Şekil 4.21. İki dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait MAP görüntüleri	70
Şekil 4.22. EZ43A alaşımının SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (2kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (2kx) c) İki dövme işlemi sonrası (2kx).....	71
Şekil 4.23. EZ43B Alaşımının SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (2kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (2kx) c) İki dövme işlemi sonrası (2kx).....	71
Şekil 4.24. EZ43A alaşımının MAP Görüntüleri (a) Ekstrüzyon işlemi sonrası (b) Bir dövme işlemi sonrası (c) İki dövme işlemi sonrası	72
Şekil 4.25. EZ43B alaşımının MAP görüntüleri (a) Ekstrüzyon işlemi sonrası (b) Bir dövme işlemi sonrası (c) İki dövme işlemi sonrası	73
Şekil 4.26. Çekme deney numunesi	75

Şekil 4.27. Ekstrüzyon işlemi uygulanmış olan EZ43 alaşımının (a) kuru ortam ve (b) Korozi ortam aşınma deney sonuçları	77
Şekil 4.28. İncelenen alaşımların aşınma hızlarının değişimi.....	78
Şekil 4.29. Ekstrüzyon işlemi sonrası aşınma testi uygulanan EZ43A alaşımlarının kuru ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro b) 500x c) 1kx	80
Şekil 4.30. Ekstrüzyon işlemi sonrası aşınma testi uygulanan EZ43B alaşımlarının kuru ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro b) 500x c) 1 kx	81
Şekil 4.31. Ekstrüzyon işlemi sonrası aşınma testi uygulanan EZ43A alaşımlarının Korozi ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro b)200x c) 500 x d) 1 kx.....	81
Şekil 4.32. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımlarının korozi ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro b) 200x c) 500x d) 1 kx	82
Şekil 4.33. (a) EZ43A ve (b) EZ43B alaşımlarının kuru ortam aşınmış yüzeylerinin element haritalama analizi görüntüsü (1kx).....	82
Şekil 4.34. Bir kere dövme işlemi sonrası kuru ortam (Adhezi) aşınma grafiği	83
Şekil 4.35. Bir kere dövme işlemi sonrası korozi aşınma grafiği	84
Şekil 4.36. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının Adhezi aşınma testi sonrası SEM görüntüsü (a) Makro görüntü (b) 200x (c)500x (d) 1kx (e) 2kx... 86	
Şekil 4.37. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının Adhezi aşınma testi sonrası SEM görüntüsü (a) Makro görüntüsü, (b)200x (c) 500x (c) 1kx (e) 2kx	87
Şekil 4.38. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının korozi aşınma testi sonrası SEM görüntüsü (a) Makro görüntüsü, (b)200x (c) 500x (d) 1kx (e) 2kx.....	88
Şekil 4.39. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının korozi aşınma testi sonrası SEM görüntüsü a) Makro b) 200x c) 500x d) 1kx e) 2kx.....	89
Şekil 4.40. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının Adhezi aşınma testi sonrası SEM görüntüsü a) Makro b) 200x c) 500x d) 1kx e) 2 kx.....	90
Şekil 4.41. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının korozi aşınma testi sonrası SEM görüntüsü a) Makro b) 200x c) 500x d) 1kx e) 2kx.....	91
Şekil 4.42. EZ43A alaşımının Adhezi aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx) c) İki dövme işlemi sonrası (1kx).....	92
Şekil 4.43. EZ43B alaşımının Adhezi aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx)	92
Şekil 4.44. EZ43A alaşımının korozi aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx) c) İki dövme işlemi sonrası (1kx).....	93
Şekil 4.45. EZ43B alaşımının korozi aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx)	93

Şekil 4.46. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının bir ve iki dövme sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği	94
Şekil 4.47. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının bir ve iki dövme sonrası korozif aşınma grafiği	94
Şekil 4.48. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon ve bir ile iki dövme işlemi sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği	95
Şekil 4.49. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon ve bir ile iki dövme işlemi sonrası korozif ortam aşınma grafiği.....	95
Şekil 4.50. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /ağırlık kaybı).....	97
Şekil 4.51. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /korozyon uğrama oranı).....	97
Şekil 4.52. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A alaşımına uygulanan daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a) 100x, b) 500x c) 1kx d) 3kx.....	98
Şekil 4.53. EZ43A alaşımının Ekstrüzyon işlemi sonrası daldırma korozyon EDX analizi (1kx)	98
Şekil 4.54. EZ43A alaşımının Ekstrüzyon sonrası daldırma korozyon testi MAP görüntüsü.....	99
Şekil 4.55. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımına uygulanan daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x b)500x c)1kx d) 3kx.....	100
Şekil 4.56. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımı daldırma korozyon EDX analizi (1kx).....	100
Şekil 4.57. Ekstrüzyon sonrası EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi MAP görüntüsü.....	101
Şekil 4.58. Bir dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /ağırlık kaybı).....	101
Şekil 4.59. Bir Dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /korozyon oranı).....	102
Şekil 4.60. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a) 100x b) 500x c)1kx d) 3kx.....	102
Şekil 4.61. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x b)500x c)1kx d)3kx.....	103
Şekil 4.62. İki kere dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /ağırlık kaybı).....	104
Şekil 4.63. İki Dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /Korozyon oranı).....	104
Şekil 4.64. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x b)500x c)1kx d)3kx.....	105

Şekil 4.65. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x b)500x c)1kx d)3kx.....	106
Şekil 4.66. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası EDX analizi (1kx)	106
Şekil 4.67. İki kere dövme işlemi uygulanmış olan EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası MAP görüntüsü (3kx)	107
Şekil 4.68. EZ43A alaşımının daldırma korozyon deneyi sonrası numunelerin SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (3kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (3kx) c) İki dövme işlemi sonrası (3kx).....	108
Şekil 4.69. EZ43B alaşımının daldırma korozyon deneyi sonrası numunelerin SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (3kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (3kx) c) İki dövme işlemi sonrası (3kx).....	108
Şekil 4.70. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon ve dövme işlemleri sonrası daldırma korozyon grafiği.....	109
Şekil 4.71. EZ43 alaşımlarının potansiyodinamik korozyon testi sonuçları.....	111
Şekil 4.72. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik grafiği	113
Şekil 4.73. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik grafiği	114
Şekil 4.74. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik korozyon grafiği...	115
Şekil 4.75. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik korozyon grafiği...	117
Şekil 4.76. Hidrojen Evolution testi sonrası beher düzenekte gözükten gaz çıkışı...	118
Şekil 4.77. Hidrojen evolution testi sonrası zamana karşı Hidrojen hacminin değişimi	118
Şekil 4.78. Hidrojen evolution testi sonrası EZ43A ve EZ43B için kararlı durum korozyon hızı karşılaştırılması.	119
Şekil 4.79. Hidrojen Evolution testi sonrası beher kabında kalan numunelerin görünümünün fotoğrafları. a) EZ43A b) EZ43B	120
Şekil 4.80. Ekstrüzyon işlemi yapılmış EZ43A alaşımının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği	120
Şekil 4.81. Ekstrüzyon işlemi yapılmış EZ43B alaşımının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği	121
Şekil 4.82. İki dövme işlemi sonrası EZ43A alaşımının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği.	122
Şekil 4.83. İki dövme sonrası EZ43B alaşımının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği.	122
Şekil 4.84. Elektrokimyasal empedans ölçümleri (EIS) sonrası oluşturulan Nyquist eğrileri	123

Şekil 4.85. Geno Toksite testi sonuçları A) EZ43A B)EZ43B C) Negatif Kontrol D) Pozitif Kontrol.....	125
---	-----



ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Magnezyumun özellikleri	11
Çizelge 2.2. ASTM'ye göre Mg alaşımlarına ait kodlama sistemi (Leil, 2009).	14
Çizelge 2.3. Yaygın olarak kullanılan Mg alaşımlarının özellikleri ve kullanım alanları (Subaşı, 2020)	14
Çizelge 2.4. Bazı Nadir Toprak oksit tozları (Şahiner vd., 2017).	17
Çizelge 2.5. Nadir Toprak Elementlerinin Özellikleri (Şahiner vd., 2017)	17
Çizelge 2.6. Mg-Nd alaşımlarının çekme özellikleri (Subaşı, 2020)	21
Çizelge 2.7. Mg-Gd ikili alaşımlarının ikincil proseslerden sonraki çekme özellikleri (Subaşı, 2020)	22
Çizelge 2.8. Mg-Ce ikili alaşımlarının çekme özellikleri (Mishra vd., 2008; Subaşı, 2020).	24
Çizelge 3.1. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının ağırlıkça element miktarları	35
Çizelge 4.1. EZ43A alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları	64
Çizelge 4.2. EZ43B alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.	64
Çizelge 4.3. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.	67
Çizelge 4.4. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.	67
Çizelge 4.5. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.	69
Çizelge 4.6. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.	70
Çizelge 4.7. EZ43 alaşımlarının sertlik testi sonuçları	74
Çizelge 4.8. EZ43 alaşımlarının akma-çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri	75

Sayfa

Çizelge 4.9. İncelenen alaşımların rölatif aşınma davranışlarının karşılaştırılması...	79
Çizelge 4.10. Şekil 4.53'te verilen EZ43A alaşımının EDX spektrum sonuçları.....	99
Çizelge 4.11. Şekil 4.56'da verilen EZ43B alaşımının EDX spektrum sonuçları....	100
Çizelge 4.12. Şekil 4.66'da verilen iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının EDX spektrum sonuçları.	106
Çizelge 4.13. Ekstrüzyon sonrası potansiyodinamik testi uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ecor ve Icor sonuçları	112
Çizelge 4.14. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin potansiyodinamik testi sonrası Ecor- Icor değerleri.....	112
Çizelge 4.15. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin potansiyodinamik testi sonrası Ecor- Icor değerleri.....	113
Çizelge 4.16. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının bir ve iki dövme sonrası Ecor/Icor değerleri.....	114
Çizelge 4.17. Sitotoksisite testi % canlılık sonuçları	126

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

$Cr_{eş}$	: krom eşdeğerliliği
$Ni_{eş}$	: nikel eşdeğerliliği
Ag	: gümüş
Al	: alüminyum
Ar	: argon
Au	: altın
Cu	: bakır
H_2	: hidrojen
He	: helyum
Mo	: molibden
Ni	: nikel
$erf(z)$	: hata işlevi
γ	: birim hacim ağırlığı
$\Gamma(x)$	: gama işlevi
θ	: kutupsal açı
σ	: normal gerilme
σ_C	: tek eksenli basınç dayanımı

KISALTMALAR

AISI : American Iron and Steel Institute (Amerika Demir ve Çelik Enstitüsü)

ASTM: American Society for Testing and Materials (Amerika Deneme ve Malzeme Topluluğu)

AWS : American Welding Society (Amerika Kaynak Topluluğu)

DIN : Deutch Industrie Normen (Alman Endüstri Normları)

EN : European Norm (Avrupa Normu)

IIW : International Institute of Welding (Uluslararası Kaynak Enstitüsü)

ITAB : Isı Tesiri Altında Kalan Bölge

TS : Türk Standardı

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Günümüz teknolojilerindeki gelişmeler ve her alanda değişik ihtiyaçların ortaya çıkmasıyla geleneksel olarak kullanılan malzemelere ilave olarak, mevcut kullanılan malzemelerden çok daha üstün özelliklere sahip yeni malzemeler geliştirme ihtiyacı her geçen gün giderek artmaktadır. Artan bu ihtiyaç doğrultusunda bilim insanları tarafından alaşım ve/veya kompozit şeklinde üretilen iki ve daha fazla malzemenin en iyi özelliklerinin alındığı ve hibrit malzeme olarakta nitelendirilen malzemeler geliştirilerek üretilmekte ve bu yönde çalışmalara devam edilmekte olup bu gelecekte de devam edecektir. Yapılan bu önemli çalışmalardan ve araştırmalardan biri de Magnezyum ve Magnezyum alaşımları üzerinedir. Magnezyum diğer konstrüktif metaller içerisinde 1,74 g/cm³ yoğunluk ile yoğunluk bakımından kıyaslandığında yoğunluğu en düşük element olup, hafifliğin ön planda olduğu çalışmalarda bu özelliğinden dolayı Magnezyum ve Magnezyum alaşımlarına giderek artan bir ilgi oluşmaktadır (Avedesian ve Baker, 1999; Friedrich ve Mordike, 2006).

Magnezyum alaşımlarına yönelik özellikle enerjide artan bir ilgi oluşmasının yanısıra Magnezyum alaşımlarının otomotiv, havacılık, uzay, konstrüksiyon, spor aletleri ve biyomalzemeler ile birlikte elektronik ve diğer tüketici ürünleri gibi geniş ve stratejik alanlarda da gitdikçe artan bir ilgi vardır (Kainer vd., 2003; Kiani vd., 2014).

Magnezyum ve alaşımlarında günümüzde Seryum (Ce), Lantan (La), Neodimyum (Nd), Toryum (Th), İtriyum (Y), Gadolonyum (Gd) ve Skandiyum (Sc) çok geniş yelpazede kullanım sağlayan nadir toprak elementleri (RE) olarak sayılmaktadır (Rokhlin, 2003).

Mg alaşımları döküm tekniği ile üretimi sağlanan ve Mg'ye ilave edilen alaşım elementlerinin dayanım ve sünekliği artırması ile ticari uygulamaların yanı sıra

uçakların motorlarında, helikopterlerin vites kutularında ve yüksek performans gerektiren araçlarda kullanılmasıyla mit verici bir malzeme olmuştur (Eliezer vd., 1998).

Ülkemizde son yıllarda havacılık ve uzay sanayiinin gelişimi için çok ciddi çalışmalar yürütülmekte ve bu alanda çok ciddi mesafeler alınmaktadır. Bu kapsamda Milli Savunma Bakanlığı destekli “Magnezyum Döküm Teknolojisi Geliştirilmesi” (MÜGE) adlı bir proje başlatılmış ve proje ile yerli hava araçlarının yüksek yorulma direncine sahip hafif dişli kutusu gövdesi çalışmaları da başlatılmıştır (<https://www.millisavunma.com/muge-projesi-magnezyum-dokum-teknolojisi/>, 2024). Bu MÜGE projesi kapsamı içerisinde ayrıca dökümü gerçekleştirilen alaşımların mekanik özelliklerinin optimizasyonu ısıl işlemlerle sağlanacağıda rapor edilmiştir.

Günümüz dünyasında başta çevrenin korunması ve başta enerji olmak üzere kaynakların daha verimli kullanılması için ilk başta otomotiv sanaii olmak üzere birçok firma zorunlu olarak yakıt tüketiminde kısıtlamalara gitmektedir. Bunun için dünya genelinde çok sayıda AR-GE alışmaları yürütülmektedir. Yapılan bu çalışmalar doğrultusunda sürtünmenin azaltılması, araçların daha hafif olmasının sağlanması, motor verimliliğinin artırılması gibi yeni yaklaşımlarla çalışılmaktadır. Bunlardan belki de en onemlisi olan araç ağırlığındaki 100 kg’lık bir azalma ile 100 km’de 0,5 litre bir yakıt tasarrufu sağlanmaktadır (Kazdal,1999; Dobrzanski vd., 2007). Araç ağırlığından 40 kg’lık bir azaltma, atmosfere verilen eksoz gazında da azalma sağlamaktadır (Dobrzanski vd., 2007).

AB lkeleri önümüzdeki yıllarda araçlarda kullanılan yakıt tüketiminde 100 km de 3 litre hedefine ulaşmak için kararlar almışlardır. Yakıt tüketimini azaltmak için, otomotiv sanayisinin hafif fakat aynı zamanda da güvenilir ve dayanıklı malzeme kullanması zorunludur. Bu doğrultuda özellikle otomobil üretiminde ağırlıktan azaltma firmaların en onemli amacı haline gelmiştir (Kazdal,1999). Otomotiv endüstrisindeki Mg kullanımındaki artış geçen 10 yıl içerisinde her yıl %15 olarak artarak gerçekleşmiştir. Bu artışın önümüzdeki 10 yıl içerisinde %12’lik oranla artmaya devam edeceği beklenmektedir (Barber, 2004; Luo, 2000).

Günümüzde malzeme seçiminde ağırlığın düşürülmesi kadar önemli olan bir noktada geri dönüşebilirliktir. Günümüzde geri dönüşüm dünya hammadde ve enerji kaynaklarının korunması için çok önemli bir faktör haline gelmiştir. Yine günümüzde konstrüksiyon malzemesi olarak kullanılan malzemeler içinde Magnezyum (Mg) en hafif olanı olup ağırlık olarak Alüminyum (Al)'dan %36, Demir (Fe) ve Çelikten %78 daha hafiftir (Gaines vd., 1996). AB ülkeleri otomobillerinde kullanılacak malzemelerin 2007 yılına kadar % 85, 2015 yılına kadar ise % 95 geri dönüşebilir malzemelerden üretilmesi için hedefler koymuştur. Japonya ise otomobillerde 2007 yılına kadar % 90, 2015 yılına kadar % 95 geri dönüşebilir malzeme kullanımını zorunlu hale getirilmiş olup bu günümüzde de artarak devam etmektedir. Mg'un bugün de Japon taşıtlarında kullanımı hızlı bir şekilde artarak devam etmektedir. Amerika Birleşik Devletleri'nde de otomobil üretiminde Mg kullanımı yine artarak devam etmektedir. Bu çalışmalar Alman otomobilleri için de geçerlidir (Kazdal,1999). Magnezyum buharlaşma özellikleri ve yoğunluğu bakımından plastiklere benzetilirken aynı zamanda bir metalin mekanik özelliklerine de sahiptir. Magnezyum, mühendislik plastiklerine göre çok daha rijit ve çok daha geri dönüşümü mümkün olan bir malzemedir (Kazdal,1999; Barber, 2004; Gaines vd.,1996).

Mg ve Mg alaşımları, iyi süneklilik dayanımı, düşük yoğunluk ve iyi bir korozyon direncine sahip demir dışı metaldir. Fakat hegzagonal sıkı paket (HSP) kristal yapısının olmasından kaynaklı ergitme sırasında yanma ve şekillenebilirlik gibi alanlarda yaşattığı döküm problemleri sebebiyle üzerinde henüz Alüminyum kadar çalışmalar yapılmamıştır. Ancak daha önce de belirttiğimiz yakıt tasarrufu ve çevre gibi konular son 20 yılda daha çok gündeme geldiğinden Mg kullanımı üzerinde daha fazla yoğunlaşma ve çalışma göze çarpmaktadır. Mg ile ilgili farklı döküm yöntemleri kullanılarak veya alaşımlandırma yapılarak göreceli olarak şekillenebilirlik geliştirilebilmektedir (Polmear, 1989).

Uzay ve uçak ile otomotiv endüstrilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda Mg metali düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları açısından en hafif yapısal metal olarak ön plana çıkmaktadır. Mg alaşımlarına olan en büyük ilgi günümüzde otomotiv sektöründen gelmektedir. Bunun en önemli nedeni, hafif Mg alaşımlarının kullanımı sonucu otomotivlerin ağırlığında oluşan azalmanın kullanıcıya yakıt tasarrufu

sağlaması ve ayrıca gaz emisyonlarında da azalmalara neden olacak olmasıdır. Otomotivlerde hafif metalik malzemelere rağbet sadece günümüz otomobilleri ile ilgili olmayıp, elektrik ve güneş enerjisi ile hidrojen enerjisi gibi alternatif enerji kaynaklarının aktif olarak kullanılacağı öngörülen geleceğin otomobillerinde hafiflik şimdiye kıyasla çok daha önemlidir. Gelişmiş ülkelerde önümüzdeki yıllarda binek otomobillerde ulaşılması planlanan yakıt tüketimi 100 km de 3 litre gibi zorlu bir hedef olup bunun gerçekleşmesi için otomobil ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalma sağlanması gerekmektedir (Friedrich ve Schumann, 2001).

Magnezyum (Mg) alaşımları mekanik özelliklerinin iyi olması sebebiyle endüstriyel yapı malzemesi olarak ve otomotiv endüstrisinde kullanımı açısından ilk sıralarda yer alırken, yoğunluğunun düşük olması özelliğinden dolayı ise havacılık ve elektronik endüstrisinde de kendisine geniş yer bulmuştur. Dünyanın gelişmiş ülkeleri son dönemlerde insansız savaş uçakları üzerinde çalışmalarını arttırmış ve ülkemiz de Silahlı insansız ve İnsansız Hava aracı alanında çok ciddi mesafeler almıştır. Bu teknolojinin ana amaçlarından biri de hava da çok daha uzun süre kalarak görevini başarı ile ifa eden araçlar üretebilmektir. Bunun içinde daha esnek, daha dayanıklı, daha hafif ve aynı zamanda daha ucuz malzemelerin üretilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Yine günümüz teknolojisinde küresel ısınmayı azaltabilmek için yenilenebilir kaynakların kullanımı, özellikle de hidrojen yakıt pilleri üzerinde önemli çalışmalar yapılmakta ama gelinen nokta itibari ile bu çalışmalar yetersiz kalmaktadır. Yapılan çalışmaların çoğu otomobil ağırlığını azaltmak ve dolayısıyla yakıt kullanımını azaltma yönündedir. Yüksek mukavemetli, yüksek şekil verilebilirlik, yüksek tokluk özelliklerine sahip ve ucuz malzemelerin otomotiv sektöründe kullanılması sonucu daha düşük ağırlıklı otomobil elde edilmesi üzerinde önemle durulması gereken çözümlerden biri olmalıdır.

Bunun yanı sıra Mg-RE alaşımları dokuların İyileşmesine yardım eden ve hiçbir implant kalıntısı kalmamasını sağlayan biyoçözünür implant malzemesi olarak da biyomedikal uygulamalarda önemli düzeyde kullanılmaktadır (Hort, 2010).

Nadir toprak elementlerinin (RE) yüksek ısı dayanımı ile sürünme direncini artırdığı ve ayrıca döküm porozitesini azalttığı yapılan araştırmalar sonucunda bilinmektedir

(Barber, 2004; Zhang, 2000). Toprak alkali elementler Mg alaşımlarında dökülebilirliği iyileştirirler ve ayrıca mikroporoziteyi azaltırlar. RE elementleri oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda katı eriyik ve çökeltme sertleşmesi yaparlar. Bu elementler, malzemenin dayanım özelliklerini iyileştirirler ve yükselen sıcaklıklarda alaşımların iyi sürünme dirençleri sayesinde kararlı çökeltileri matriste ve tane sınırlarında dağılır. Sodyum (Na), Potasyum (K), Lityum (Li) gibi RE elementleri alaşımın korozyon özelliklerini de iyileştirir (Polmear, 1989; Zhang, 2000; Barber, 2004). Toprak alkali elementlerin Mg'nin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinde önemli bir rol oynadığı görölmektedir. Mg içerisinde RE elementlerinin katı çözünürlüğü yüksek olmasının yanı sıra düşük sıcaklık koşullarında çözünürlüğü düşer ve yükselen düzeylerde aşırı derece doyma göröölür. Bununla beraber çökeltme sertleşmesinde serpinik sertleşme ile çökelen fazın termal dengesinin yüksek olmasının yanında α -Mg'de bulunan RE elementlerinin yayınma hızında düşüş meydana gelir. Böylece Mg- RE sıcaklığın artış gösterdiği koşullara dirençli ve kusursuz bir sürünme dayanımına sahip olur (Sanling vd., 2012).

Yine, maliyetin az olmasının yanı sıra yüksek dayanım sağlaması nedeniyle Mg-inko (Zn) dizisi endüstride çokça rağbet görür. Kalsiyum ergime durumunda alaşımda oksitlenmeyi engeller ve kalsiyum ihtiva eden magnezyum alaşımları hakkında incelenmiş olan bir takım çalışmalarda etkili bir tane inceltici olan kalsiyumun alaşımın sürünme dayanımını iyileştirdiği görölmüştür (Zhang ve Yang, 2008a; Rokhlin vd., 2009).

Nadir toprak elementlerinin alaşıma eklenmesi, yer değiştirmeyi zorlaştıran kararlı fazların serbest bırakılmasıyla yüksek sıcaklık sürünme direncini de arttırır. Ek olarak, magnezyum alaşımı eriyiği endüstriyel üretim sürecinde son derece yanıcı ve patlayıcı olabilir. Döküm dezavantajlarını ortadan kaldıran, aynı zamanda yeni ve ümit verici olan alternatif bir teknoloji, EZ33A magnezyum alaşımlarına uygulanan yarı katı metal işleme olup önemli ölçüde farklı mikro yapı elde etmek için kullanılabilir. Magnezyuma RE ilavesi, küresel mikro yapı oluşumunda Mg'nin heterojen çekirdeklenmesiyle pozitif bir etkiye sahiptir. Çinko ise çözelti ile sertleştirme ve çökeltme yoluyla alaşımın güçlendirilmesinde aktif olarak yer alır (Rogal vd., 2019).

Günümüzde de Mg alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek için çeşitli yöntemler araştırılmaktadır. Bunlar arasında, nadir toprak ilavesi ve ultra ince tane ile alaşımlama en yenilikçi olanlarıdır. Nadir toprak katkılı Mg alaşımları, 400 MPa çekme mukavemeti ve %3-9 süneklik ile üstün bir mekanik özellikler dengesi sergiler (Miura vd., 2012).

Mağnezyum alaşımları ayrıca akma, çarpma ve çekme dayanımlarındaki ciddi mekanik özellikleri sebebiyle daha fazla ilgi odağı oluşturmaktadır. EZ33 Magnezyum alaşımı ile ilgili literatürde az miktarda da olsa araştırma ve bilgi bulunurken Doktora konumuz olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarının geliştirilmesi ve çok yönlü dövme yöntemleri ve bu yöntem sonrası alaşımda ki incelemeler konusunda literatür de çalışma olmayıp ilk olarak bizim bu çalışmamız olmaktadır. EZ43A; %3 Zn, %2 Nd, %1 Ce, %1 Gd, %0.5 Zr, %0.5 Ca kimyasal bileşime sahip EZ43B ise; %3 Zn, %1 Nd, %2 Ce, %1 Gd, %0.5 Zr, %0.5 Ca kimyasal bileşime sahip olan alaşımlardır. EZ43A ve EZ43B Mg alaşımlarında ultra ince taneler üretmek için Mg alaşımlarına ciddi plastik deformasyon yöntemleri uygulanmıştır. Ultra ince taneler, oda sıcaklığında mukavemet ve süneklikte büyük gelişmeler sağlar. Azalan sıcaklık koşulları altında çok yönlü dövme ile üretilen bir ultra ince tane AZ31 Mg alaşımının, oda sıcaklığında 530 MPa nihai çekme mukavemeti ve sıcaklıkta yaklaşık %15 süneklik ile üstün bir mukavemet ve süneklik dengesine sahip olduğu rapor edilmiştir (Xing vd., 2005).

Bir başka çalışmada, Miura ve arkadaşları (Miura vd., 2011) çok yönlü dövme ile üretilen AZ61 Mg alaşımında 550 MPa çekme mukavemeti ve %10 süneklik elde etmiştir. Bununla birlikte, çok yönlü dövme ile üretilen Mg alaşımları, 300-420 MPa arasında nispeten düşük akma gerilimleri sergiler. Bunun nedeni muhtemelen yüksek sıcaklıklarda çok yönlü dövme işlemi sırasında geri kazanımdır (Miura vd., 2012).

Alemdağ ve arkadaşları yaptıkları bir çalışmada çok yönlü sıcak dövme işlemi alaşımın iç yapısında bulunan silisyum parçacıklarının ufalanmasına ve dendritik yapının ortadan kalkmasına yol açtığını bulmuş ve çok yönlü dövme işleminin alaşımın süneklik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği, alaşımın sürtünme katsayısını ve aşınma kaybını artırdığını rapor etmişlerdir (Alemdağ vd., 2021). Alaşımlarda ultra

ince tane oluşumunu sağlayan aşırı plastik deformasyon yöntemleri eş kanallı açısallı presleme, birikimli hadde bağı, yüksek basınç altında burma ve çok yönlü dövme gibi işlemlerden oluşmaktadır (Cherukuri vd., 2005; Cao vd., 2018). Bunlardan bir ve üçüncüsünün kalıp ve takım maliyetlerinin yüksek olması, karmaşık geometriye sahip parçalar için uygun olmaması ve parça boyutlarının sınırlı olması gibi nedenlerden dolayı endüstriyel kullanımları sınırlıdır (Cherukuri vd., 2005; Sabirov vd., 2013). Çok yönlü dövme yöntemi nispeten ince taneli malzemelerin endüstriyel kullanım boyutlarında üretilmesine olanak sağlamıştır (Cherukuri vd., 2005; Suresh vd., 2019). Bu yöntem Titanyum, Magnezyum, Nikel ve Alüminyum gibi alaşımlara başarıyla uygulanmış, deformasyon ve sıcaklığın tane incilmesi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Suresh vd., 2009; Zhu vd., 2017; Wei vd., 2020). Süper ince taneli metalik malzemeler, iyi süneklik ve tokluk ile birlikte yüksek mukavemet sergiledikleri için, araştırmacıların ilgisini çekmektedir. Son zamanlarda süper ince taneli metalik malzemeleri üretmek için kullanılan yöntemlerden biri olarak çok yönlü dövme yöntemi çalışılmaktadır.

Nadir toprak elementlerinin (RE) yüksek ısı dayanımını ve sürünme direncini artırdığı ve döküm porozitesini azalttığı araştırmalar sonucunda bilinmektedir (Barber, 2004; Zhang, 2000). Nadir toprak elementleri dökülebilirliği iyileştirir ve daha öncede belirttiğimiz gibi Mg alaşımlarında mikroporoziteyi azaltır, normal sıcaklıklar ve yüksek sıcaklıklarda alaşımda katı eriyik ve çökeltme sertleşmesi yaparlar. RE ler, Mg alaşımlarının dayanım özelliklerini iyileştirir ve yükselen sıcaklıklarda sürünme dirençleri sayesinde kararlı çökeltileri matriste ve tane sınırlarında dağılır.

Birinci Dünya savaşında özellikle uçakların yapı malzemesi olarak kullanılan ve ikinci Dünya savaşında cazibesini devam ettiren Mg alaşımları düşük yoğunlukları, yüksek özgül dayanımları ve iyi dökülebilirlikleri nedeniyle otomotivlerde hafif uygulamaları için giderek daha fazla kullanılmaktadır (Luo, 2005). Magnezyum ekstrüzyonları, özellikle içi boş profiller, gösterge paneli kirişindeki potansiyel uygulamalar ile koltuk çerçevesi, tavan çerçevesi, tampon kirişi, radyatör desteği, motor beşiği ve alt çerçeve gibi otomotivleri hafifletirmede kullanılabilecek cazip kütle tasarruf fırsatları sunar (Luo, 2005; Luo vd., 2010). Otomotiv ve uzay-uçak sanayilerindeki ağırlık tasarrufuna yönelik arayışlarda Mg metali düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları

açısından en hafif yapısal metal olarak ön plana çıkar ve bundan dolayı da günümüzde Mg alaşımlarına olan en büyük ilgi otomotiv sektöründen gelmektedir (Friedrich ve Schumann, 2001). Örneğin tipik bir otomotivde %10 oranında bir ağırlık düşüşü, tasarımda önemli bir değişiklik olmadan %20-30 oranında yakıt tasarrufu sağlar (Kainer ve Buch, 2003). Magnezyum alaşımları üstün hafiflik avantajı dolayısıyla otomotivin yanı sıra havacılık sanayiinde ve elektronik ürünlerin üretiminde çelik, alüminyum alaşımları ve mühendislik plastiklerinin yerine giderek artan bir öneme sahip olmaya başlamıştır (Zhang vd., 2011). Mg alaşımları, son zamanlarda artan CO2 emisyonu, azalan enerji verimliliği, hafifliği ve özel mukavemeti nedeniyle hep gündem de kalmaktadır. Başta otomotiv sektörü ve havacılık uygulamalarında kullanılan Mg alaşımları günlük hayatımızın vazgeçilmezi olan cep telefonu, dizüstü bilgisayar gibi cihazların kasalarında dahi kullanılmaktadır. Son yıllarda düşük sıcaklıklarda iyi şekil alma kabiliyeti, iyi mekanik özellikleri sağlama, Mg alaşımlarının üretilmesi için alaşımlandırma yöntemi geniş çalışma alanı yaratmıştır. Nadir toprak elementleri olarak bilinen Seryum, Gadolinyum, İttriyum ve Neodinyum gibi elementlerin saf Mg'da tekstür zayıflatıcı etkisi belirlenmiş ve daha kolay şekil alması sağlanmıştır (Kara, 2019).

Son yıllarda mühendislik malzemelerinin yetersiz olan özelliklerini geliştirmek için her zaman kullanılan geleneksel yöntemlerden ayrı olarak yenilikçi yöntemler üzerine de yoğun çalışmalar yapılmaktadır. Bu doğrultuda yürütülen çalışmaların en başında geleni, kristal yapıli malzemelerin tane boyutunu mikron altı mertebelere kadar indirerek malzemelerin temel mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi çalışmalarıdır. Mikron altı tane boyutuna sahip tane boyutu 1-1000 nm malzemelerin üstün mekanik özellikler sergilediğinin anlaşılması ile bu çalışmalar önemli araştırma konuları arasında yerini almıştır (Lowe ve Zhu, 2003). Ultra ince taneli parçalar üreterek Üstün mekanik özellikleri elde etmeyi amaçlayan bu yöntemlerin en önemlileri; aşırı plastik deformasyon (APD), mekanik alaşımlama, buhar fazından çöktürme ve elektro-kaplamadır (Meyers vd., 2006). Bunlar arasında yer alan Aşırı Plastik Deformasyon yöntemleri son yıllarda önemi her geçen gün artan ve üzerinde yoğun çalışmaların yürütüldüğü bir alan haline gelmiştir (Valiev vd. 2000; Valiev vd., 2006). Günümüzde uygulanan APD yöntemlerinin başında; ekstrüzyon işlemi olmak üzere, birikimli bağ

haddesi, yüksek basınç altında burma, kapalı kalıpta tekrarlı dövme ve tekrarlı bükme-doğrultma gelmektedir (Azushima vd., 2008).

EZ43 Magnezyum alaşımlarının mekanik ve biyouyumluluk davranışlarına Neodinyum ve Seryum alaşım elementleri ile çok yönlü dövme işleminin etkilerinin incelenmesi başlıklı bu Doktora çalışmamızda, alaşımlara tatbik edilebilen, çok yönlü dövme yöntemi prosesi ve uygulaması, üniversite-sanayi iş birliği sonucu, geliştirilmesi ve Türkiye’de yaygınlaştırılması amaçlanmıştır. Bizim bu çalışmamızda uyguladığımız yöntemle üretilen süper ince taneli demir dışı Magnezyum alaşımları yöntemi ülkemizde ve dünyada çok yenidir. Çalışmalar neticesinde elde edilen bulguların yüksek spesifik mukavemet (mukavemet/yoğunluk) ve yüksek yorulma, korozyon, süneklik vb. gerektiren tasarımlar için cazip olabileceği kanısındayız. Özellikle otomotiv ve havacılık sektörlerinde ihtiyaç duyulan hafif malzeme gereksinimi, çok yönlü dövme tekniği ile üretilcek malzemelere olan ilgiyi her geçen gün arttıracaktır. Bu sebeple önerilen bu çalışma EZ43A ve EZ43B Mg esaslı malzemelerin ilk defa üretimi ve Ekstrüzyon işlemi ile çok yönlü dövme yöntemleri sonrası mekanik ve korozyon özelliklerinin incelenmesini kapsamaktadır.

Doktora çalışmamızda uygulanan yöntem; ergiyik bazlı indüksiyon karıştırma ile alaşımlama ve döküm işlemi, homojenleştirme ısıl işlemi, ekstrüzyon, metalografik, mekanik, korozyon, aşınma ve çok yönlü dövme (Multi-Directional Forging) aşamalarından oluşmaktadır. Çalışma kapsamında EZ43A ve EZ43B alaşımlarının döküm yöntemiyle üretimi sağlandı; ardından homojenleştirme ısıl işlemi, ekstrüzyon işlemi uygulandı ve alınan numunelere çekme, sertlik, mikroyapı (XRD, SEM, OPTİK), Hank sıvısı içinde sabit daldırma, elektrokimyasal potansiyodinamik polarizasyon, Empedans ve Hidrojen evolution testleri ile korozyon, kuru, korozif aşınma testlerine ve çok yönlü dövme tekniği işlemlerine tabi tutuldular. Çok Yönlü dövme işleminden sonra yukarıda belirttiğimiz testlerin birçoğu bu sefer çok yönlü dövmeye maruz kalmış numunelere uygulandı.

Yine doktora çalışmamız kapsamında Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Biyo uyumluluk kapsamında Geno Toksisite ve Sito Toksisite testleri yapılmıştır. Testlerde Genetik yapıyı bozup bozmadıklarına ve bakterileri

öldürüp öldürmediklerine bakılmıştır. Geno Toksitite testleri sonrasında her iki alaşımında Genetik yapıyı bozmadıkları izlenmiştir. Sito toksitite testlerinde ise EZ43A alaşımının bakteri sayısında %142 den fazla artış sağladığı ve EZ43B alaşımının ise bakteri sayısında %116 artış sağladığı izlenmiştir. Standartlara göre %70 den fazla olursa malzeme Biyouyumlu olduğundan her iki alaşımda biyouyumlu alaşım olduğu görülmüştür.



BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

2.1. MAGNEZYUM

Magnezyum (Mg), magnezit ($MgCO_3$), karnolit ($K_2MgCl_4 \cdot 6H_2O$) ve dolomit $MgCa(CO_3)_2$ cevherlerinden, doğal yeraltı ve yapay tuzlu sular ile deniz suyundan ve tuz depozitlerinden üretilir. Mg üretimi ergimiş Magnezyum klorürün ($MgCl_2$) indirgenme prensibine göre elektrolizi, dolomitten kimyasal yollarla çökeltme ve arıtma yöntemleri ile veya doğrudan tuzlu sulardan Magnezyum oksitin (MgO) termal redüksiyonu ile üretimi yapılmaktadır (Büyükgenç, 2011).

Mg'un üretildiği başka bir metot ise MgO 'ın Silisyum (Si) ile redüksiyonudur. Bu işlemde Ferrosilis katı halde MgO ile reaksiyona girer ve yüksek sıcaklık, düşük basınç koşullarında Magnezyum gaz hale geçer, reaktörün soğutucularında Mg kristalleri yoğunlaşırlar. Bu kristaller ergitilip, ingotlar halinde dökülür (Büyükgenç, 2011). Magnezyumun özellikleri Çizelge 2.1.'de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Magnezyumun özellikleri

Simgesi	: Mg
Atom numarası	: 12
Atom ağırlığı	: 24.312 g/mol
Kaynama noktası	: 1107 °C
Ergime noktası	: 650 °C
Yoğunluğu	: 1.74 g/cm ³
Kristal yapısı	: hekzagonal
Atom yarıçapı	: 1.60 °A (12 koordinasyon sayılı metalik durumda)
İyon yarıçapı	: 0.65 °A (6 koordinasyon sayılı kristaldeki)

Atom hacmi	: 14.0 (atom ağırlığı/yoğunluk)
Isı iletkenliği	: 0.38 cal/cm ² , s.cm.°C (oda sıcaklığında)
Elektrik iletkenliği	: 0.224 mikroohm ⁻¹ (0° ile 20 °C arasında)
Erime ısısı	: 2.14 kcal/atomgram
Kaynama ısısı	: 32.517 kcal/atomgram
Asit-Baz özelliği	: baz

Magnezyum elementi ilk olarak İskoçyalı bilim insanı Joseph Black tarafından 1755 yılında keşfedilmiştir. Fakat Joseph Black Mg elementini saf haline ayırtıramamıştır. Mg elementinin Saf haline ayırtırma işlemi ise ilk olarak 1808 yılında Magnezyumun kâşifi olarak nitelendirilen İngiliz bilim insanı Kimyager Sir Humphrey Davy tarafından yapılmıştır. Ayırtırma işleminde Sir Humphrey Davy elektrolizi kullanmıştır. Bundan yaklaşık 25 yıl sonra, Fransız bilim insanı Antoine Alexandre Brutun Bussy magnezyumu ayırtırmak için başka bir yöntem bulmuştur ve bu yöntem de yüksek sıcaklıklarda potasyumlu dihidrat magnezyum eritilerek işlem tesis etmiştir. 1833 yılında ise İngiliz bilim insanı Sir Humphrey Davy'in asistanı olan Micheal Faraday tarafından redüklenmiş magnezyum klorür dihidratı, elektroliz yapılarak saf metalik magnezyumun elde edilmesi gerçekleştirilmiştir (Türe, 2016; Friedrich ve Mordike, 2006).

Mg alaşımları, a -Mg matriksi içerisinde intermetalik partiküllerin dağılımından oluşan çok fazlı malzemelerdir. Alaşımların bu çok fazlı yapısı temel olarak dengesiz katılaşma durumundan kaynaklanır ve bu durum malzemelere mukavemet kazandırır. En yaygın kullanılan Magnezyum alaşımları Alüminyum içeren gruba aittir ve AZ91, AM60, AM50 ve AZ31 alaşımlarını kapsar (Kainer,2003; Blawert vd., 2004; Subaşı, 2020).

Magnezyum, 1,74 gr/cm³'lük yoğunluğu ile yapısal uygulamalarda kullanılan ve kullanılabilecek olan en hafif metal malzeme olup yerkabuğunun %2,7'sinde ve okyanusların % 0,13'ünde bulunur. Mg, periyodik tabloda IIA grubunda yer alan toprak alkali bir elementtir ve Magnezyum iyi dökülebilirlik, iyi işlenebilirlik, düşük yoğunluk ile dünyada en çok bulunan altıncı metal olma özellikleriyle çok sayıda

mühendislik uygulamalarında kendisine yer bulmuştur. Magnezyum ve alaşımlarının, iyi titreşim ve şok emme kabiliyetlerinin yanı sıra yüksek elektrik iletkenlikleri vardır. Mg, toksik tehlike vermez ve birçok yöntemle şekillendirilerek işlenebilir (Friedrich ve Schumann, 2001; Monteiro vd., 2012; Koç, 2013).

2.2. MAGNEZYUM ALAŞIMLARI

Saf magnezyum 37 HB olan düşük sertliğinden ve akma, çekme gibi mekanik özelliklerinin yeterli olmayışından ve sınırlı işlenebilirliği, düşük mukavemeti nedeniyle genellikle yapısal uygulamalarda kullanılamaz (Kammer, 2010; Luo vd., 2010; Subaşı, 2020). Magnezyumun yapısal uygulamalarda kullanılabilmesi için beklenen mukavemet ve sünekliği sergilemesi gerekmektedir ve bunun içinde bir çok çalışma yapılmaktadır. Mg 'nin sünekliği tane inceltme ile arttırılabilir. Mukavemet; katı çözelti sertleşmesi, çökelti sertleşmesi, deformasyon sertleşmesi ve tane boyutu sertleşmesi gibi iyi bilinen sertleştirme mekanizmalarının bir kombinasyonu ile iyileştirilebilir. Bu iyileştirmeler ise birtakım alaşım elementlerinin ilavesi ile gerçekleştirilebilir. Alaşım elementlerinin doğru seçimi ile ihtiyaçları karşılayabilecek alaşımlar üretilir. Mg' ye eklenen alaşım ilaveleri, ergiyiğin dökülebilirliğini ve korozyon performansını da etkiler. Mg içerisinde en yaygın kullanılan alaşım elementleri Alüminyum, Çinko, Zirkonyum, Mangan ve bunun yanında Nadir toprak elementleridir (Subaşı, 2020).

Alaşım yapımı Hume-Rothery kurallarına uygun olarak iki veya daha çok metalin bir pota içinde eritilerek birbiri içerisinde karışması ile gerçekleşir (Bhadeshia, 2007). Tüm metallerin alaşımlanmasında olduğu gibi, uygun elementlerle oluşturulacak alaşımlarla magnezyumun kullanılacağı uygulamaya bağlı olarak Magnezyum elementinde de istenilen özelliklere ulaşılmaya yönelik yoğun çalışmalar bulunmaktadır. Özellikle Son 30 yıldır magnezyumda da diğer metallerin, ametallerin ve nadir toprak elementlerinin değişik katkı oranlarında denendiği gibi yoğun bir alaşımlama çabası vardır (Türe, 2016).

Magnezyum alaşımlarını standartlara bağlamak ve tanımlamak için 2004 yılında Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu (ASTM) tarafından geliştirilen bir kodlama

sistemi (B275) bulunmakta olup hemen hemen tüm dünya da bu kodlama sistemi kullanılmaktadır. Bu kodlama sisteminde ilk iki harf alaşımanın içeriğindeki ana alaşım elementlerini ve bunlardan sonra gelen iki rakam ise bu elementlerin alaşımdaki yüzdelerinin tam sayıya yuvarlanmış halini göstermektedir. Bunlardan sonra da alaşımda geliştirilme sırasını ve/veya saflık derecesini temsil eden A, B, C, D ve E harflerinden oluşan bir harf simgesi bulunur. Çizelge 2.2’de Mg-alaşım elementlerini simgeleyen harfler gösterilmiş olup Çizelge 2.3’ de de yaygın olarak kullanılan Mg alaşımlarının özellikleri ve kullanım alanları verilmiştir (Subaşı, 2020).

Çizelge 2.2. ASTM’ye göre Mg alaşımlarına ait kodlama sistemi (Leil, 2009).

Simge	Element	Simge	Element	Simge	Element
A	Aluminyum	K	Zirkonyum	R	Krom
B	Bizmut	L	Lityum	S	Silisyum
C	Bakır	M	Mangan	T	Kalay
D	Kadmiyum	N	Nikel	W	İtiryum
E	Nadir T.Elm.	P	Kurşun	Z	Çinko
H	Toryum	Q	Gümüş		

Çizelge 2.3. Yaygın olarak kullanılan Mg alaşımlarının özellikleri ve kullanım alanları (Subaşı, 2020)

Alaşım	Ana alaşım elementleri	Özellikler	Uygulamalar
AZ31	Al, Zn, Mn	Orta seviyede mukavemet, Kaynaklanabilirlik ve iyi şekillendirilebilirlik	Uçak gövdesi, cep telefonları ve laptoplar
AZ91	Al, Zn, Mn	Mükemmel dökülebilirlik, oda sıcaklığında iyi mekanik özellikler ve iyi korozyon dayanımı	Kapı ayna desteği, valf ve eksantrik kapakları
AM50	Al, Mn	Yüksek uzama ve enerji sönümleme, iyi dökülebilirlik özellikleri ve yüksek mekanik mukavemet	Direksiyon simitleri ve koltuklar
AM60	Al, Mn	Yüksek uzama ve enerji sönümleme, iyi dökülebilirlik özellikleri ile yüksek mekanik mukavemet	Vantilatörler, direksiyon simitleri, emme manifoldları
ZE41	Zn, Nd	İyi mukavemet değerleri, iyi dökülebilirlik	Balistik silahlar, uçak parçaları

QE22	Ag, Nd	Kaynaklanabilirlik, yüksek zorlama gerilmesi	Havacılık uygulamaları
ZK60	Zn, Zr	İyi mukavemet ve süneklik	Savunma sanayi, çadır direkleri ve spor ekipmanları
WE43	Y, RE, Zr	İyi dökülebilirlik, yüksek ısı dayanımı, yüksek sürünme dayanımı, yaşlanabilirlik, iyi yorulma dayanımı ve iyi korozyon dayanımı	Helikopter transmisyon parçaları, yarış otomobilleri ve biyomalzeme uygulamaları

Magnezyum alaşımları genel olarak döküm ve dövme alaşımlar şeklinde gruplandırılabilir. Ticari olarak kullanılan ilk alaşım elementleri ise Al, Mg, Zn olup günümüzde en geniş kullanım alanlarına sahip olan Mg-Al-Zn döküm alaşımlarını oluşturmaktadır. İlk üretilen dövme alaşım ise Mg-%1,5Mn alaşımı ise levha, ekstrüzyon ve dövme mamulleri şeklindedir (Zhang ve Couture, 1998; Zhang, 2005; Koç, 2013).

Magnezyum alaşımları özellikle son dönemlerde ileri düzeyde tercih edilmekte olup bunun temel sebebi ise bu alaşımların diğer metal malzemelere göre oldukça hafif olmalarıdır. Birinci ve ikinci Dünya Savaşı yıllarında Mg alaşımlarının kullanımı artmaya başlamış ancak büyük çaplı üretimleri gerçekleştirilemediği için çok fazla ilerleme olamamıştır. Ancak ilerleyen zamanlarda alaşımlara yönelik artan yeni talepler bu durumu değiştirmiştir. Magnezyum alaşımlarının kullanımındaki en önemli sorun ise oda sıcaklığındaki şekillendirilebilme kabiliyetinin oldukça düşük ve maliyetinin yüksek olmasıdır. Ancak son yıllarda havacılık, uzay, elektronik ve otomotiv sanayinde Mg alaşımlarının diğer metallere göre oldukça hafif olmasından dolayı ana malzeme olarak kullanımında ciddi bir artış görülmektedir. Günümüzde bu yeni talep önceki trendi değiştirmiş ve Magnezyum üreticisi sayısı artmıştır. Mg alaşımlarına olan talebin artması ise bu alaşımların daha ekonomik olarak üretilmesini ortaya çıkarmaktadır.

2.3. ALAŞIM ELEMENTLERİ

Magnezyumun mevcut özelliklerini iyileştirmek ve geliştirmek için iki veya daha fazla elementin ergitme yöntemi ile Magnezyumun içine katılıp ergitilmesiyle Mg alaşımı üretilir. Mg alaşımı üretimi için en çok kullanılan alaşım elementleri Alüminyum (Al), Çinko (Zn), Mangan (Mn), Zirkonyum (Zr), Kalsiyum (Ca), Kalay (Sn), Stronsiyum (Sr) ve Nadir toprak elementlerinden İtiryum (Y), Neodimyum (Nd), Gadalyonyum (Gd), Lantanyum (La) ile Seryum (Ce) dur.

2.3.1. Nadir Toprak (Re) Elementleri

Nadir toprak elementlerini (RE) janyo devleti araştırmacıları teknolojinin tohumu ve anası olarak adlandırmaktadırlar. Amarıka da ise bu element teknolojik metal olarak adlandırılmaktadır. Periyodik tabloda on yedi adet kimyasal element olarak yer almakta olan RE elementlerinin on beş tanesi lantanit grubu olup ayrıca skandiyum ve itiryumdur. Skandiyum ve itiryum aynı cevherleşme içerisinde, aynı kimyasal özelliğe sahip lantanitler içerisinde türemiş olup yer kabuğunda bulunabilen element olmasına rağmen daha sonraları nadir toprak element olarak kabul edilmiştir. RE elementlerinin dünyamızı daha yüksek bir teknolojiye taşıması mümkün olabileceği öngörülmektedir. RE elementlerinin çok az miktar kullanımı dahi, kullanıldığı ürünün kalitesini önemli ölçüde artırmaktadır. Yüksek teknoloji ürünlerinde de oransal olarak az kullanılmasına rağmen birim performansa etkisi kritik düzeydedir. Günümüzde tüm insanlığın kullandığı bir cep telefonunda sekiz adet RE elementi kullanılmaktadır. Renkli ekranlarda, mikrofonde, cep telefonu devreleri ve ünitelerinin küçük ve fonksiyonel olmasında çok önemli bir yer almaktadır. Dünya ekonomi pazarında RE elementlerine en büyük ilgi ve talep Çin halk cumhuriyetinden ve dolayısı ile Çin ekonomisinden gelmektedir. Yaşam koşullarındaki değişmelerle birlikte nadir toprak elementlerine olan talep, gelişmelere bağlı olarak artabilecektir (Şahiner vd., 2017). Bazı nadir Toprak oksit tozlarının görselleri Çizelge 2.4' de verilmiştir.

Çizelge 2.4. Bazı nadir toprak oksit tozları (Şahiner vd., 2017)

Nadir Toprak Elementleri	Basnazit	Skandiyum
		

Çizelge 2.5. Nadir Toprak Elementlerinin Özellikleri (Şahiner vd., 2017)

Sembol	İsim	Kullanım alanları	Atom No	Atom Ağırlığı	Formül	Yoğunlu ğu gr/cm ³	Ergime Noktası °C
~~Sc~~	Skandiyum	Havacılık bileşenleri ~~Mercury~~ -buhar lambaları	21	44,96	~~Sc~~ 2O3	3.0	1541
Y	İtriyum	Lazerler, mikrodalga filtreleri	39	88,91	Y2O3	6.9	1522
La	Lantan	Kamera lensleri, pil elektrotları	57	138,91	La2O3	6.1	918
Ce	Seryum	Petrol rafineleri için akışkan katalitik çatlama katalizörü	58	140,12	~~Sc~~ 2O3	6.8 ~~Ca~~ O2	789
Pr	~~Prasedminum~~	Miknatıslar, lazerler, karbon ark aydınlatma	59	140,91	Pr6O11	6.8	931
Nd	~~Neodimyum~~	Miknatıslar, lazerler, seramik ~~kapasitörler~~	60	144,24	Nd2O3	7.1	1021
Pm	Prometyum	Nükleer piller	61	147	Yok	7.3	1042
~~Sm~~	Samaryum	Miknatıslar, lazerler, nötron yakalama,	62	150,35	~~Sm~~ 2O3	7.5	1074
~~Eu~~	Evropiyum	Fosfor, lazerler, NMR rahatlatma üniteleri	63	152	~~Eu~~ 2O3	5.3	822
Gd	Gadolinyum	Bilgisayar hafızaları, muknatıslar, lazerler	64	157,25	Gd2O3	7.9	1313
~~Th~~	Terbiyum	Fosfor, lazerler, floresan lambalar	65	158,92	~~Tb~~ 4O7	8.2	1356
Dy	Disprosyum	Miknatıslar, lazerler	66	162,50	Dy2O3	8.5	1412
~~Ho~~	Holmiyum	Lazerler	67	164,93	~~Ho~~ 2O3	8.8	1474
Er	Erbiyum	Lazerler, vanadyum çelik	68	167,26	Er2O3	9.1	1529
~~Tm~~	Tulyum	Portatif X-ray makina	69	168,93	~~Tm~~ 2O3	9.3	1545
~~Yb~~	İterbiyum	Kızılötesi lazer, kimyasal indirgenler	70	173,04	~~Yb~~ 2O3	6.9	819
Lu	Lütesyum	PET tarama ~~dedektörleri~~ yüksek kırılma endeksli camlar	71	174,47	Lu2O3	9.8	1663

Katkı maddesi olarak Nadir Toprak Elementleri içeren malzemeler yüksek sıcaklıklara ve ayrıca korozyon ortamlara dayanıklı, kararlı ve hafif malzemelerdir. Bu özellikleriyle RE elementleri günümüzde insanlığın ihtiyaç duyduğu ve sıkça kullandığı bilgisayarlar, cep telefonları, LCD televizyon ekranları, lep toplar, rüzgâr türbinleri, tıbbi görüntüleme cihazları, hibrid araçlar, şarj edilebilir piller, radar sistemleri, katalitik çeviriciler, uçak motorları, korozyona daha dayanıklı alaşımlar, tıp ve sağlık alanı, seramik ve cam üretiminde, petrol arıtmada ve daha bir çok alanda kullanılmaktadır. RE elementleri dünyamızda çokça bulunmakta olup, Çin Halk Cumhuriyeti RE rezervlerinin yaklaşık % 36,52 sine Rusya Devleti % 19,27 sine ABD'de yaklaşık % 13,19'una Avustralya % 5,48 ve Hindistan % 3,14'üne sahiptir. Ülkemiz de ise Eskişehir ilinin Sivrihisar ve Kızılcaören bölgesi başta olmak üzere, Manisa ilinin Turgutlu ilçesi Malatya ilinin Darende ilçesi ve Samsun ilinin Bafra ilçelerinde çalışmalar tüm hızıyla devam etmektedir (Şahiner vd., 2017).

Nadir Toprak Elementleri Magnezyum alaşımlarında şekillendirilebilirliği ve sünekliği ve iyileştirmekle birlikte aynı zamanda etkili bir mukavemet kazandırıcı özelliği bulunmaktadır. Bunun sebebi olarakta genellikle katı çözelti sertleşmesi oluşması ve çökelti sertleştirme mekanizmasıyla bunun gerçekleştiği düşünülmektedir (Gao vd., 2009a). Ayrıca, RE ilavesi sonucu meydana gelen bu sert ötektik fazlar Mg alaşımlarının mukavemetinin artmasına yardım eder (Chia vd., 2009). Yaygın olarak kullanılan birçok alaşım elementi arasından RE elementlerinin ilavesi Mg'nin deforme edilebilirliğini iyileştirmesi açısından önemli sonuçlar vermiştir (Huang vd. 2014). Mg-RE esaslı alaşımlar otomotiv endüstrisinde döküm veya dövme koşullarında süper hafif metal alaşımları olarak kullanım alanı bulurlar (Hirsch, J. ve Al-Samman, 2013). Bunun yanı sıra Mg-RE alaşımları dokuların iyileşmesine yardım eden ve hiçbir implant kalıntısı kalmamasını sağlayan biyoçözünür implant malzemesi olarak da biyomedikal uygulamalarda önemli düzeyde kullanılmaktadır (Hort, 2010). Bu havacılık, otomotiv ve biyomedikal vb. malzemelerin uygulamalarına hizmet etmek için Mg-RE alaşımları minimum düzeyde alaşım kompozisyonlarıyla ve basit proseslerle ekonomik olarak üretilmelidir. Mg-RE faz diyagramları incelendiğinde ana alaşım elementi olarak RE elementinin kullanıldığında her bir RE elementinin farklı davranış sergilediği görülmektedir (Rokhlin, 2006). Mg alaşımlarının özellikle çekme dayanımı, korozyon karşı dayanma direnci ve yine sürtünme direnci gibi mekanik

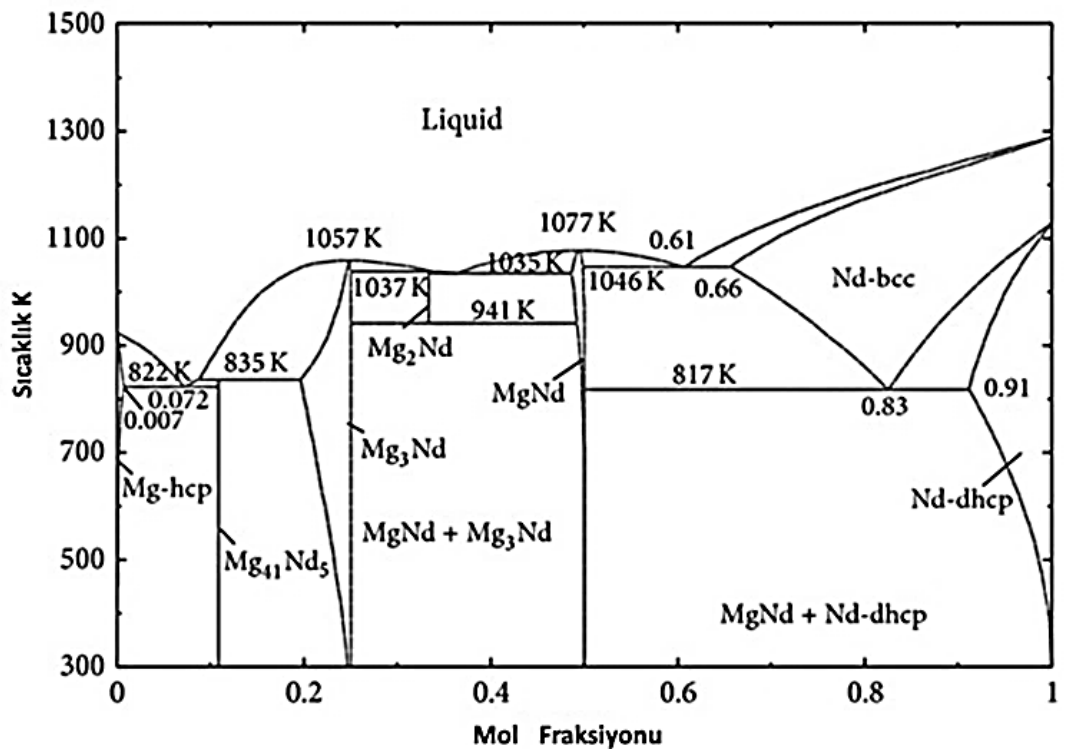
özelliklerinin geliştirilmesi ve iyileştirilmesi için kullanılan RE elementleri hayatımızda son derece önemli bir yer tutmaktadır. Bu kullanılan nadir elementlerden bir tanesi de doktora çalışmamızda kullandığımız Neodinyum (Nd)' dur. Mg alaşımında Neodinyum 'un yer alması çözeltide kararlı Partiküller elde etmemizi sağlar. Gümüş (Ag) ise Mg alaşımının mukavemetinin artırılması için kullanılmakta olup özellikle aşırı sıcak ortamlar olan uzay teknolojisinde sıklıkla kullanılmaktadır. Nadir Toprak Elementlerinin içerisinde en sık kullanılan magnezyum alaşımları ise Mg-Zn-RE-Zr (ZE, EZ), Mg-Ag-RE-Zr (QE), Mg-Y-RE-Zr (WE), Mg-Al-RE (AE) dir (Karaer, 2019).

Nadir toprak elementleri içeren magnezyum bazlı alaşımlar düşük yoğunluğu ve yüksek mukavemet özellikleriyle ön plana çıktıkları için önemli yapısal malzemelerdir. Bu durum ise RE elementli Mg alaşımlarını özellikle uçak ve uzay aracı yapımında ve yapıların düşük ağırlığının kritik olduğu durumlarda endüstri için özellikle çekici kılmaktadır (books.google.com.tr, 2024). Nadir toprak elementleri, alaşımların yüksek sıcaklık dayanımı ve ayrıca sürünme direnci üzerinde önemli etkilere sahip olup Magnezyumun korozyon direncini geliştirir. Mg'ye RE'lerin eklenmesi, yüksek sıcaklık dayanımı ve sürünme direnci üzerinde önemli etkilere sahiptir (Kokubo vd., 2006) ve Magnezyum 'un korozyon direncini artırır (Ding vd., 2014). Mühendislik uygulamaları için, RE' ler genellikle Ce, La ve Nd bakımından zengin çeşitli bileşimlerin mischmetal'i olarak eklenir; ancak bu mischmetal, kaynağına bağlı olarak bileşiminde değişiklik gösterebilir (Elmar vd., 2015) Doktora Çalışmasında kullanılan Nadir Toprak Elementlerinin özelliklerine ve katkılarına aşağıda daha detaylı bakabiliriz.

2.3.1.1. Neodinyum (Nd)

Nadir toprak elementlerinden olan Neodinyum, Mg içerisinde en yüksek katı çözünürlüğe ve 552 °C ile en düşük ötektik sıcaklığa sahip olan bir elementtir. Nd'nin Mg'ye ilave edildiğinde yaşlandırma sertleşmesine ileri düzeyde katkıda bulunduğu rapor edilmiştir (Chia vd., 2009). Mg-Nd alaşımlarının mikroyapısı dentritik -Mg ve ayrılmış Mg₁₂Nd ötektiğinden oluşmaktadır. Artan Nd ile beraber mukavemetteki iyileşmede artmaktadır. Bu durum ise katı çözelti sertleşmesine ve çökelti

sertleşmesine bağlanmaktadır (Yan vd., 2008). Mg-Nd alaşımlarının düşük uzama oranları ile birlikte düşük akma mukavemeti ve düşük seviyelerdeki korozif bozulmalarının bu alaşımları emilebilir stent uygulamaları için ümit verici ve geleneksel WE43 alaşımları ile kıyaslanabilir kıldığı rapor edilmiştir (Seitz vd., 2012). Ayrıca Nd elementinin Mg’da çözünürlüğü yüksektir ve yaşlanma kabiliyetini geliştirir. Mg_3Nd ikincil fazı çok serttir ve La’ ya göre daha iyi dayanım sağlar (Tekumalla vd., 2014; Kara, 2019). Şekil 2.1’de Mg-Nd faz diyagramı görülmektedir. Çizelge 2.6’ da ise Mg-Nd alaşımlarının çekme özellikleri verilmiştir.



Şekil 2.1. Mg-Nd faz diyagramı (Tekumalla vd., 2014)

Çizelge 2.6. Mg-Nd alaşımlarının çekme özellikleri (Subaşı, 2020)

Alaşım (ağ.%)	Akma mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%)	Proses koşulları
Mg- 0,47Nd	81	189	9.5	Yüksek basınçlı döküm
Mg- 0,76Nd	85	-	6.75	Yüksek basınçlı döküm
Mg- 1,25Nd	92	-	4.8	Yüksek basınçlı döküm
Mg- 2,60Nd	115	-	4.1	Yüksek basınçlı döküm
Mg- 3,53Nd	130	140	2.5	Yüksek basınçlı döküm
Mg- 1,2Nd	95	123	4.61	Döküm
Mg- 1,85Nd	121.2	155.8	2.76	Döküm
Mg- 3,59Nd	141.2	153.6	1.08	Döküm
Mg- 2Nd	77	193	30	Döküm+380°C'de ekstrüzyon
Mg- 2Nd	1123	240	26	Döküm+380°C'de ekstrüzyon+204°C'de 16 saat ısıtım işlemi
Mg- 2Nd	102	242	27.5	Döküm+380°C'de ekstrüzyon+204°C'de 48 saat ısıtım işlemi
Mg- 2Nd	125	220	15	Döküm+380°C'de ekstrüzyon+510°C 3 saat çözeltiye alma+204°C'de 16 saat yaşlandırma
Mg- 2Nd	70	230	18.5	Döküm+380°C'de ekstrüzyon+510°C 3 saat çözeltiye alma+204°C'de 48 saat yaşlandırma

2.3.1.2. Gadolinyum (Gd)

Nadir toprak elementlerinden olan Gadolinyum, Mg içerisinde ötektik sıcaklıkta ağırlıkça %23,49 çözünürlüğe sahip olup (Nayeb-Hashemi, 1998) bu sebeple de Mg ile alaşımlandırıldığında katı çözelti sertleşmesine katkıda bulunur (Hort vd., 2010).

Gd'nin Mg içinde etkili bir katı çözelti sertleştirici olduğu rapor edilmiştir (Gao vd., 2009a). Ağırlıkça %4,5'a kadar Gd içeren Mg-Gd alaşımlarında mikroyapı-tekstür-mekanik özellik ilişkisini araştıran Stanford vd. yaptıkları bu çalışmada ağırlıkça %1'e kadar Gd ilavesinin Yeniden kristalleşme yapısını önemli derecede zayıflattığını rapor

ederek Gd'nin daha fazla ilavesi ile yapının büyük ölçüde değişmeden kaldığını belirtmişlerdir (Stanford vd., 2010). Yine benzer şekilde, mukavemet değerleri de çizelge 2.7' de gözüktüğü gibi ağırlıkça %1Gd ilavesine kadar artmış ve daha sonraki ilavelerde değişmeden kalmıştır. Stanford ve Barnett yaptıkları bir çalışmada yeniden kristalleşme tavlamasından sonra çözünmüş Gd'nin alaşımdaki dislokasyon hareketini kitlediğini ve matriks sertleşmesine neden olduğunu rapor ederek ortaya çıkan böyle bir mekanizmanın Mg-Gd alaşımlarının sünekliğini etkilemediği sonucuna varmışlardır. Yine ilgili çalışmayı yapan aynı yazarlar Mg'ye Gd ilavesinin tekstürü zayıflattığını ve RE tekstür bileşenleri oluşturarak, ekstrüzyon yönündeki uzamayı arttırdığını ifade etmişlerdir (Stanford vd., 2008a). Ayrıca Mg-1,55 Gd alaşımının 450 °C de ekstrüze edildiğinde 510 °C'ye kıyasla daha yüksek süneklik sergilediği, bunun nedeninin ise yüksek ekstrüzyon sıcaklıklarında RE tekstür bileşeninin oluşumunun baskılanması olduğu belirtilmiştir. Mg-1%Gd için 350°C ile 450°C arasındaki tavlamaların ardından çekme uzamalarının %4,8'den %30'lara çıktığı da rapor edilmiştir (Subaşı, 2020). Literatürdeki Mg-Gd alaşımlarının özellikleri Çizelge 2.7'de verilmiştir.

Çizelge 2.7. Mg-Gd ikili alaşımlarının ikincil proseslerden sonraki çekme özellikleri (Subaşı, 2020)

Alaşım (ağ. %)	Akma mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%)	Proses koşulları
Mg- 0,22Gd	120	190	6	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş ve 380°C'de 1 saat tavllanmış
Mg- 0,75Gd	145	210	12	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş ve 380°C'de 1 saat tavllanmış
Mg- 2,75Gd	160	205	21	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş ve 380°C'de 1 saat tavllanmış
Mg- 4,65Gd	165	210	26	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş ve 380°C'de 1 saat tavllanmış
Mg- 1Gd	138,2 ± 1,7	173,3 ± 4	4.8	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş
Mg- 1Gd	129,3 ± 4,9	191,2 ± 5,9	3.4	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş 250°C'de 1 saat tavllanmış+ Su verilmiş
Mg- 1Gd	124,5 ± 1,4	225 ± 2,6	4.2	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş 300°C'de 1 saat tavllanmış+ Su verilmiş

Mg- 1Gd	111 ± 4,8	240 ± 22	29.7	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş 350°C'de 1 saat tavlınmış+ Su verilmiş
Mg- 1Gd	71,3 ± 3,4	184,9 ± 2,5	29.6	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş 400°C'de 1 saat tavlınmış+ Su verilmiş
Mg- 1Gd	70,4 ± 2,4	220,6 ± 2,9	29.6	Döküm+ 400°C'de sıcak haddelenmiş 450°C'de 1 saat tavlınmış+ Su verilmiş
Mg- 1,55Gd	102	214	23.9	Döküm + 530°C'de 3 saat çözeltiye alma + 560°C'de 5 saat çözeltiye alma + 450°C'de ekstrüzyon
Mg- 1,55Gd	130	210	15.8	Döküm + 530°C'de 3 saat çözeltiye alma + 560°C'de 5 saat çözeltiye alma + 510°C'de ekstrüzyon

Gadolinyum ötektik sıcaklıkta Mg'da en fazla %23,49 (ağ.ol.) çözünmektedir ve böylece katı eriyik sertleşmesi sağlamaktadır (Kara, 2019).

2.3.1.3. Seryum (Ce)

Nadir Toprak Elementlerinden olan Seryum (Ce) oda sıcaklığında Mg içinde neredeyse ihmal edilebilir bir çözünürlüğe sahip olup ötektik oluşturu bir elementtir. Yapılan araştırma ve çalışmalar Ce'nin Mg içinde alaşım elementi olarak kullanılmasının yalnızca dispersiyon sertleştirmesine etkisinin bulunmadığı, aynı zamanda taneler arası ötektik sertleştirmesine de katkıda bulunduğunu göstermiştir (Zhang vd., 2014). Magnezyuma ağırlıkça %0,2 Seryum ilavesinin, Mg'nin çekme uzamasını %9,1 den %31'e yükselttiği rapor edilmiştir (Mishra vd. 2008) (Çizelge 2.8). Süneklikteki artış aynı zamanda %0,2 akma mukavemetindeki artışla beraber meydana gelmiş olup yapılan bu çalışmada, süneklik artışına, Ce ilavesine bağlı olarak tane boyutlarındaki azalma ile beraber çekme mukavemetindeki ufak bir artış da eşlik etmiştir (Luo vd. 2010). Mg' ye ağırlıkça %0,5 Ce ilavesinin ekstrüzyon sırasında daha fazla yüzey oksidasyonu ve süneklikte azalma ile birlikte mukavemette artış ile sonuçlandığı rapor edilmiştir. Mg-1%Ce alaşımı için 350 °C'deki tavlamadan sonra süneklikte %2,7'den %11,9'a önemli derecede bir artış gözlemlendiğine dair çalışma mevcuttur (Subaşı, 2020). Seryumun Mg' ye alaşım elementi olarak ilavesi durumunda Mg₁₂Ce intermetalığının oluştuğu ve mukavemetinin artması ile sünekliğin azalmasında, intermetalığın hacimsel oranındaki artışın etkisinin

intermetaliğin morfolojisinden daha çok etkiye sahip olduğu rapor edilmiştir (Chia vd., 2009; Subaşı,2020).

Çizelge 2.8. Mg-Ce ikili alaşımlarının çekme özellikleri (Mishra vd., 2008; Subaşı,2020)

Alaşım (ağ.%)	Akma mukavemeti (Mpa)	Çekme Mukavemeti (Mpa)	Uzama (%)	Proses koşulları
Mg- 0,2Ce	68.6	170	31	Döküm+ 400°C’de ekstrüzyon
Mg- 0,2Ce	110-135	200-220	14-16	Döküm+ 300°C’de ekstrüzyon + 400°C’de haddeleme
Mg- 0,2Ce	100	215	20.6	Döküm+ 400°C’de homojenizasyon+ 350°C’de ekstrüzyon
Mg- 0,5Ce	130	230	8	Döküm+ 400°C’de homojenizasyon+ 350°C’de ekstrüzyon
Mg- 0,4Ce	140	160	20	Döküm
Mg- 0,4Ce	90	120	29	Döküm+ 520°C’de 1 saat tavlama+ Suda soğutma

Seryum Magnezyum alaşımlarının korozyon direncini, plastik deformasyon kabiliyetini ve deformasyon sertleşmesi oranını artırarak sürünme davranışında iyileşme sağlarken akma mukavemetini ise düşürür (Yang vd., 2009; Mingbo vd., 2012; Islam vd., 2014). Yapılan bir çalışmada Ce, alaşımda yoğun olarak tane içerisinde ziyade tane sınırlarında gözlemlenmiştir. Bunun nedeni olarak Magnezyumun içerisinde bulunan Ce’nin yüzey aktif element olması ve pozitif absorpsiyon etkisinin olması gösterilmektedir. Belirtilen bu etkiler doğrultusunda Magnezyum alaşımının yüzey enerjisi düşmüş olup bu düşüş aynı zamanda çekirdeklenme enerjisinde de düşmeye sebebiyet vermiş ve çekirdeklenme oranında da artışa neden olmuştur (Kai-Yang vd., 2010). Seryum içeren Mg-3Ce-1,2Mn-1Zn alaşımına Çinko (Zn) veya Stronsiyum (Sr) eklenmesinin Mg₁₂Ce fazının morfolojisine ile alaşım içerisindeki dağılımına herhangi bir olumlu veya olumsuz etkisinin olmadığı, Zr ve Sr içeren alaşımların yapısında içermeyenlere oranla daha fazla miktarda kalıntı Mg₁₂Ce fazı gözlemlendiği ve bunun ötektik Mg₁₂Ce fazının stabilitesini pozitif yönde etkileyerek yüksek sıcaklıkta alaşımın sürünme davranışında olumlu bir etki yarattığı rapor edilmiştir (Yang vd., 2012).

Yapılan bir çalışmada Seryum ve Lantan'ın Mg-6Zn-3Cu Magnezyum alaşımı üzerine etkileri incelenmiştir. Yapılan bu çalışma da lantanca zengin olan alaşıma göre Seryumca zengin olan alaşımın tane yapısını iyileştirdiği ve tane sınırlarındaki ötektik faz miktarını artırarak termal olarak daha kararlı MgRE ve Mg12RE bileşimleri oluşturduğu rapor edilmiş ve Sr açısından zengin alaşımın daha yüksek sürünme direnci gösterdiği ve kayma mukavemetinde de düşüşe sebebiyet verdiği belirtilmiştir (Golmakaniyoon ve Mahmudi, 2011; Türe, 2016) Yapılan bir başka çalışmada ise Seryumca zengin ZC63 Mg alaşımının üzerindeki Ce'nin etkileri izlenerek kütlece %1 eklenen Ce'nin alaşımın yüksek sıcaklık mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirdiği rapor edilmiştir. Bu durumun gerçekleşmesinin temel sebebi olarak termal açıdan istikrarlı olan Mg12RE ve MgRE bileşiklerinin belirgin ölçüde tane sınırı hareketlerini engellemesi görülmüştür (Junvd., 2005; Birbilis vd., 2010) Bu belirtilen özelliğinden dolayı seryum özellikle sürünme dayanımı gerektiren uygulamalarda kullanılacak Magnezyum alaşımlarında tercih sebebi olmaktadır (Türe, 2016). Yine yapılan bir başka çalışmada ise Seryum içeren ME21 alaşımında Seryumun oluşturduğu Mg12Ce partikülleri vasıtasıyla yeniden kristalleşme üzerine olumlu etkileri olduğu gözlenerek oda sıcaklığında ekstrüzyon ile üretilen alaşımın sünekliğini geliştirdiği ve aynı zamanda %30 çekme uzamasını ve %20 de basma uzamasını arttırdığı görülmüştür. Yine ortaya çıkan tane küçülmesi ise işlenebilirlik açısından alaşımı olumlu yönde etkilemiş ve tane boyutunun küçülmesiyle akma mukavemeti üst seviyelere taşınmıştır (Barnett vd., 2004; Huppmann vd., 2010).

Alüminyum içeren AM60 serisi alaşıma seryum eklenmesiyle beta fazında azalma olmuş ve bu faz yerini gama fazına bırakmıştır. Optimum seviye olarak 0,82% ve 0,59% belirlenmiş ve bu oranlarda eklenen Seryum elementinin alaşım yapısındaki β fazı oranını ciddi şekilde düşürdüğü gözlemlenmiş ve β fazının yerine geçen Y- fazının şeklinin ise ince iğnemsî bir yapıda olduğu belirtilmiştir. Korozyon davranışı açısından ise AM-RE, AM60 a göre çok daha iyi sonuçlar vermiş olup bunun nedeni olarakta β fazı oranının düşerek yerini Y- fazına bırakması ve meydana gelen Al, RE oksit veya hidroksit yapının alaşım bünyesinde koruma sağladığı gösterilmiştir (Liu vd., 2009). Literatürdeki yapılan bir diğer çalışmada, Magnezyum-Mangan ikili alaşımına Seryum eklenmesi oluşan yeni alaşımın Seryum katkısının alaşımın yeniden kristallenme kinetiğini değiştirdiği ve Seryumun katı çözelti veya tanecik formunda yapıya farklı

tane oryantasyonu sağladığı belirtilmiştir (Bohlen vd., 2010). Bir başka çalışmada ise, Mg-3Sn-2Ca alaşımlarının üzerine az miktarda Seryum eklemenin mikro yapıya ve alaşımların sürünme özelliklerine olan etkileri tartışılmıştır. Yapılan bu çalışma da alaşıma 0.5% Ce ilavesi yapılmış ve Seryum eklenmesinden sonra yapılan XRD' ye göre bünyedeki iki ana faz olan CaMgSn ve Mg₂Ca aynı şekilde kaldığı, yeni bir fazın doğmadığı rapor edilerek ilave edilen Seryum sayesinde sürünme değerinin de arttığı belirtilmiştir (Ming-bo vd., 2009).

2.3.2. Mg-RE Çoklu Alaşım Sistemleri

Magnezyum alaşımlarında RE elementleri alaşımların yüksek sıcaklık özelliklerini iyileştiren ve ortaya çıkan alaşımların işlenebilirliğini iyileştiren önemli bir etmen olarak bilinmektedir. RE elementleri Magnezyum matrisi ile bir araya gelerek kararlı intermetalik çökelti partikülleri oluştururlar (Golmakaniyoon ve Mahmudi, 2011). Magnezyuma RE elementleri ilavesi sonrası oluşan intermetaliklerin alaşıma mukavemet artırıcı etkileri bakımından ve yüksek sıcaklıklarda tane büyümesi ile difüzyonu yavaşlatarak sürünmeyi yavaşlatıcı etkileri ve katkıları vardır. Literatürde yapılan birçok çalışma göstermiştir ki nadir toprak elementlerinden olan Seryum' un alaşıma katılması Magnezyum alaşımlarında tane boyutlarının iyileşmesine katkıda bulunduğu yönündedir. Ce, tane sınırlarında oluşan Mg₁₂Ce tane büyümesini engelleyerek tanelerin daha küçük kalmasını sağlamaktadır. Tane boyutlarındaki bu iyileşme ise alaşımların mekanik özelliklerini pozitif yönde etkilemektedir. Seryum' un bu olumlu etkilerinin yanında bazen kaba intermetalikler oluşması durumunda alaşımların üzerinde negatif etkileri de vardır. Tane sınırlarında oluşan bu kaba Mg₁₂Ce fazı tane büyümesinin önüne geçer ve oluşan bu kaba faz bir takım ısıtıl işlemlerden sonra bile etkisini sürdürmekte ve boyutlarına bağlı olarak çatlak oluşumu ile kopmalara sebebiyet verebilmektedir (Sirong vd., 2010; Fei vd., 2011).

RE elementlerinin Magnezyum alaşımlarının mekanik özelliklerini artırdığı literatürde bahsedilmiş olup bunun yanında alaşımların korozyon direncini de arttırdığı yapılan çalışmalarda gösterilmiştir. Bu elementlerin korozyon direncine etkisi literatürde aynı zamanda "scavenger effect" olarak adlandırılmakta olup bu durum alaşımlar içerisindeki kirlilik olarak belirtilen korozyona sebebiyet veren demir gibi elementlerin toprak

alkali metaller ile metaller arası bileşik oluşturarak zararsız hale getirmesiyle olmaktadır. Toprak alkali elementlerin bu zararlı elementleri tespit edip zararsız hale getirerek katodik aktiviteyi düşürme durumunu ilk olarak Mercer ve Hill bulmuşlardır (Mercer ve Hill, 1992). Nadir toprak elementlerinin korozyona olumlu etkisinin diğer bir nedeni ise yüzeyde oluşturduğu ince koruyucu oksit tabakadır. Nadir toprak elementi ilaveli magnezyum alaşımlarının ekstrüzyon uygulamasından sonra ortaya çıkan tekstür yapısındaki zayıflama ve tanelerin daha ronom bir hal alması ile ilgili ilk çalışmayı Ball ve Pragnel yapmışlar ve sonrasında alaşım yapısında çok düşük oranda bile nadir toprak elementleri konsantrasyonu olsa dahi tekstür davranışı üzerinde olumlu etkileri olduğunu rapor etmişlerdir (Ball ve Prangnell, 1994; Türe, 2016). Literatürde Mg-RE ikili alaşımlarının yanısıra, bu alaşımların mekanik ve korozyon özelliklerini geliştirmek için Mg içerisinde çoklu RE kombinasyonlarının diğer elementler ile beraber katılarak alaşımlandırılmalar da yapılabildiği belirtilmektedir (Mabuchi vd., 2002). Mg-4Y-3,2RE alaşımının oda sıcaklığında özelliklerini inceleyip yaşlandırmanın alaşım mukavemetini önemli derecede arttırdığını rapor etmişlerdir. Ayrıca Zhang, X. vd. ekstrüze işlemine tabi tutulmuş biyomalzeme olan WE43'ün alaşımının özelliklerini incelemiştir (Zhang vd., 2012). Sonuç olarak bilim insanları Nadir toprak elementi ilavesi ile ilgili yaptıkları çalışmalar sonucunda Nadir toprak elementlerinin Mg alaşımlarında tane inceltmesi, deformasyon sertleşmesi ve çökelti sertleşmesinin etkileriyle birlikte mukavemette ve süneklikte artış gözlemlemişlerdir (Subaşı, 2020).

2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ PLASTİK ŞEKİLLENDİRME YÖNTEMLERİ

Malzeme biliminin ve mühendislik uygulamalarının sürekli gelişmesi yeni malzemelere ihtiyacı ortaya koymaktadır. Bunun içinde yeni alaşımlar geliştirilirken alaşımların özelliklerini geliştirici birçok işlem de alaşımlara uygulanmaktadır. Malzemelerin performansını arttırmak için alaşımlama çalışmalarının yanında malzemelere çok yönlü dövme, Ekstrüzyon, haddeleme gibi plastik deformasyon işlemleri uygulanmaktadır. Şimdiye kadar yapılan araştırmalar, işlenmiş magnezyum alaşımlarının sünekliğini geliştirmede en umut verici yaklaşımların doku modifikasyonu ve tane inceltme olduğunu gösteriyor (Lowe ve Zhu, 2003; Luo vd.,

2010). Bu kapsamda yapılan çalışmalardan belki de en önemlisi, kristal yapılı malzemelerin tane boyutlarını mikron altına indirerek üretilen malzemelerin temel mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi olmuştur. Mikron altında tane boyutuna sahip malzemelerin (tane boyutu 1-1000 nm) üstün mekanik özellikler sergilediğinin anlaşılması ile bu çalışmalar önemli araştırma konuları arasında yerini almıştır (Lowe ve Zhu, 2003). Malzemelerde üstün özellikler elde etmeyi amaçlayan bu yöntemlerin en önemlileri; aşırı plastik deformasyon (APD), mekanik alaşımlama, buhar fazından çöktürme ve elektro-kaplamadır (Meyers vd. 2006). Malzemelerde üstün özellik elde etmeyi amaçlayan yöntemlerden olan aşırı plastik deformasyon yöntemleri son yıllarda her geçen gün önemi artan ve üzerinde yoğun çalışmaların yürütüldüğü bir alan haline gelmiştir (Valiev vd., 2000; Valiev vd.,2006). Günümüzde uygulanan APD yöntemlerinin başında; ekstrüzyon, yüksek basınç altında burma, kapalı kalıpta tekrarlı dövme, birikimli bağ haddesi ve tekrarlı bükme-doğrultma işlemleri gösterilebilir (Azushima vd., 2008; Kul, 2009).

2.4.1. Eşit Kanallı Açısal Presleme (EKAP)

Teknolojinin hızla gelişmesi yeni imalat yöntemlerini de beraberinde getirmiş olup bu yeni imalat ve üretim yöntemleri ile de kolay işlenebilen, sert fakat hafif malzemelerin üretilmesi mümkün olmuştur. Eşit kanallı açısal presleme (EKAP) yöntemi bu yöntemlerden biri olup EKAP yöntemi ile malzemelerin mukavemet ve süneklik değerlerinin artırıldığı bir yöntem olarak kullanılmaktadır. Aşırı Plastik Deformasyon Yöntemleri (APD) ise kayma gerilmeleri nedeniyle tek pasoda bile çok yüksek plastik şekil değiştirme oranlarının elde edilebildiği metallerin biçimlendirme yöntemi olarak bilinmektedir. Bu yöntemde Paso sayısı arttıkça malzemenin şekil değiştirme oranı daha da artmaktadır. Aşırı plastik deformasyon yöntemleri, eşit kanal açısal presleme, çevrimsel ekstrüzyon- basma şeklinde sınıflanabilir ve uygulanan bu yöntem söz konusu yöntemler içinde en çok bilinen ve sıklıkla uygulanan bir yöntemdir. Son yıllarda ultra ince veya nano boyutlu malzemelere yönelik oluşan artan bir ilgi ile birlikte EKAP üzerinde araştırmalar da giderek artmıştır. Bilindiği gibi tane boyutundaki azalma malzemelerin mekanik özellikleri ve en önemlisi süper plastik şekil değiştirilebilirliği üzerinde olumlu bir etkiye sahiptir. EKAP uygulamalarının bu olumlu yanlarına istinaden dez avantajlı olarak görünen kısmı ise EKAP kalıplarındaki

çatlama ve kırılma riskidir. Bu durum kalıpların kullanımını sınırlandırmakta ve buna bağlı olarak farklı kalıp tasarımları geliştirilmesi gerekmektedir. Yüksek mukavemet ve sünekliği bir arada bulunduran malzemeleri geliştirmek için yoğun çaba sarf edilmekte olup yüksek mukavemet makine parçalarının boyutlarını küçültürken, yüksek süneklik ise malzemeye kolay işlenebilme ve ani oluşabilecek hasarlardan korunabilme gibi özellikler kazandırmaktadır (Büyükgenç, 2011; Türe, 2016). Bundan dolayı her iki özelliği de büyük oranda iyileştirebilme etkisine sahip olan APD çalışmaları araştırmacıların ve malzeme bilimcilerinin büyük bir hızla ilgisini çekmektedir (Shun vd., 2005; Sanusi, 2012; Kahrıman ve Akata, 2017).

APD işlemi Segal ve arkadaşları tarafından 1980'li yıllarda önerilmiş bir deformasyon yöntemi olup (Rosochowski, 2005), başlıca üstünlükleri arasında basit ve ekonomik oluşu, işlem sırasında malzemelerde herhangi bir ölçüsel değişimin oluşmaması, mühendislik uygulamalarında kullanılabilecek boyutta ve kütsel formda çok ince taneli içyapıların olduğu malzemelerin elde edilmesi sayılabilir. Tüm bu avantajlarının yanında gereken hidrostatik basıncın düşük olması ve buna bağlı olarak işlemin basit geometrilere sahip araçlar ile sürdürülebilmesi de diğer önemli avantajlarını teşkil etmektedir (Kim vd.,2001). 1980 li yıllarda Segal ve arkadaşları tarafından önerilen bu yöntem 1990'lı yıllardan sonra ultra-ince taneli malzemeler elde etmek için uygulanmaya başlanmış ve bu uygulamalardan başarılı sonuçlar alınmıştır (Valiev vd., 1991; Valiev, 1996). Bu özelliklerinden dolayı ilgili yöntem özellikle son yıllarda çok sayıda malzeme grubuna uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. EKAP işleminin uygulandığı malzemeler arasında saf alüminyum ve alüminyum alaşımları (Tsai vd., 2003; Mishin vd.,2003), titanyum ve titanyum alaşımları (Sergueeva vd., 2001; Kim vd.,2003), magnezyum ve magnezyum alaşımları (Kim vd., 2002; Munoz-Morris vd., 2004), alaşımsız çelikler (Shin vd.,2002; Shin vd.,2003), saf bakır ve bakır alaşımları (Neishi vd., 2001; Baik vd., 2003), nikel ve nikel alaşımları (Zhilyaev vd.,2002; Neishi vd., 2002), çinko-esaslı alaşımlar (Lee ve Langdon, 2001; Purcek vd., 2004), kompozit malzemeler (Li ve Langdon, 2000), toz metalürjisi ile üretilmiş malzemeler (Robertson vd., 2003), metaller arası bileşikler (Sastri ve Mahapatra, 2001) ve polimerler (Li vd., 2000; Kul, 2009) sayılabilir.

2.4.2. Ekstrüzyon

Ekstrüzyon işlemi, bir parçanın önceden hazırlanmış kalıptan geçirilerek istenen şekilde malzeme üretilmesi işlemi olarak tanımlanabilir. Ekstrüzyon işleminde malzemenin hetrojen bir yapıdan ziyade de homojen bir yapıda olması ve buna bağlı olarak düzgün bir geometric şekilde olması ile birlikte malzeme akışı önemlidir. Bura da bahsedilen malzeme akışını ise uygulanacak olan ekstrüzyonun türü, hızı, sıcaklığı, sürtünme koşulları, kalıp tasarımı ve ekstrüzyon oranı etkilemektedir. Uygulanan işlemde en önemli faktörlerden biri olan kalıp tasarımının uygun olması, yüksek ürün kalitesi ve düşük deformasyon kuvvetinin oluşması açısından önemlidir.

Ekstrüzyon işlemi plastik şekillendirme işlemi olarak tanımlanır ve silindir şeklindeki bir biyet'in kovan olarak adlandırılan bir alıcı içerisinde silindir numuneye yüksek kuvvet uygulayarak sıkıştırılıp numunenin kendisinden daha küçük bir kalıptan geçirilmesi suretiyle, kesit alanının daraltılmasını içeren bir metal şekillendirme işlemidir. Ekstrüzyon işlemi genelde ve yaygın olarak hafif metal endüstrisinde karşımıza çıkan bir imalat yöntemi olup uçak sanayinin gelişimi ile çok daha önem kazanmış, uçak modelcileri için çeşitli ölçülerde profillerin elde edilmesini sağlayan günümüzde en ekonomik üretim yöntemi olmuştur. Yine otomotiv, havacılık ve uzay endüstrisinde kullanılan karmaşık ve girift parçaların bir kısmı ekstrüzyon tipi dövme yöntemiyle imal edilmektedir. Ekstrüzyon yöntemi ile çeşitli geometrilere sahip dolu kesit profil parçalar üretilebileceği gibi boşluklu ve girift profiller de üretilebilmektedir. Genellikle Magnezyum, Alüminyum, Kurşun, Bakır gibi metallerin alaşımları diğer metallere göre nispeten daha düşük akma mukavemeti ve düşük ekstrüzyon sıcaklığına sahip oldukları için ekstrüzyon işleminde yaygın olarak bu metaller kullanılmaktadırlar. Düz ve uzun boruların üretimi içinde bu işlem tercih edilir. Bu yöntemle düz ve uzun borular da üretilebileceği gibi, karmaşık biçimlerde ürünler de bu uygulama sayesinde üretilebilir. Kalıp ölçüleri numune için uygunsa tek seferde istenilen şekilde ürün ortaya çıkartılabilir ve üretilen ürün uygun kalıptan ötürü en az çatlak oluşumu açısından diğer plastik şekillendirme işlemlerine göre daha avantajlıdır.

Ekstrüzyon işlemyle çeşitli geometrilere sahip dolu kesit profiller üretilebileceği gibi boşluklu ve karmaşık kesitli profiller de üretilebilmektedir. Günümüzde kullanılan teknolojisiyle üretilen kalıplar ile de kaliteli ürünler daha düşük maliyetlerle üretilebilmektedir. Bunun yanı sıra, ekstrüzyon öncesinde ve sonrasında uygulanan kimyasal, mekanik ve ısıt işlemler ürün özelliklerini önemli ölçüde değiştirmektedir (Aydın vd., 2009; Bourget vd., 2009; Bingöl, 2016). Ekstrüzyonda düzey yüzeyli kalıp ve konik girişli kalıp olarak iki tip ekstrüzyon kalıbı çeşidi olup, konik girişli kalıpta kalıp açısının küçülmesi deformasyonun homojenliğini arttırmaktadır. Otomotiv, uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılan karmaşık parçaların bir kısmı ekstrüzyon dövme yöntemiye imal edilmektedir. Eğer kalıp ölçüleri numune için uygunsa tek seferde istenilen ürün ortaya çıkar ve bu ürün en az çatlak oluşumu açısından plastik şekillendirme işlemlerine göre daha avantajlıdır (Sarıkaya ve Kural, 2020).

2.4.3. Çok Yönlü Dövme Yöntemi

Alaşımların özelliklerinin geliştirilmesi için yapılan çalışmalar her geçen gün artarak devam etmektedir. Son yıllarda geliştirilen ve yukarı da bahsettiğimiz aşırı plastik deformasyon yöntemleri ile alaşımların tane boyutunu mikron altı seviyelere indirip alaşımların mekanik ve süneklik özelliklerinde iyileştirmeler yapılmaktadır. Bu yöntemler arasında endüstriyel uygulanabilirliği açısından çok yönlü dövme (ÇYD) işleminin ön plana çıktığı görülmektedir. Özellikle kırılmaya meğilli gevrek karakter sergileyen bazı alaşımların sıcak veya ılık dövme işlemi ile süneklikleri önemli oranda artırılmaktadır. Haddeleme, dövme ve ekstrüzyon gibi geleneksel metal şekillendirme yöntemleri olarak bilenen işlemlerle metallerin sertlik ve mukavemet değerleri bir miktar artırılabilse de bu yöntemlerin uygulandığı metallerin sertlik ve mukavemet değerlerinde meydana gelen artış bunların kristal yapılarının çarpılması ve diskolasyon yoğunluğunun artmasından kaynaklanmaktadır (Valiev, 2000). Ancak mukavemetteki bu artışa karşın sünekliğin azalması pek çok uygulama için dezavantaj oluşturmaktadır. Metallerin hem mukavemet hem de süneklik değerlerinin artması bunların tanelerinin inceltilmesi ile gerçekleştirilmektedir (Rosochowski, 2005). Metallerin tane boyutunu inceltebilmek için aşırı plastik deformasyona dayalı değişik bir takım yöntemler geliştirilmiş olmakla birlikte aşırı plastik deformasyon elde etmek için büyük kapasiteli preslere ve yüksek mukavemetli kalıplara ihtiyaç duyulması,

parça boyutlarının sınırlı olması ve üretilen ürünlerin maliyetlerinin yüksek olması gibi sebeplerden dolayı söz konusu yöntemlerin endüstriyel bazda kullanımını sınırlamaktadır (Cherukuri vd., 2005). Sanayici iş adamları büyük boyutlu parçaların tane boyutunun inceltilmesi işlemini düşük maliyetlerle gerçekleştirebilecek yeni yöntemlere ihtiyaç duymakta olup bu bağlamda 1990'lı yılların başında geliştirilen ÇYD işleminin diğer yöntemlere göre sanayi uygulanabilirliğinin daha yaygın olduğu dikkat çekmektedir (Sabirov vd., 2013). Uygulanan ÇYD işleminde metalin üç ana ekseninde ardışık ve tekrarlı olarak dövülmesi ile gerçekleştirilir. Ancak ÇYD uygulanmış metallerdeki tane incelmesinin, diğer yöntemlere oranla daha düşük olduğu ve yapısal homojenizasyonun tam olarak sağlanamadığı bilinmektedir (Liu vd., 2011; Zhu vd., 2014). ÇYD işlemi uygulanmış malzemelerin yapı ve mekanik özelliklerinin uygulanan çevrim sayısına ve toplam deformasyon oranına bağlı olduğu görülmüş olup yapılan çalışmalar yapının kararlı hale gelmesini sağlayan deformasyon oranına ulaşıldıktan sonra çevrim sayısının daha da artırılmasının gerek yapı gerekse mekanik özellikler açısından önemli bir farklılığa neden olmadığını göstermiştir (Biswas ve Suwas, 2012; Naser vd. 2014; Sharath vd., 2016; Aoba vd., 2018).

ÇYD işlemi endüstriyel uygulanabilirliği, uygulama kolaylığı ve düşük maliyetleri açısından tercih edilen bir yöntem olup bu yöntemi kullanarak Alüminyum, Titanyum ve alaşımları gibi birçok malzeme proses edilmiş ve yöntemin bu malzemelerde önemli oranda bir tane incelmeye yol açtığı görülmüştür. Alüminyum esaslı alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarda ise belirli bir paso sayısından sonra meydana gelen yeniden kristalleşmenin sünekliliği önemli oranda artırdığı ve şekillendirilmelerini iyileştirdiği belirlenmiştir (Karabıyık, 2019).

2.5. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ KULLANIM ALANLARI

Mg alaşımlarının en başta gelen özelliği hafif oluşlarıdır. Magnezyum, Alüminyumdan %36 ve Demir'den ise %78 daha hafif olup bu özelliği ile modern teknolojilerin kullanıldığı uzay, elektronik, savunma, havacılık ve otomotiv parçalarının üretiminde önemli bir malzeme olarak yer almaktadır (Mordike ve Ebert, 2001; Koç, 2013).

Mg' un Alüminyum ve çelikle karşılaştırıldığında yüksek fiyatlı olmasına rağmen, otomobillerde kullanımı her geçen gün giderek artmakta olup bunun ana sebeplerinden biri de istenilen şekilde döküm parçalarının üretilmesidir. Yine araçlarda ki ağırlık asarrufuna yönelik arayışlarda Mg alaşımları düşük yoğunluğu ile mühendislik uygulamaları ile uzay, uçak ve otomotiv endüstrisinde en hafif yapısal metal olarak ön plana çıkmaktadır. Günümüzde de Mg alaşımlarına olan en büyük ilgi hergeçe gün tasarımı ve performansı ile ön plana çıkan otomotiv sektöründen gelmektedir. Bunun ana sebebi yukarıda da bahsettiğimiz gibi araç ağırlığında yapılan azalmanın yakıt ekonomisi sağlaması ve ayrıca ağırlığın azalması ile gaz emisyonlarının da azaltılabilecek olmasıdır. Özellikle otomotivlerde tercih edilen hafif metalik malzemelere yönelik arayış ve yönelme sadece günümüzün otomobillerinde olmayıp gelecekte yollarda çok daha sık göreceğimiz güneş enerjisi, elektrik ve hidrojen gibi alternatif enerji kaynakları ile çalışacağı öngörülen otomobillerde de menzilin arttırılması için hafiflik çok daha önemli bir gereksinim olacağından çok daha büyük bir ilgi oluşacaktır mg alaşımlarına. Önümüzdeki yıllarda binek otomobillerde ulaşılması planlanan yakıt tüketimi yüz km'de üç litre gibi zorlu bir hedeftir ve bunun için otomobil ağırlığında yaklaşık %30'luk bir azalma gerekmektedir (Friedrich ve Schumann, 2001; Koç, 2013). Mg alaşımlarının gelecekte çok daha fazla kullanılacağına dair en iyi örneklerden biri de BMW firmasının ürettiği Mg-Al-Sr kompozit motor bloğudur. Bu, Mg alaşımlarının yüksek sıcaklık motor uygulamasındaki ilk kullanımıdır (Andreas vd., 2005). Mg-Al-Zn alaşımları, çoğunlukla otomobil parçalarının dökümü için kullanılır. Diğer Mg alaşımlarıyla karşılaştırıldığında; AZ91 Mg alaşımı daha iyi döküm, daha iyi akma dayanımı özellikleri göstermektedir. AZ serisi alaşımlar uzay ve havacılık sanayii, bilgisayar ve telefon teknolojileri ile kamera sektöründe ve otomobil endüstrisinde yoğun bir şekilde kullanıldığı gibi özellikle biyo malzeme olarak stend, implant malzeme , vida ve plaka olarakta kullanılmaktadır. AM20, AM50, AM60 gibi Mg-Al-Mn esaslı alaşımlar özellikle enerji absorblama ve yüksek tokluk özellikleri bakımından araçlardın direksiyon, tekerlek, koltuk iskeleti yapımında kullanılır (Mordike ve Ebert, 2001). Mg-2Al-1Si gibi Alüminyum ve silisyum içeren AS21 ve Mg-4Al-1Si alaşımları ile toprak elementleri içeren Mg-4Zn-1Re (ZE41) ve Mg-4Al-2Re (AE42) alaşımları artan sıklıkla sürünme dayanımının ön planda olduğu aktarma parçaları ve motor blokları imalatı için kullanılmakta olup Mg-Al-Mn ve Mg-Al-Zn-Mn alaşımlarına

göre bu özelliği ile daha çok tercih edilmektedir (Zhang, 2000; Koç, 2013). Mg-Li esaslı alaşımlar ise süper hafif olarak nitelendirilmekte olup bu özelliği ile bilgisayarlarda plastik ve diğer benzer malzemelerin yerine kullanılabilir. Ancak Mg bazlı alaşımların geliştirilmesinde sağlanan kayda değer ilerlemelere rağmen, mekanik özelliklerinin kararlılığı, korozyona karşı direnci ve biyouyumluluk gibi konular da daha fazla araştırma ve geliştirme gerektirmektedir (Elmar Willbold, 2015).



BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada Magnezyum elementine Çinko (Zn), Gadolinyum (Gd), Kalsiyum (Ca), Zirkonyum (Zr) ve farklı oranlarda Neodinyum (Nd) ile Seryum (Ce) alaşım elementleri ilave edilerek düşük basınçlı döküm yöntemi ile EZ43A ve EZ43B alaşımlarının üretimleri sağlanmıştır. Döküm sonrası elde edilen EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ilk olarak homojenizasyon ısıtıl işlemi yapılmış, ardından numunelere ekstrüzyon işlemi uygulanmıştır. Ekstrüzyon işleminden sonra alaşımdan belli oranda parça alınarak çok yönlü dövme işlemine tabi tutulmuştur. Ardından ekstrüde edilen alaşımlar ile çok yönlü dövmeye tutulan alaşımların mikroyapı, sertlik, çekme, korozyon, aşınma ve biyoyumlulukları incelenmiştir.

3.1. ÜRETİM

Deneysel çalışmalar kapsamında Magnezyum elementine Çizelge 3.1’de belirtildiği oranda elementler ilave edilerek EZ43A ve EZ43B alaşımları üretilmiştir.

Çizelge 3.1. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının ağırlıkça element miktarları

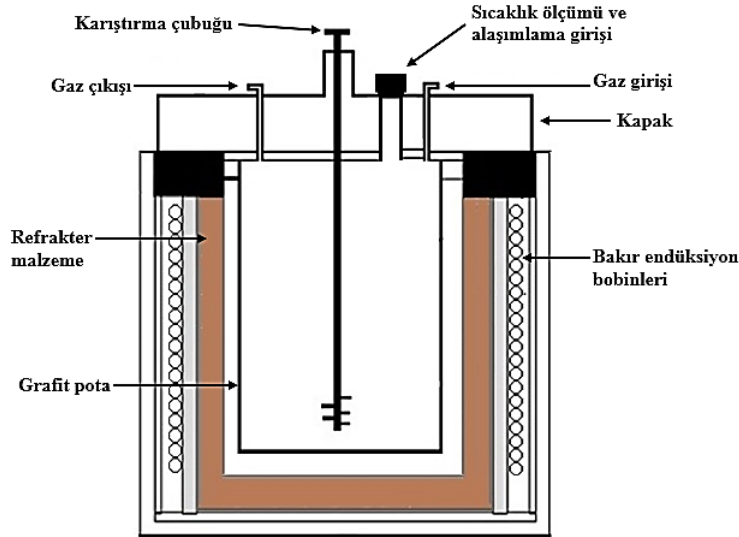
Alaşımlar	Mg (%)	Zn(%)	Nd(%)	Ce(%)	Gd(%)	Zr(%)	Ca(%)
EZ43A	92.0	3	2	1	1	0,5	0,5
EZ43B	92	3	1	2	1	0,5	0,5

Yapılan deneysel çalışmalarda kullanılan alaşımların üretiminde Bilginoğlu Endüstri Malz. San ve Tic. A.Ş. den temin edilen ticari saflıkta Magnezyum (%99,7), yüksek saflıkta (%99,9) çinko, Nanografi Nano Teknoloji A.Ş. firmalarından master alaşım olarak temin edilen Neodinyum, Seryum, Gadolinyum, Zirkonyum ve Kalsiyum kullanılmıştır.

Döküm işlemi gerçekleştirilmeden önce Şekil 3.3'te gösterildiği gibi yolluk bitiş kısmına süzgeç yerleştirilmiş ve alaşım bu süzgeçten süzülerek kalıbı doldurmuştur.

EZ43A ve EZ43B alaşımlarını elde etmek için öncelikli olarak düşük indüksiyon döküm ünitesinin faaliyete geçirilmesi, alaşım malzemelerinin temini ve döküm işleminin gerçekleştirilmesine odaklanılmıştır. Doktora çalışması için yapılacak bütün dökümler bu yöntem ile gerçekleştirilmiştir.

EZ43 alaşımlarının elde edilmesi için indüksiyon döküm sistemi kullanılmış olup Şekil 3.1' de şematik olarak verilmiştir. İndüksiyon döküm ocağının dış gövdesi çelik malzeme ile kaplı iken iç kısmı ise refrakter tuğla ile kaplıdır. Ocak içi sıcaklığı ölçmek için kapağın üzerinde ısı ölçüm deliği bulunmaktadır ve indüksiyon ocağının üst kapağına sızdırmazlık sağlamak için levha şeklinde O-ring yerleştirilmiştir. Ergitme esnasında ocak içerisindeki sıcaklık kontrolü termokupl ile sağlanmıştır. Magnezyum alaşımlarının ergitimi, ocak içine yerleştirilen grafit potanın içinde yapılmıştır. Pota içerisindeki eriyiğin karıştırılmasında, grafitten yapılmış bir aparak kullanılmıştır. Ergitme ve döküm işlemi esnasında ortamın atmosferle temasını keserek oksitlenmeyi önlemek amacıyla pota ve kalıp içerisinde sürekli koruyucu gaz olarak Argon gazı ($\text{CO}_2 + \%1\text{SF}_6$) akışı sağlanmıştır.



Şekil 3.1. Atmosfer kontrollü indüksiyon döküm ünitesinin şematik görünümü (Elen, 2021)

Ergitme ve karıştırma tamamlandıktan sonra, kalıbın boyutlarına uygun olarak tasarlanmış olan Şekil 3.2' de ki ısıtma plakaları ile döküm kriterlerine uygun olarak tasarlanmış çelik kalıp 270 C' ye ısıtılmış ve iç kısmı döküm öncesi CO₂+SF₆ gazı ile doldurulduktan sonra gravite yöntemiyle döküm işlemi gerçekleştirilmiş ve döküm işleminden sonra Şekil 3.4' te verilen 34 ve 44 mm çapında 190 mm boyund iki kadememeden oluşan silindirik ingot parça elde edilmiştir. EZ43A alaşımı ve EZ43B alaşımı ile ilgili olarak ayrı ayrı birer adet ingot parça dökülerek elde edilmiştir.



Şekil 3.2. Kalıp ve ısıtıcı (a) Çelik döküm kalıbı (b) Isıtma plakaları



Şekil 3.3. Yolluğa yerleştirilen seramik döküm filtresi görüntüsü



Şekil 3.4. Üretilen Döküm İngot parçanın kalıptan çıktıktan sonraki görüntüsü

Döküm işleminde, öncelikle fırın içindeki grafit pota Bilginoğlu Döküm firmasından temin edilen saf Mg külçeleri ile yüklenmiş ve ardından sızdırmazlığı sağlamak için kapak sıkıca kapatılmıştır. Fırın sıcaklığı 750 °C ye ayarlanmış ve düşük seviyede argon gazı sirkülasyonu sağlanmıştır. Fırın sıcaklığı 750 °C ye ulaştıktan sonra ergime işlemi gerçekleşmiş olduğu tespit edildiğinde fırın yaklaşık bir saat kadar daha bu sıcaklıkta bekletilerek ilk olarak üretimi gerçekleştirilen EZ43A için %3 Zn, %2 Nd, %1 Ce, %1 Gd, %0.5 Zr ve %0.5 Ca içeren kapsüller ve sonra ikinci olarak üretimi gerçekleştirilen EZ43B için ise %3 Zn, %1 Nd, %2 Ce, %1 Gd, %0.5 Zr ve %0.5 Ca içeren kapsüller eriyiğin içerisine eklenerek motorlu karıştırıcı ile sürekli olarak karıştırılarak karışması sağlanmıştır.

Diğer döküm yöntemleri ile döküm sırasında ortaya çıkabilecek türbülanslar ve çalkantıların sebep olabileceği bir takım döküm hataları (çekme boşlukları, poroziteler, inklüzyonlar gibi) uygulanan bu sistem ile minimuma indirilmeye çalışılmıştır. Şekil 3.5'te ergitme potası ve ergitme anından bir görüntü verilmiştir.



Şekil 3.5. Ergitme işleminden bir görüntü

3.2. HOMOJENİZASYON İŞLEMİ

Döküm işleminin ardından alaşımların döküm işlemi sırasında üretimi gerçekleştirilen döküm parçaların mikro yapılarında muhtemelen oluşabilecek küçük oranlarda ki mikrosegregasyonlar ile homojen olmayan tane dağılımı ve boyutu gibi kusurları

ortadan kaldırmak ve yine ekstrüzyon işlemi sırasında deformasyonu zorlaştıran düşük termal kararlılığa sahip ikincil fazların ana matris fazı içinde çözünmesini temin etmek amacıyla yapılan ekstrüzyon işlemi öncesi iki alaşıma da homojenleştirme işlemi uygulanmıştır. Homojenleştirme işlemine başlamadan önce üretimi gerçekleştirilen her iki alaşımın döküm ingotları Şekil 3.6a da gözüktüğü haliyle Alüminyum folyo ile sıkıca sarılmış ve ardından Şekil 3.6b de kuma gömme işleminin gerçekleştiğinin gözüktüğü gibi SiO₂+Grafite kum karışımı içine tamamen gömülmüştür. Gömme işleminden sonra döküm ingot alaşımları homojenleştirme işlemi gerçekleştirilecek fırın içine Şekil 3.6c de gözüktüğü gibi yerleştirilmiş ve fırın sıcaklığının 400°C'ye gelmesi sağlanarak bu sıcaklıkta 24 saat homojenleştirme işlemi için bekletilmiştir. Daha sonra fırından çıkarılan numunelerin atmosfer ortamında soğuması sağlanmıştır.



Şekil 3.6. a) Alaşımın folyolanmış görüntüsü b) Alaşımın folyo içinde kuma gömülme işlemi c) Alaşımın homojenleştirme fırınına konulmuş hali.

3.3. EKSTRÜZYON İŞLEMİ

Homojenleştirme işlemi tamamlanan alaşımlar Şekil 3.7’de verilmiş olan hidrolik pres ile ekstrüzyon işlemine tabi tutuldu. Ekstrüzyon öncesinde Homojenleştirme işlemine

tabi tutulmuş olan Döküm ingotlardan elde edilecek numuneler tornadan geçirilerek 32 mm çap ve 60 mm boya sahip silindir numuneler elde edilmiş ve böylece ekstrüzyon öncesi her bir numunenin yüzeyleri de kusursuz hale getirilmiştir (Şekil 3.8). Elde edilen bu numuneler sonra biyet boyunca homojen sıcaklık dağılımının olması adına ısıtılma işlemi fırınında (Şekil 3.9) 350 c sıcaklıkta iki saat bekletildi. Ardından ekstrüzyon işlemi için gereken sıcaklığa gelen alaşımların ekstrüzyon işlemine geçildi. Numuneler fırından alınıp ekstrüzyon işlemine başlamadan hemen önce ise biyet, kalıp içi ve zımba ısıya dayanıklı Molykote marka MoS₂ bazlı spreyl yağlayıcı ile yağlanmıştır. Alaşımların ekstrüzyonu 30 ton kapasiteli hidrolik pres yardımı ile yapıldı. Ekstrüzyon işlemine başlamadan önce ekstrüzyon işleminde kullanılan kalıplar sıcaklık kontrollü prese bağlantılı kuşak kelepçe rezistanslar ile ısıtılıp 350 c olması sağlanmıştır. Fırından çıkarılıp kalıp içerisine alınan biyet, transfer sırasında meydana gelen sıcaklık kaybını gidermek için kalıp içinde 15 dakika bekletilmiştir. Kızılötesi lazer termometre kullanılarak kalıp ve biyetin istenilen ekstrüzyon sıcaklığına ulaşp ulaşmadığı kontrol edilmiş istenen ekstrüzyon sıcaklığına ulaştıktan sonra zımba 0.3 mm/sn basma hızında Prese bağlı olan zımba hareket ettirilerek kalıp içerisinde bulunan 32 mm çapa ve 60 mm boya sahip silindirik biyete baskı uygulayarak Şekil 3.10’da gösterilen 10x10x110 mm boyutlarına sahip numuneler elde edilmiştir. Çalışmada hesaplanan 7:1 ekstrüzyon oranı kullanılmıştır. Ekstrüzyon oranı (EO) aşağıdaki formülle hesaplanmıştır (Eşitlik 3.1). Kullanılan düşük ekstrüzyon hızı, bir sonraki test için gerekli numune şeklinin elde edilmesinde bir hazırlık adımıdır. Şekil 3.11’de ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi verilmiştir.

$$EO = A0 \frac{A0}{AS} \quad (3.1)$$

Denklemden A0 biyetin kesit alanını, AS ise ekstrüzyon sonrası elde edilen numunenin kesit alanını ifade etmektedir.



Şekil 3.7. Ekstrüzyon işleminin yapıldığı hidrolik pres



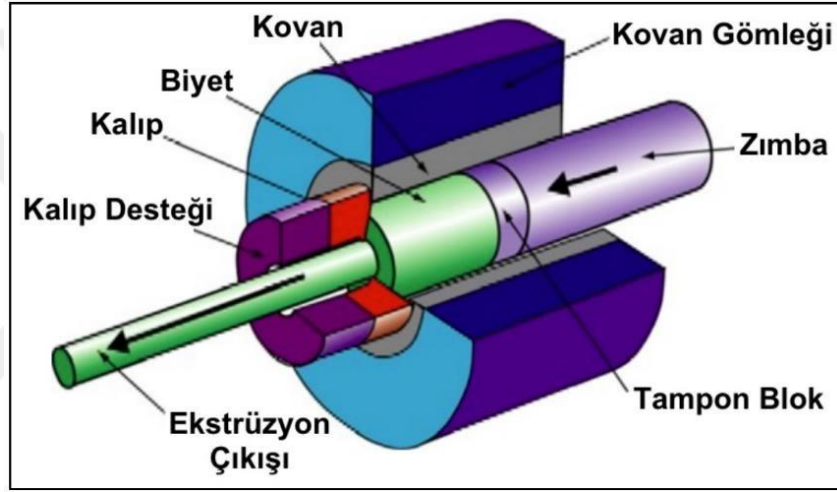
Şekil 3.8. Ekstrüzyon Öncesi Numune (60x32mm)



Şekil 3.9. Tavlama fırınından görüntü



Şekil 3.10. Ekstrüzyon işlemi sonrası numune (10x10x110mm)

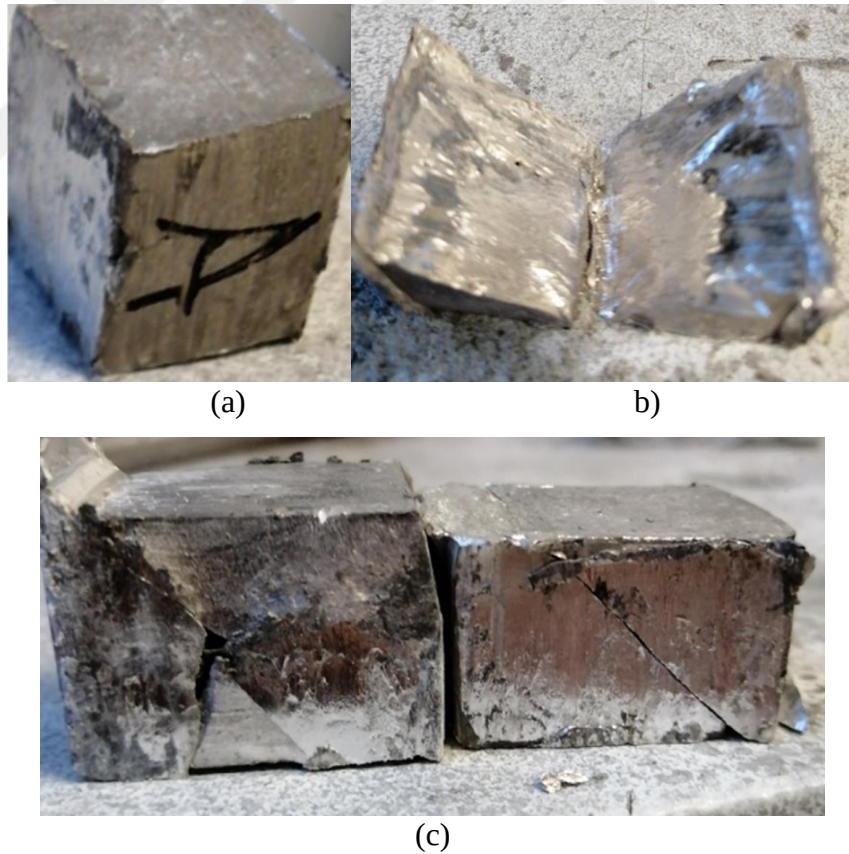


Şekil 3.11. Ekstrüzyon prosesinin şematik gösterimi. (Elen, 2021)

3.4. ÇOK YÖNLÜ DÖVME İŞLEMİ

Ekstrüzyon işleminden sonra çok yönlü dövme işlemi uygulanacak olan EZ43A ve EZ43B alaşımları çok yönlü dövme işlemine başlamadan önce Şekil 3.10’da gösterilen ekstrüde edilmiş numuneler 10x10x30 mm boyutunda kesildi ve elde edilen bu numuneler sonra biyet boyunca homojen sıcaklık dağılımının olması adına ısıtılma fırınında (Şekil 3.9) 350 c sıcaklıkta iki saat bekletildi. Ardından dövme işlemi için gereken sıcaklığa gelen alaşımların ilk olarak birinci dövme işlemine geçildi. Birinci dövme işlemine tabi tutulan numuneler ikinci dövme işlemi öncesi tekrar tavlama fırınına alındı ve 350 c sıcaklıkta 30 dakika bekletildi. Numuneler fırından alınıp dövme işlemine başlamadan hemen önce ise biyet, kalıp içi ve zimba ısıya dayanıklı Molykote marka MoS₂ bazlı spreya yağlayıcı ile yağlanmıştır. Alaşımların dövme işlem

30 ton kapasiteli hidrolik pres yardımı ile yapıldı. Dövme işlemine başlamadan önce dövme işleminde kullanılan kalıplar sıcaklık kontrollü prese bağlantılı kuşak kelepçe rezistanslar ile ısıtılıp 350 c olması sağlanmıştır. Fırından çıkarılıp dövme işlemi yapılacak kalıp içerisine alınan biyet, transfer sırasında meydana gelen sıcaklık kaybını gidermek için kalıp içinde 15 dakika bekletilmiştir. Kızılötesi lazer termometre kullanılarak kalıp ve biyetin istenilen ekstrüzyon sıcaklığına ulaşp ulaşmadığı kontrol edilmiş istenen dövme sıcaklığına ulaştıktan sonra zımba 0.3 mm/s basma hızında Prese bağlı olan zımba hareket ettirilerek 110 pp basınç ile kalıp içerisinde bulunan 10x10x30 mm boya sahip dikdörtgen numuneye baskı uygulayarak şekil 3.12’de gösterilen bir ve iki dövme işlemi uygulanmış numuneler elde edilmiştir. EZ43B numunesi şekilde gösterildiği gibi ikinci dövme sonrası Ekap şeklinde parçalanmıştır. Çok yönlü dövme işleminde kullanılan aparatlar Şekil 3.13’te verilmiştir.



Şekil 3.12. Çok yönlü Dövme işlemi uygulanan numune görüntüleri a) Bir dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesi b) İki dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin parçalanmış hali c) İki dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesi



Şekil 3.13. Çok yönlü dövme işleminde kullanılan aparatlar

3.5. EKSTRÜZYON VE ÇOK YÖNLÜ DÖVME İŞLEMİ SONRASI YAPILAN DENEYLER

Üretimi tamamlanan EZ43A ve EZ43B alaşımlarının ekstrüzyon işlemi ile bir ve iki dövme işlemi sonrası mikroyapı görüntüleme işlemleri, XRD analizi, Taramalı Elektron Mikroskopu (SEM), EDX ve MAP görüntüleme işlemleri, sertlik ve çekme testi, daldırma korozyon testi, potansiyodinamik polarizasyon (Pd) testi, empedans testi, adhezif ve korozyon aşınma testi, hidrojen evolution testi ile biyouyumluluk genotoksisite ve sitotoksisite testleri yapılmıştır. Birinci ve ikinci dövme işlemleri sonrası ise çekme testi ve biyo uyumluluk testleri yapılmamıştır.

3.5.1. Optik Mikroyapı Görüntüleme İşlemleri

Ekstrüzyon ve dövme işlemleri sonrası elde edilen numunelerden alınan parçalar metalografik incelemeler için su soğutmalı şerit testerede istenen boyutlarda kesilmiş ve metalografik hazırlama öncesi epoksi reçine ve sertleştirici karışımı kullanılıp soğuk olarak kalıplanmıştır. Ardından numune yüzeyleri uygun ölçülerde zımparalar ile küçük ölçülü zımparadan büyük ölçülü zımparaya doğru sırası ile saf su kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra 1 µm alümina sıvı süspansiyon kullanılarak yüzeyler parlatılmıştır. Parlatma işlemi sonrası numuneler dağlanarak tane yapısı ve ikincil fazların görülebilmesi için pikral kullanılmıştır. Dağlamada kullanılan pikral bileşimi, 6 gr pikrik asit, 5 ml asetik asit, 10 ml. saf su ve 100 ml etil alkol içermektedir.

Ekstrüzyon ve dövme işlemi sonrası numunelere Nikon marka optik mikroskopta inceleme yapılmıştır. Numunelerin yapısında var olan ikincil fazların hacimsel oranı Imagej analiz programı kullanılarak belirlenmiştir. Tane boyutu analizleri ASTM E112-13 test standardına göre lineer kesişim metodu ile alaşım başına 3 farklı bölgedeki mikroyapı görüntüleri üzerinden yapılmıştır (ASTM INTERNATIONAL, 2013).

3.5.2. XRD Analizi

Ekstrüzyon işlemi gerçekleştirilen EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ana matriste oluşan intermetaliklerin belirlenmesi için XRD analizi uygulandı. XRD analizi KBÜ Demir Çelik Enstitüsü XRD- XRF laboratuvarında bulunan Rigaku Ultima IV markalı cihaz ile 10°-90° tarama açısı aralığında ve 3°/dakika tarama hızında X – ışınının difraktometrisi yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

3.5.3. SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlemleri

Ekstrüzyon ve dövme işlemleri sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarına mikro yapı incelemesi ve SEM analizi görüntüleme işlemi yapılmıştır. Mikro yapı görüntüleme, SEM görüntüleme ve EDX analizleri KBÜ Demir Çelik Enstitüsünde bulunan MARGEM Metalografi Laboratuvarındaki Carl Zeiss Ultra Plus markalı Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır.

3.6. MEKANİK TESTLER

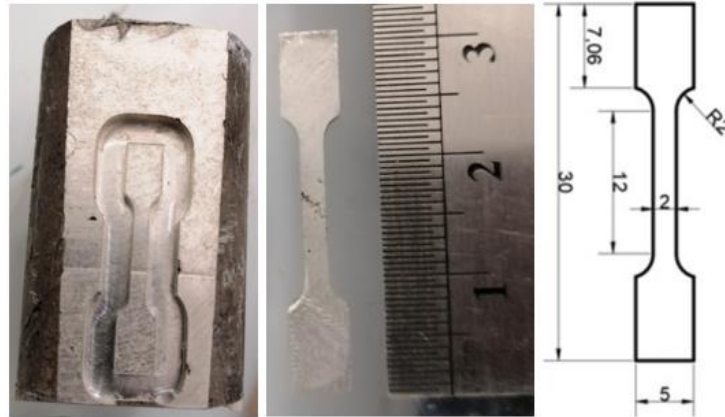
Ekstrüzyon ve dövme işlemleri sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının oda sıcaklığındaki mekanik özellikleri, sertlik testi, çekme testi, Adhezif aşınma ve Korozyon aşınma testleri ile tayin edilmiştir. Dövme işleminden sonra dövülen numunelerden çekme numunesi çıkartılamadığı için ise bu testlerden sadece çekme testi yapılamamıştır.

3.6.1. Sertlik Testi

Ekstrüzyon ve dövme işlemleri sonrası EZ43 alaşımlarının Sertlik deneyi numuneleri alaşımların merkezlerinden çıkartılmış ve yüzeyleri zımparalanarak parlatılmıştır. Alaşım numunelerinin sertlikleri, KBÜ Mühendislik Fakültesinde bulunan Tahribatlı Muayene Laboratuvarlarında ki BMS 3000 - HB BRINELL Hardness Tester cihazında Brinell sertlik testi ile belirlenmiştir. Sertlik deneyi 750 kgf yük altında 5 mm Bilya çapı ile 10 sn uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Numunelere sertlik deneyi uygulanırken numunenin ölçüm yapılabilecek en dış noktasından merkezine kadar eşit aralıklarda en az üç farklı nokta belirlenmiş ve belirlenen bu noktalardan sertlik ölçümü yapıp iz çapları ölçülerek sertlik değerlerinin ortalamaları alınarak hesaplanmıştır.

3.6.2. Çekme Testi

Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A ve EZ43B alaşımlarının her bir bölgesinden şekil 3.14’ de gösterilen şekilde ve ölçülerde 5’er tane çekme numunesi hazırlanmıştır. Çekme deneyleri KBÜ Mühendislik Fakültesi laboratuvarında bulunan 5 ton çekme kapasitesine sahip SHIMADZU marka çekme cihazında ve 1 mm/dk çekme hızında yapılmıştır.



Şekil 3.14. Çekme testi numunesinin görüntüsü

3.7. AŞINMA TESTLERİ

3.7.1. Adhezif Aşınma Testi

Ekstrüzyon ve dövme işlemleri uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarına adhezif kuru aşınma testi uygulanmıştır. Adhezif aşınma yönteminde 400 metre kayma mesafesi, 20 Newton yük kullanılmış olup 0.48 dakika/metre kayma hız ile aşınma testleri bilgisayar kontrollü ve load-cell sistemli ileri geri hareket eden aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde karşı yüzey olarak 6 mm çapında 100 Cr6 kalite çelik bilya kullanılmıştır. Aşınma deneylerinde her bir 100 metre kayma mesafesinden sonra 0,1 mg hassasiyeti sahip dijital hassas terazide ağırlıkları ölçülüp her 100 metrede bir ağırlık kaybı hesabı yapılmıştır. Hassas terazide ağırlık kaybının ölçümü öncesinde numune saf su ve metil alkol ile temizlenerek kurutucu ile kurutulduktan sonra ağırlık kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda alınan veriler kayıt altına alınarak kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişim grafikleri çıkarılmıştır.

Adhezif aşınma deneyi sonrasında kompozitlerin aşınma mekanizmalarını belirlemek için KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM mikroyapı inceleme laboratuvarında Carl Zeiss Ultra Plus markalı Taramalı Elektron Mikroskobu ile numunelerin aşınan kısımlarına detaylı SEM ve elementel mapping (MAP) görüntüleme analiz işlemleri yapılmıştır.

3.7.2. Korozi Aşınma Testi

Ekstrüzyon ve dövme işlemleri uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Hank sıvısı içinde korozi aşınma testi uygulanmıştır. Korozi aşınma yönteminde de Adhezif aşınma yönteminde olduğu gibi 400 metre kayma mesafesi, 20 Newton yük kullanılmış olup 0.48 dakika/metre kayma hız ile aşınma testleri bilgisayar kontrollü ve load-cell sistemli ileri geri hareket eden aşınma test cihazında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde karşı yüzey olarak 6 mm çapında 100 Cr6 kalite çelik bilya kullanılmıştır. Korozi aşınma deneyinde de Adhezif aşınma testinde olduğu gibi her bir 100 metre kayma mesafesinden sonra 0,1 mg hassasiyetine sahip dijital hassas terazide ağırlıkları ölçülerek her 100 metrede bir ağırlık kaybı hesabı yapılmıştır. Hassas terazide ağırlık kaybının ölçümü öncesinde numune saf su ve metil alkol ile temizlenerek kurutucu ile kurutulduktan sonra ağırlık kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda alınan veriler kayıt altına alınarak kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişim

grafikleri çıkarılmıştır. Koroziif aşınma testinde numune ve aşındırıcı çelik bilye hank sıvısı içerisinde iken test gerçekleştirilmiştir.

Koroziif aşınma deneyi sonrasında kompozitlerin aşınma mekanizmalarını belirlemek için KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM mikroyapı inceleme labaratuvarında Taramalı Elektron Mikroskobu ile numunelerin aşınan kısımlarına detaylı SEM ve elemental mapping (MAP) görüntüleme analiz işlemleri yapılmıştır.

3.8. KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU

Ekstrüzyon ve dövme işlemleri uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarına korozyon özelliklerinin karakterizasyonu için daldırma korozyon testi, Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) testi, Empedans testi ve Hidrojen evolution testleri gerçekleştirilmiştir.

Korozyon testleri; 7.4 pH'a ve NaCl 8.0 g/l, KCl 0.4 g/l, CaCl₂ 0.14 g/l, NaHCO₃ 0.35 g/l, C₆H₆O₆ (glucose) 1.0 g/l, MgCl₂·6H₂O 0.1 g/l, MgSO₄·7H₂O 0.06 g/l, KH₂PO₄ 0.06 g/l, Na₂HPO₄·12H₂O 0.06 g/l. bileşime sahip Hank sıvısı içinde 37 °C'de yapılmıştır. Daldırma ve potansiyodinamik polarizasyon korozyon testleri için, alaşım numunelerinin yüzeyleri uygun ölçülerde zımparalar ile zımparalanmış olup elektrokimyasal empedans ölçümleri (EIS) için numune yüzeyleri ise 2500 mesh zımpara ile zımparalanarak alaşım numenisinin yüzeylerinde bulunabilecek kalıntı, boşluk vb. gibi korozyon hızını etkileyebilecek faktörler giderilmiştir.

3.8.1. Daldırma Korozyon Testi

Ekstrüzyon ve dövme işlemleri uygulanmış olan numunelerin korozyon özelliklerinin karakterizasyonu ortam sıcaklığında, sızdırmaz cam kavanoz içerisinde bulunan Hank sıvısı içinde yapılmıştır. Daldırma korozyon testi için, numunelerin yüzeyleri 1200 mesh zımparaya kadar zımparalanmış ve yüzeylerde kalıntı, boşluk vb. gibi korozyon hızını etkileyebilecek faktörler giderilmiştir. EZ43A ve EZ43B numunelerinin daldırma korozyon testi öncesinde kumpas ile boy (a), genişlik (b) ve

yükseklik (c) ölçümleri mm cinsinden alınarak “2ab+2ac+2bc” formülü ile yüzey alanları hesaplanmıştır. Ardından mm cinsinden hesaplanan yüzey alanları, dm cinsinden yüzey alanına dönüştürülmüştür. Daldırma testi öncesinde numunelerin ağırlıkları da hassas terazide ölçülmüştür. Ölçüm işlemleri bittikten sonra EZ43A ve EZ43B numuneleri içinde hank sıvısı olan numune sayısı kadar farklı kavanoz içerisinde polimer file yardımı ile askıda bekletilmiştir. Daldırma korozyon testi toplamda 72 saat sürmüş olup numuneler 24 saat aralıklarla vücut sıvısı dolu kavanozlardan çıkartılıp üç aşamadan oluşan temizleme aşaması ile temizlendikten sonra kurutma işlemi uygulanmış ve 0.1 mg hassasiyetteki hassas terazi ile tartılmıştır. Tartım sonucu kaydedildikten hemen sonra EZ43A ve EZ43B numuneleri kavanozlara tekrar aynı şekilde daldırılmış ve bu işlem belirtilen periyotlarda tekrarlanmıştır. Temizleme aşamasının parametreleri ise şu şekildedir. Temizleme aşamasında ilk olarak ultrasonik cihazda 5 dk saf su içerisinde, İkinci aşamada, ultrasonik cihazda 5 dk kromik asit (1 Litre için 182 gram) içerisinde, Son aşamada metil ya da etil alkol içerisinde 5 dk temizledikten sonra sıcak hava ile numuneler kurutulup hassas terazide ağırlık kayıplarını ölçmek için tartılarak kütle ağırlığı (M_f) belirlendi. İlk ölçüm (M_s) ile son ölçüm (M_f) arasındaki fark korozyon kütle kaybı olarak belirlenir.

Ortalama korozyon hızı CR_m, aşağıdaki denklem kullanılarak belirlendi (Eşitlik 3.2):

$$CR_m = \frac{8.76 \times 10^4 \times \Delta g}{A \times t \times \rho} \quad (3.2)$$

Formülde, Δg gram cinsinden ağırlık değişimi (daldırma öncesi ve sonrası fark), A cm² cinsinden numunenin yüzey alanı, t saat cinsinden daldırma süresi ve ρ g/cm³ cinsinden yoğunluktur.

Gram cinsinden ölçülen ağırlık kayıpları, ölçülen yüzey alanları ile mdd (mdd: mg/dm² x day) -gün cinsinden grafiklere dönüştürülmüştür. Dönüşüm, gram cinsinden ölçülen ağırlık kayıpları mg'ye, ardından mg/yüzey alanı hesaplanmış ve son olarak “mg/yüzey alanı” nı güne bölerek mdd'ye dönüştürülmüştür. Güne dönüşüm, “24”e bölünerek hesaplanmıştır. Hesaplanan sonuçlar neticesinde mdd-gün eğrileri oluşturulmuştur.

Daldırma korozyon işlemi sonrası KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM mikroyapı inceleme biriminde Taramalı Elektron Mikroskobu ile numunenin SEM ve EDX analizleri yapılmıştır.

3.8.2. Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi

Ekstrüzyon işlemi uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B numuneleri Hank sıvısı içinde potansiyodinamik korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin (çalışma elektrodu) iletkenliği sağlayabilmek için arka yüzeyine bakır tel bağlanarak yalnızca elektrolit ile temasta olan yüzeyleri açıkta kalacak şekilde epoksi reçine ile kaplanmıştır. Deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak deney numuneleri, karşı elektrot görevini yapan karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot (SCE) yerleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmalarının tümünde, öncelikle sistemden akım geçmeksizin, yapay vücut sıvısı çözeltisinin içine çalışma elektrodunun ve referans elektrodunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline (E_{cor}) ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri katodikten anodik yöne doğru kaydedilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{cor}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{cor}) hesaplanmıştır.

3.8.3. Empedans Testi

Ekstrüzyon ve Dövme işlemleri uygulanmış olan EZ43 alaşımlarına empedans spektroskopisi testi uygulanmıştır. Potansiyodinamik polarizasyon testi için hazırlanan numunelerin yüzeyleri, ilgili testten sonra 1200 ve 2000 numaralı zımparalar ile temizlenmiş ve yüzeyine tekrar $0,25 \text{ cm}^2$ yuvarlak boş bir alana sahip yapışkan bant uygulanarak serbest korozyon potansiyelinin oluşturulması için Hank sıvısı içinde yaklaşık 30 dakika bekletilmiştir. EIS deneyleri 10^5 Hz ila 10^{-2} Hz frekans aralığında 10mV'lik AC genliği ile açık devre potansiyelinde gerçekleştirilmiştir. Empedans ölçümü yazılımı olan bir bilgisayar tarafından kontrol edilen bir Parstat 4000 model potansiyostat/ galvanostat kullanılarak oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir.

3.8.4. Hidrojen Evolution Testi

Ekstrüzyon ve Dövme işlemleri uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarının hidrojen çıkışlarını ölçmek için Hidrojen Evolution testleri şekil 3.15’ te gösterilen beher düzenek ile gerçekleştirilmiştir. Beher kap içindeki vücut sıvısında (Hank sıvısı) 144 saat bekletilecek numunelerin öncelikle ölçümleri yapılmış ardından numuneler beher kap içinde bulunan hank sıvısının içine atılmıştır. Beher kapların ağızları hidrojen kaçırları olmasın diye sıkıca kapatılmıştır. Beher kap içinde bekletilen numunelerin hidrojen çıkışı gözlenmek için her 24 saat ara ile fotoğrafları çekilmiştir.



Şekil 3.15. Hidrojen Evolution Test düzeneği.

EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Hidrojen Evolution testi sonrası beher içinde kalan parçaları alınarak saf su ile yıkandı ve kurutuldu. Ardından kimyasal bileşimleri KBÜ Demir Çelik Enstitüsü XRD- XRF laboratuvarındaki XRD (X-Işınları Difraktometrisi) yöntemi ile Rigaku Ultima IV marka cihaz kullanılarak belirlenmiştir.

3.9. BİYUYUMLULUK HÜCRE KÜLTÜRÜ TESTLERİ

Ekstrüzyon işlemi uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Biyouyumluluk Hücre kültürü testleri olan Sitotoksisite ve Genotoksisite Testleri uygulanmıştır. Bu testler için L929 fibroblast hücre hattı ve CHO ovaryum epitel hücre hattı kullanılmıştır, kullanılan hücreler EN ISO 10993'ün referans ettiği hücrelerdir. Hücreler 196 °C sıvı azot tankından çıkarıldıktan sonra hızlı bir şekilde çözündürülmüş ve falkon içerisinde 2500 rpm de 2.5 dakika boyunca santrifüj edilmiştir. Hücre pelleti alınarak steril hücre flaskları içerisine tam besiyeri ile koyulmuştur (tam besiyeri: % 89 DMEM, %1 antibiyotik ve %10 FBS içermektedir). Hücreler çözünme sonrası en az iki pasajlama işlemine tabii tutularak normal döngülerine getirilerek MTT ve in vitro mikronükleus testlerinde kullanılmıştır. Malzemelerin hücreye doğrudan uygulanması yerine özütünün kullanılması EN ISO 10993:12'ye göre gerekmektedir. Bu sebeple standartta belirtildiği gibi 0.1 g malzeme: 1 mL besi yeri ile 24 saat 37 °C'de muamele edilmiş ve süre sonunda sıvı ortam steril edilerek testlere uygun hale gelmiştir.

3.9.1. MTT Sitotoksisite Testi

Bu test yöntemi akademik olarak birçok farklı şekilde yapılsa da tıbbi cihaz olarak tasarlanan ya da kullanılması ön görülen malzemelerin EN ISO 10993:5'e göre yapılması gerekmektedir. Bunun için hücreler tripsin ile flasktan ayrıldıktan sonra, 2500 rpm de 2.5 dakika boyunca santrifüj edilir ve sayılır, 96 well plakada her kuyucukta 10×10^3 hücre olacak şekilde ekilir ve 24 saat 37 °C ve %5 CO₂ içeren ortamda inkübe edilir, inkübasyonun ardından hazırlanan malzeme özütü doğrudan ve seyreltilerek hücrelere uygulanır. Süre sonunda vasat atılır ve her kuyucuğa 1mg/mL konsantrasyonda MTT uygulanır, 2.5-3 saat inkübe edildikten sonra MTT çözücüsü olan izopropil ile 15 dk inkübe edilir ve multiplaka okuyucuda 570 nm dalga boyunda absorbansı ölçülür. Hücre canlılıkları negatif kontrol grubunda bulunan hücrelerin canlılığının %100 kabul edildiği absorbans değerleri ile kıyaslanarak hesaplanır.

3.9.2. In-vitro Mikronükleus Genotoksisite Testi

Tıbbi cihaz ya da biyomalzemelerin kullanımı sırasında ve sonrasında genetik bir mutasyona, karsinojenik etkiye sahip olup olunmadığının anlaşılması amacıyla in vitro mikronükleus testi yapılır. Bu test yönteminde CHO hücreleri kullanılır. Hücreler 24 kuyucuklu plakalara kuyucuk başına 20×10^3 olacak şekilde ekilir. 24 saat 37 °C ve %5 CO₂ içeren nemli ortamda inkübe edilir. Malzemelerin tam konsantrasyonları (1/1) hücrelere uygulanır ve plakaya alınmasının 44-48. Saatinde cyt-b eklenerek 24 saat daha inkübe edilir. 72 saat sonunda fiksasyon işlemi yapılır ve floresan işaretli, çekirdek boyası olan PI (Propidium iodide) ile boyanır, floresan mikroskop altında hücreler sayılır.



BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

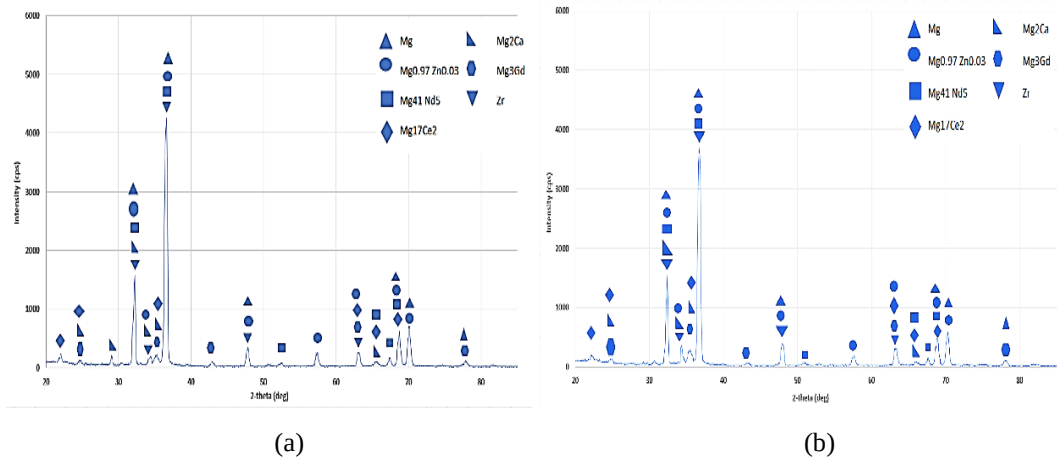
4.1. ALAŞIM KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu kısımda Ekstrüzyon işlemi Sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarına yapılan XRD ve Ekstrüzyon işlemi sonrası ile bir ve iki dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarına uygulanan Mikro yapı, SEM, EDX ve MAP görüntüleme analiz işlem sonuçları ve değerlendirilmesi yapılacaktır.

4.1.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan XRD Analiz Sonuçları ve Değerlendirme

Dökümü gerçekleştirilen alaşımlara uygulanan ekstrüzyon işlemi sonrası ana matriste oluşan intermetaliklerin belirlenmesi için bütün numunelere XRD analizi uygulanmıştır. Fazların bileşimlerini gösteren XRD tepki spektrum sonuçları Şekil 4.1’de verilmiştir.

Şekil 4.1’de ki EZ43A ve EZ43B alaşımlarının XRD sonuçlarına baktığımızda; α -Mg, Mg_{0.97}Zn_{0.03}, Mg₄₁Nd₅, Mg₁₇Ce₂, Mg₂Ca, Mg₃Gd ve Zr intermetalik fazları görülmektedir. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının kimyasal bileşimindeki farklar, tane boyutu hariç, oluşan fazların sayısını ve tipini değiştirmemiştir

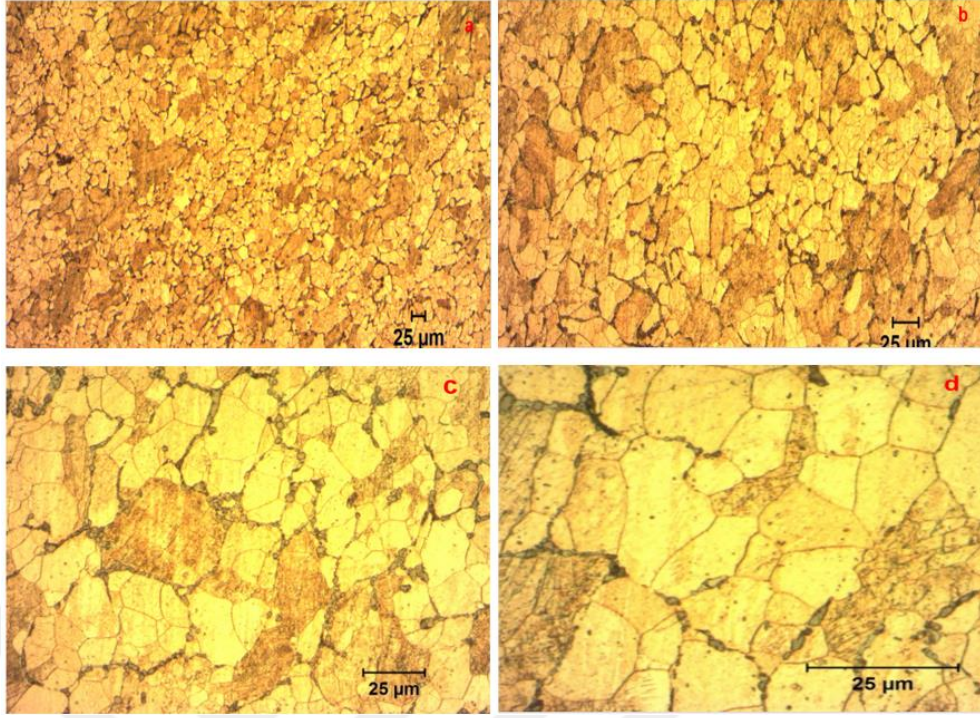


Şekil 4.1. (a) EZ43A ve (b) EZ43B alaşımlarının XRD elementel tepki spektrum sonuçları

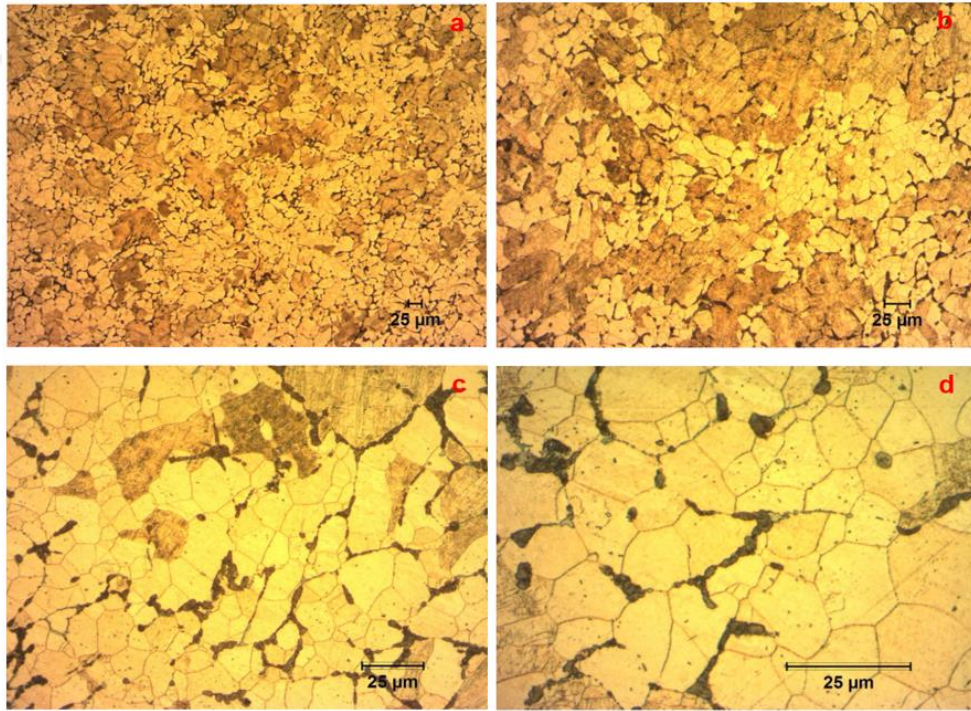
4.1.2. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Mikro Yapı Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen numunelerden alınan parçalar metalografik incelemeler için numune yüzeyleri sırası ile 400 den 2000 mesh e kadar olan zımparalar ile zımparalanmıştır. Zımparalama işleminde saf su kullanılmıştır. Zımparalama yapılan numuneler daha sonra 1 μm alümina süspansiyon kullanılarak yüzeyleri parlatılmış ve ardından KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM Metalografi Laboratuvarında Nikon Epiphot marka optik mikroskopta mikroyapıları incelenmiştir.

EZ43 alaşımlarının mikroyapısı incelendiğinde, eş eksenli bir yapı gözlenmiştir. Tane sınırlarında sürekli uzanan intermetalik fazlar gözükmemektedir. EZ43A açık gri renkli EZ43B ise koyu renkli intermetalik fazlardır. EZ43B alaşımı EZ43A alaşımından daha ince tanelidir. EZ43B nin tane boyutu 8.52 μm iken EZ43A'nın tane boyutu 9.01 μm . EZ43A alaşımının mikroyapıları şekil 4.2'de EZ43B alaşımının mikroyapıları ise şekil 4.3' de gösterilmiştir.



Şekil 4.2. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A alaşımının mikro yapı görüntüleri a) 10x, b) 20x, c) 50x, d) 100x

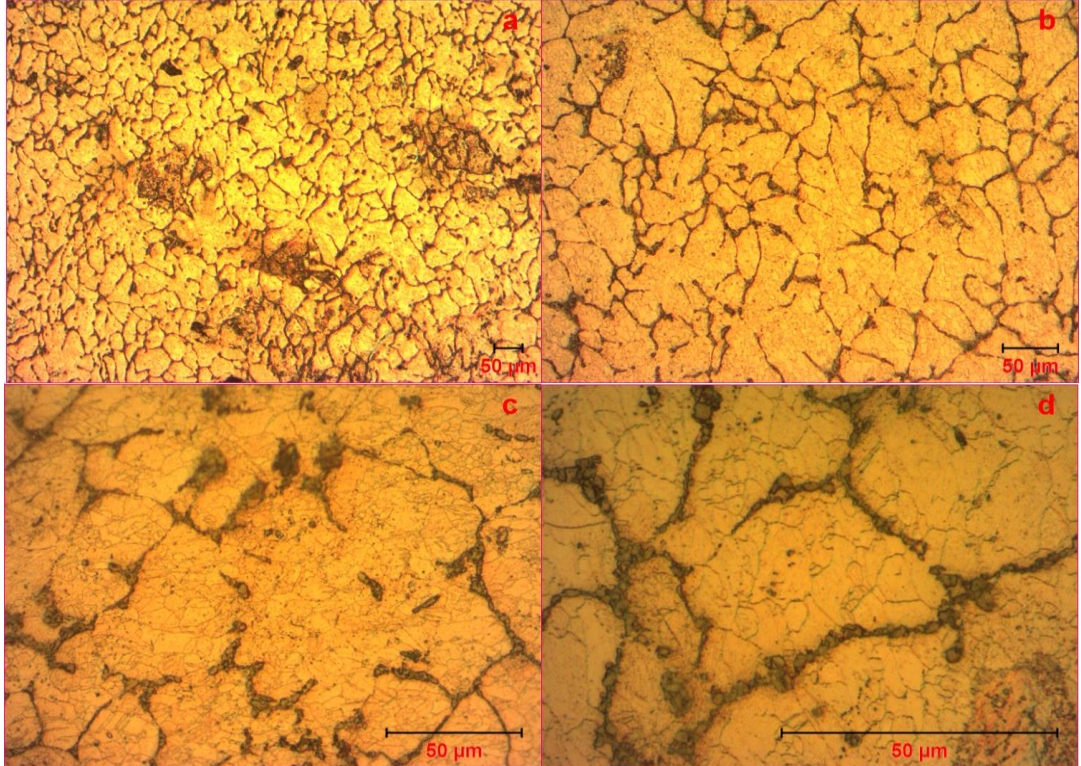


Şekil 4.3. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B Alaşımının Mikro yapı Görüntüleri a) X10, b) X20, c) X50, d) X100

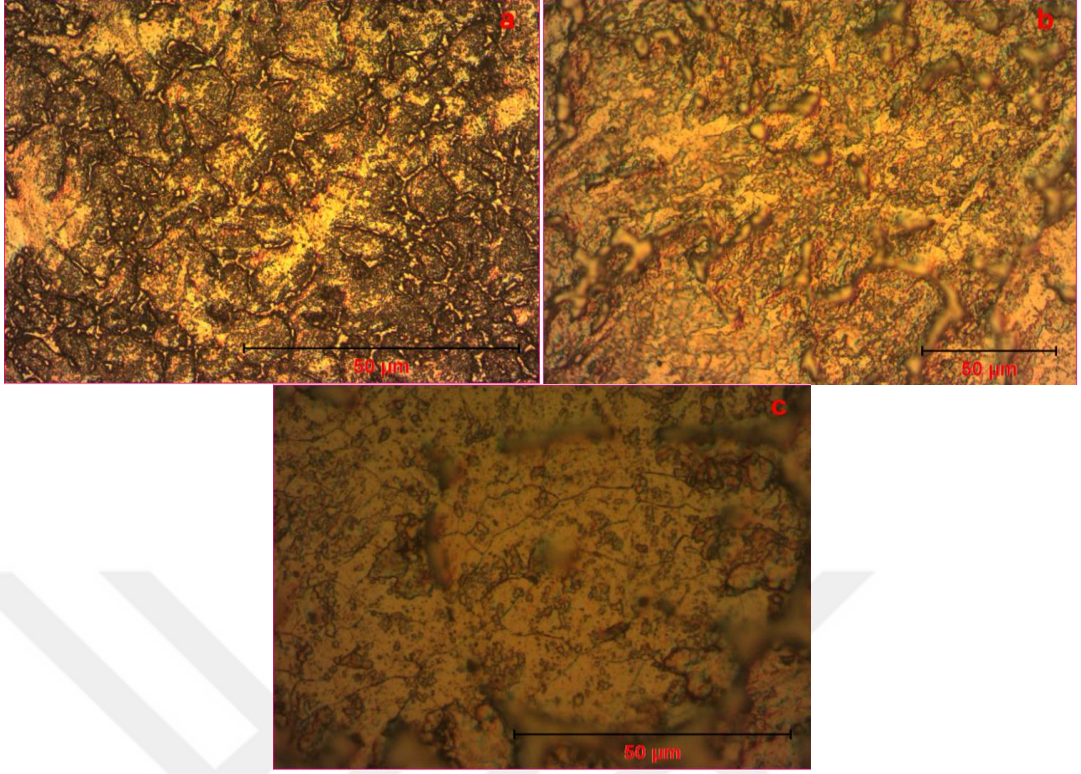
4.1.3. Bir Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Mikro Yapı Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ekstrüzyon işlemi sonrası bir kez dövme işlemi uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarından alınan parçalar, metalografik incelemeler için numune yüzeyleri sırası ile 400 mesh zımparadan başlayarak 2000 mesh zımpara dahil saf su kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra 1 μ m alümina süspansiyon kullanılarak yüzeyler parlatılarak KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM Metalografi Laboratuvarında Nikon Epiphot marka optik mikroskopta mikroyapıları incelenmiştir.

EZ43 alaşımlarının bir dövme sonrası mikroyapıları incelendiğinde, tane sınırlarında sürekli uzanan intermetalik fazlar gözükmemektedir. EZ43A açık gri renkli EZ43B ise koyu renkli intermetalik fazlardır. EZ43B alaşımı EZ43A alaşımından daha ince tanelidir. Bir kere dövme işlemi uygulanmış olan EZ43A alaşımının mikro yapıları şekil 4.4'te, EZ43B alaşımının Mikro yapıları ise şekil 4.5' de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. EZ43A alaşımına bir dövme işlemi sonrası uygulanan mikro yapı görüntüleri
a) 10x, b) 20x, c) 50x, d) 100x



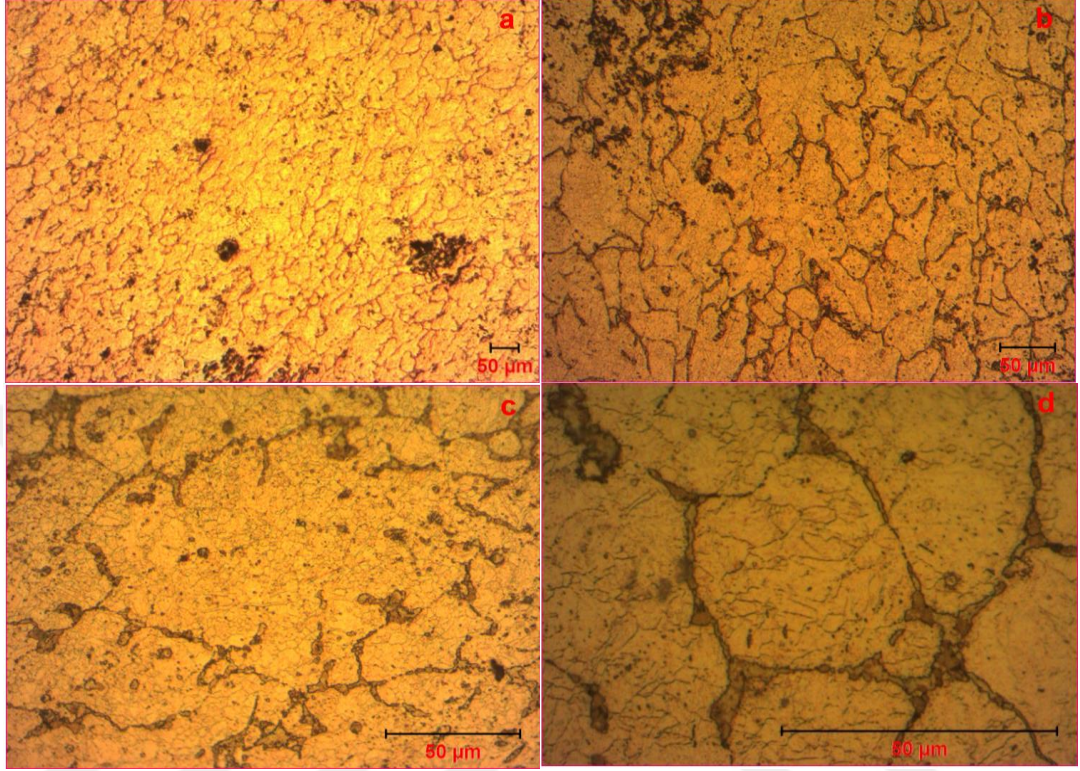
Şekil 4.5. EZ43B alaşıma bir dövme işlemi sonrası uygulanan mikro yapı görüntüleri
a)20x, b) 50x, c) 100x

4.1.4. İki Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Mikro Yapı Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ekstrüzyon işlemi sonrası bir kez dövme işlemi uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımları tavlama fırınında 280 c de tavlانarak ikinci kez dövme işlemine alınmış ve bu ikinci kez dövme işlemi uygulanmış alaşımlardan alınan parçalar, metalografik incelemeler için numune yüzeyleri yine sırası ile 400 mesh zımparadan başlanarak 2000 mesh zımparalar ile saf su kullanılarak zımparalanmıştır. Daha sonra 1 µm alümina süspansiyon kullanılarak alaşımın yüzeyleri parlatılmış ve sonrasında KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM Metalografi Laboratuvarında Nikon Epiphot marka optik mikroskopta mikroyapıları incelenmiştir.

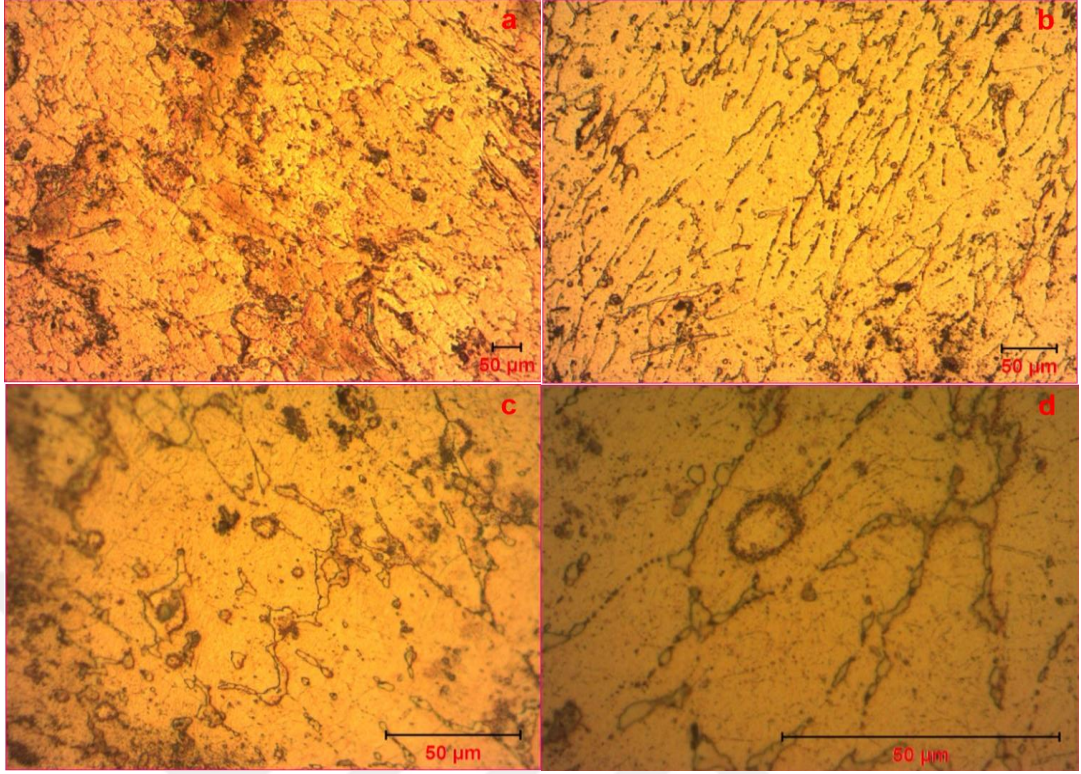
EZ43 alaşımlarının iki dövme sonrası mikroyapısı incelendiğinde, eş eksenli bir yapı gözlenmiştir. Tane sınırlarında sürekli uzanan intermetalik fazlar gözükmemektedir. EZ43A açık gri renkli EZ43B ise koyu renkli intermetalik fazlardır. Tane sınırlarında kopmaların olduğu gözükmemektedir. EZ43B alaşımı EZ43A alaşımından daha ince

tanelidir. İki kere dövme işlemi uygulanmış olan EZ43A alaşımının mikro yapıları Şekil 4.6'da EZ43B alaşımının Mikro yapıları ise Şekil 4.7' de gösterilmiştir.



Şekil 4.6. EZ43A alaşımına iki dövme işlemi sonrası uygulanan mikro yapı görüntüleri a)10x, b) 20x, c) 50x, d) 100x

EZ43 alaşımlarının mikroyapısı incelendiğinde, birinci dövme işlemi sonrasında iç yapıda deformeler olduğu görülmüş, ikinci dövme işlemi sonrası ise bu deformasyonların arttığı ve tane sınırlarında kopmaların meydana geldiği görülmüştür. Tane sınırlarında intermetalik fazlar gözükmemektedir. EZ43A açık gri renkli EZ43B ise koyu renkli intermetalik fazlardır. EZ43B alaşımının tane yapısının EZ43A alaşımının tane yapısına göre daha ince taneli olduğu gözlenmiştir.

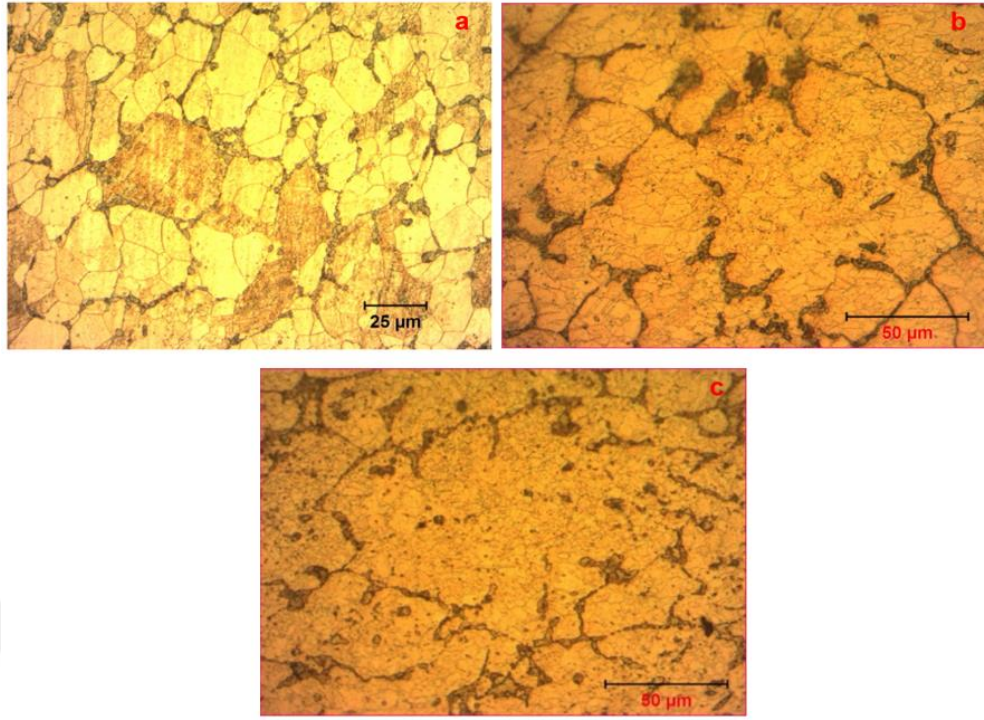


Şekil 4.7. EZ43B alaşımına iki dövme işlemi sonrası uygulanan mikro yapı görüntüleri a)10x, b) 20x, c) 50x, d) 100x

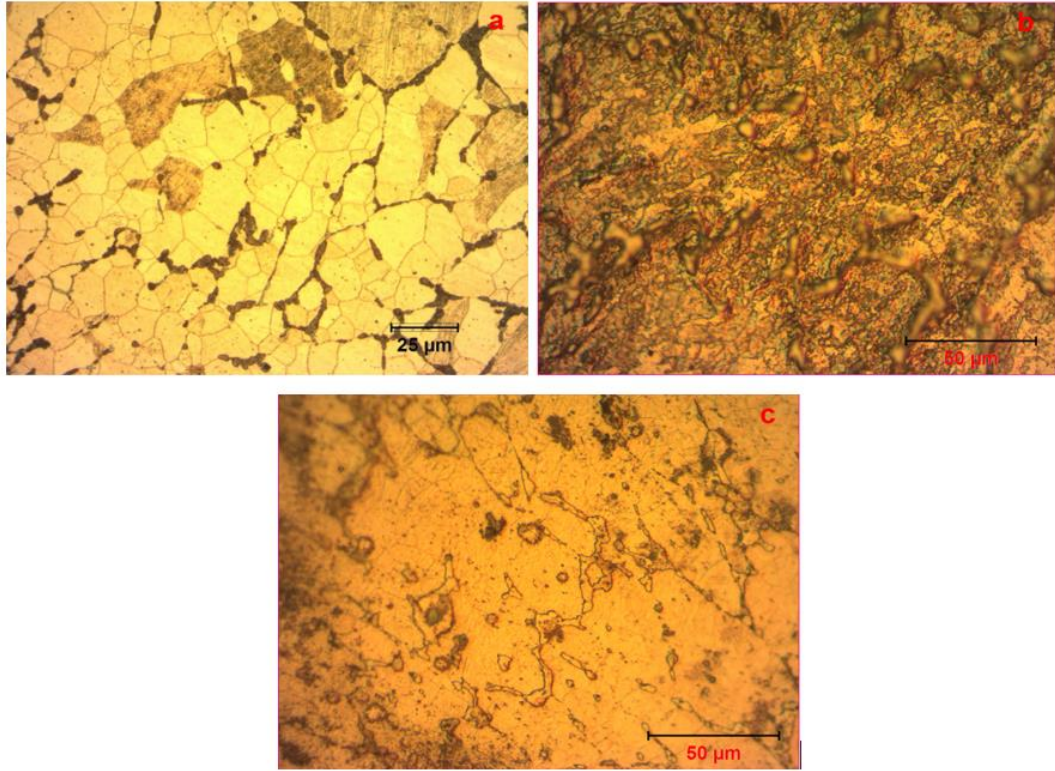
Mikro yapı görüntülerine baktığımızda birinci ve ikinci dövme sonrası tanelerin yayıldığı ve tane sınırlarının incelendiği görülmüştür. Ayrıca tane sınırlarında intermetalik fazların olduğu gözlemlenmektedir. Tane yapısı incelmıştır.

EZ43B alaşımının ekstrüzyon ve bir ile iki dövme işlemi sonrası mikro yapı karşılaştırması Şekil 4.9’da verilmiştir.

EZ43A alaşımının Ekstrüzyon sonrası ile bir ve iki dövme işlemi sonrası mikro yapı karşılaştırması şekil 4.8’de verilmiştir.



Şekil 4.8. EZ43A alaşımlarının mikro yapı görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (50x) b) Bir dövme işlemi sonrası (50x) c) İki dövme işlemi sonrası (50x)

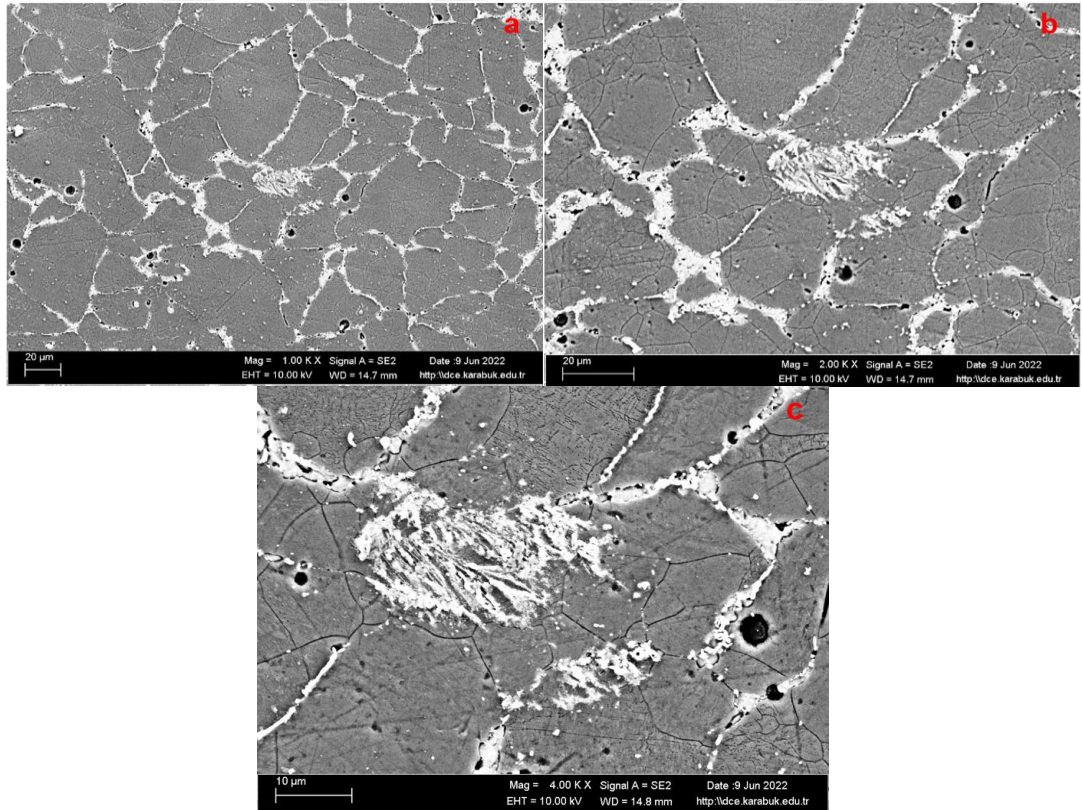


Şekil 4.9. EZ43B alaşımlarının mikro yapı görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (50x) b) Bir dövme işlemi sonrası (50x) c) İki dövme işlemi sonrası (50x)

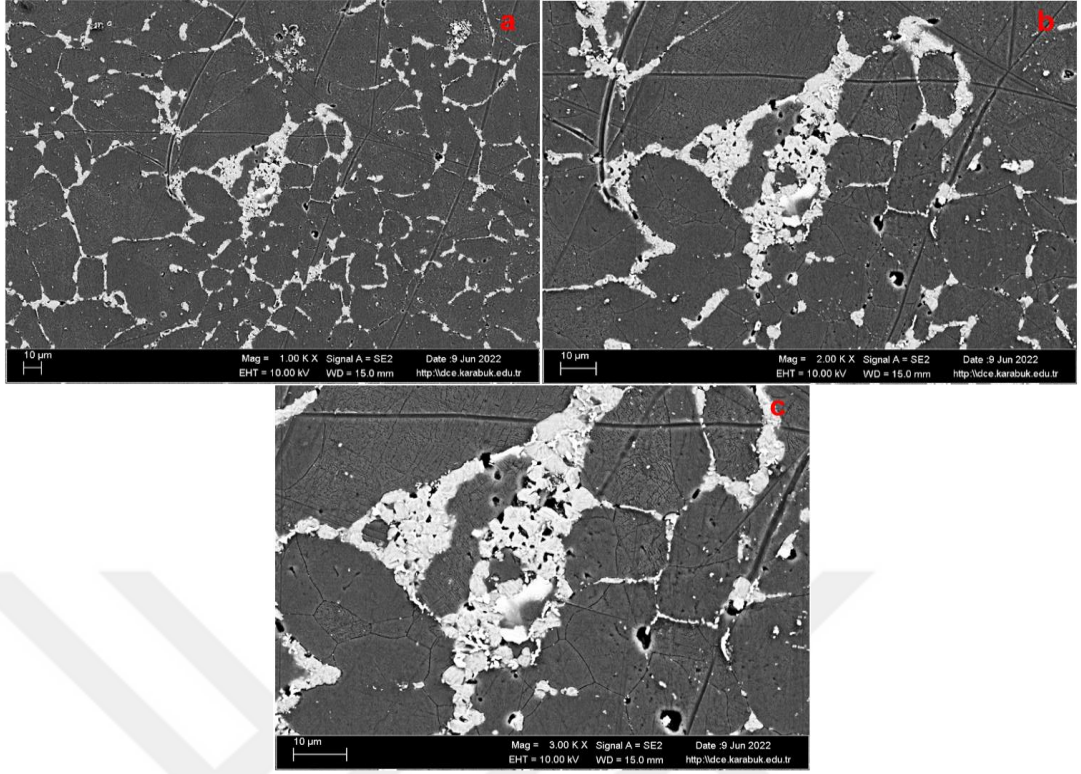
Mikro yapı görüntülerine baktığımızda birinci ve ikinci dövme sonrası tane sınırlarının hemen hemen kaybolduğu ve tane sınırlarında kaymaların meydana geldiği görülürken tanelerin uzadıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca tane sınırlarında intermetalik fazların olduğu gözlemlenmektedir.

4.1.5. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ekstrüzyon işlemi sonrası elde edilen numunelere mikro yapı incelemesi işleminden sonra SEM analizi görüntüleme işlemi yapılmıştır. SEM görüntüleme işlemleri KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM Metalografi Laboratuvarında bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. EZ43A alaşımının SEM analiz görüntüleri Şekil 4.10' da EZ43B alaşımının SEM analiz görüntüleri ise Şekil 4.11' de verilmiştir.

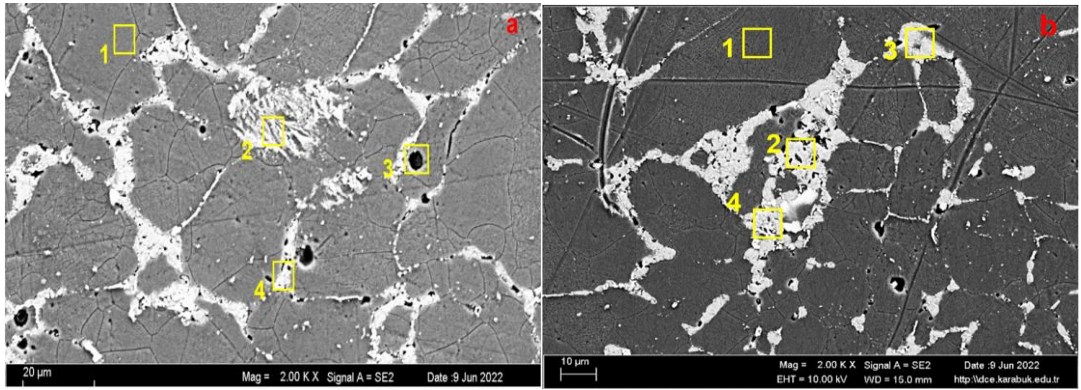


Şekil 4.10. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A alaşımının SEM analizi görüntüleri a) 1kx, b) 2kx, c) 4kx



Şekil 4.11. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımının SEM analizi görüntüleri a) 1kx b) 2kx c) 3kx

Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ait SEM-EDX görüntüleri Şekil 4.12 ve Çizelge 4.1 ile Çizelge 4.2’de sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.12. a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarının SEM-EDX spektrum görüntüleri (2kx)

Çizelge 4.1. EZ43A alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları

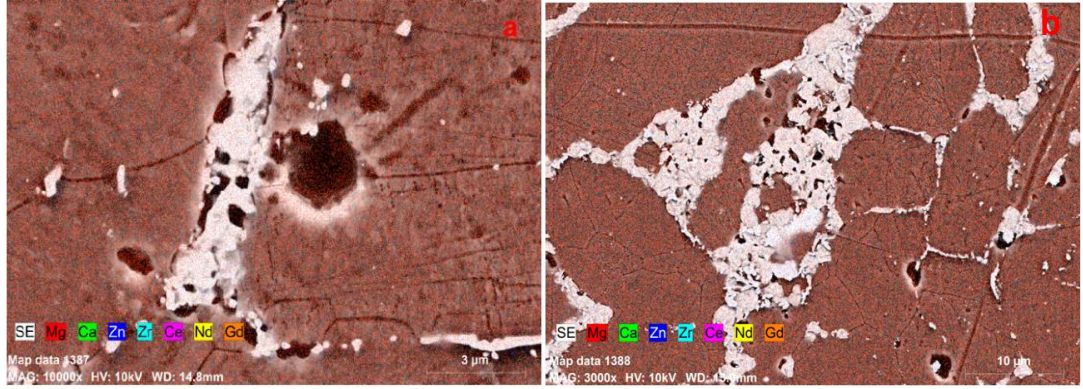
EZ43A Mass percent (%)							
Spc.	Mg	Ca	Zn	Zr	Ce	Nd	Gd
1	72.90	0.047	1.06	0.23	0.072	0.19	25.61
2	56.99	0.40	5.72	12.00	0.71	1.96	22.21
3	58.56	0.28	5.48	10.48	0.54	2.81	21.86
4	55.97	0.88	10.82	0.00	3.78	6.04	22.52

Çizelge 4.2. EZ43B alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.

EZ43B Mass percent (%)							
Spc.	Mg	Ca	Zn	Zr	Ce	Nd	Gd
1	72.92	0.20	1.09	0.08	0.05	0.00	25.64
2	54.59	0.53	12.28	0.00	7.93	3.62	21.03
3	42.89	0.42	19.13	0.06	12.1	5.94	19.35
4	26.71	0.45	33.58	0.00	3.05	14.07	22.14

SEM görüntülerinden ve EDX analiz sonuçlarından EZ43A alaşımına kıyasla EZ43B alaşımında daha yoğun intermetalik oluşumu belirlenmiştir. Ötektik karışım ve kompleks intermetalik fazların varlığını düşündüren yüksek konsantrasyonda alaşım elementleri gözlenmiştir. Tablolarda verilen EDX analiz sonuçları 1 nolu bölgelerin alfa Mg matris olduğunu ve yapısında Gd çözüldüğünü göstermektedir. Ayrıca 2-4 nolu alanların EDX analiz sonuçları EZ43A alaşımında tane sınırlarında $Mg_{0.97}Zn_{0.03}/Mg_{41}Nd_5/Mg_3Gd$ karma intermetaliklerden ternary ötektik yapının oluştuğunu gösterirken EZ43B alaşımının tane sınırlarında ise $Mg_{0.97}Zn_{0.03}/Mg_{41}Nd_5/Mg_3Gd/Mg_{17}Ce_2$ quaternary ötektik yapının oluştuğunu göstermektedir.

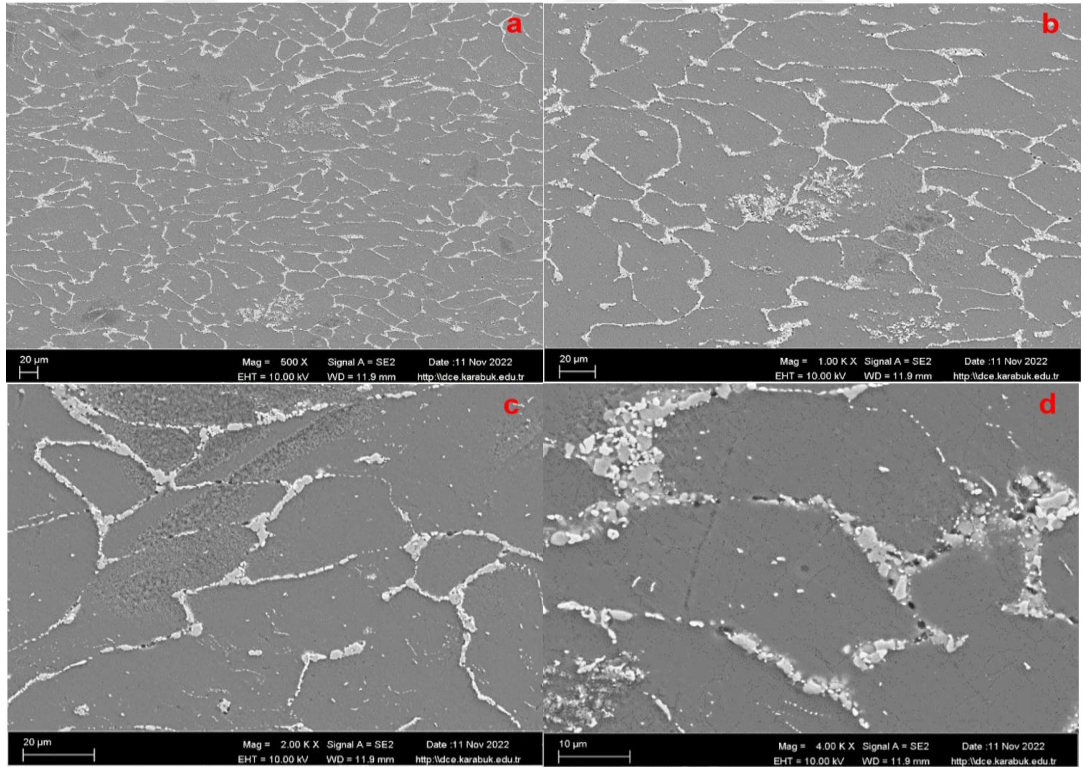
Ekstrüzyon İşlemi Sonrası EZ43A ve EZ43B Alaşımının MAP görüntüleri Şekil 4.13'te verilmiştir.



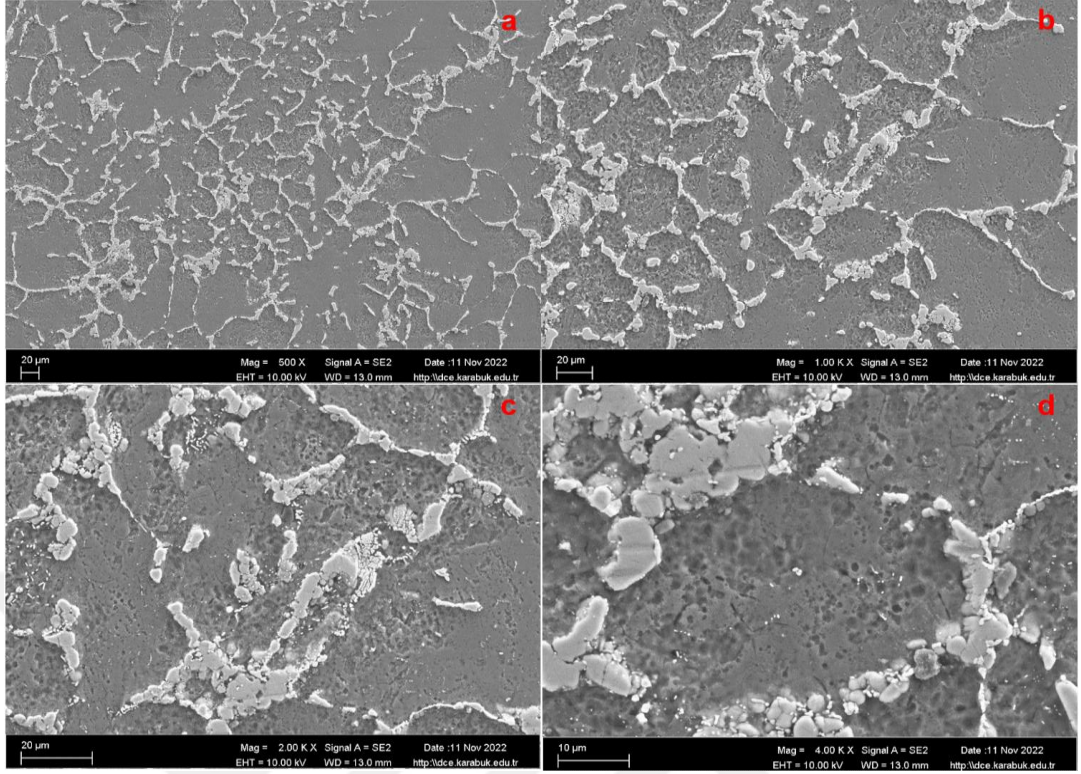
Şekil 4.13. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarının MAP görüntüsü

4.1.6. Bir Dövme İşlemi Sonrası Yapılan SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi

EZ43A alaşımlarının bir dövme sonrası SEM görüntüsü Şekil 4.14'te EZ43B alaşımlarının bir dövme sonrası SEM görüntüsü ise Şekil 4.15'te verilmiştir.

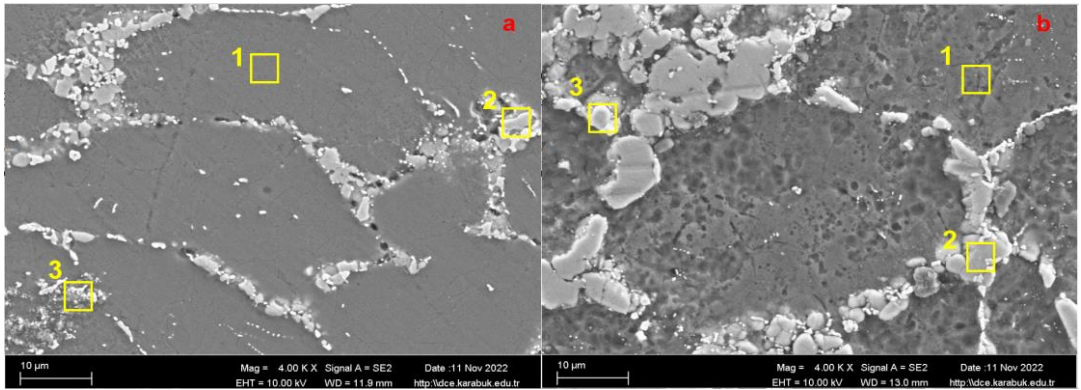


Şekil 4.14. EZ43A alaşımlarının bir dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a) 500x b) 1000x c) 2000x d) 4000x



Şekil 4.15. EZ43B alaşımlarının bir dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a) 500x b) 1kx c) 2kx d) 4 kx

Bir dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ait SEM- EDX görüntüleri Şekil 4.16 ve Çizelge 4.3 ile Çizelge 4.4'te sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.16. Bir dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait SEM-EDX görüntüleri

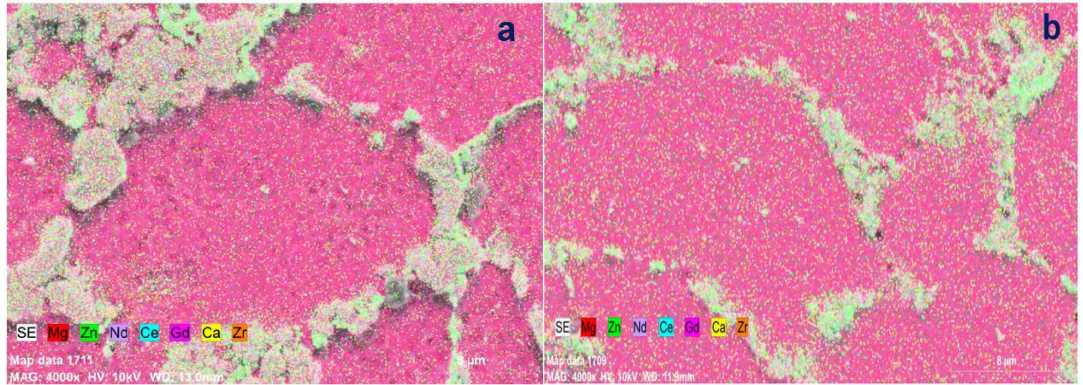
Çizelge 4.3. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.

EZ43A	Mass percent (%)						
Spc.	Mg	Ca	Zn	Zr	Ce	Nd	Gd
1	72.73	0.010	1.15	0.066	0.043	0.07	25.81
2	47.15	0.65	15.80	0.16	4.47	11.04	20.73
3	52.96	2.24	10.39	0.24	3.99	7.80	22.38

Çizelge 4.4. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.

EZ43A	Mass percent (%)						
Spc.	Mg	Ca	Zn	Zr	Ce	Nd	Gd
1	62.47	0.022	7.8	0.34	2.55	2.86	23.41
2	44.16	0.35	18.31	0.033	11.74	6.025	19.35
3	17.11	0.23	43.64	0.00	4.68	13.27	21.07

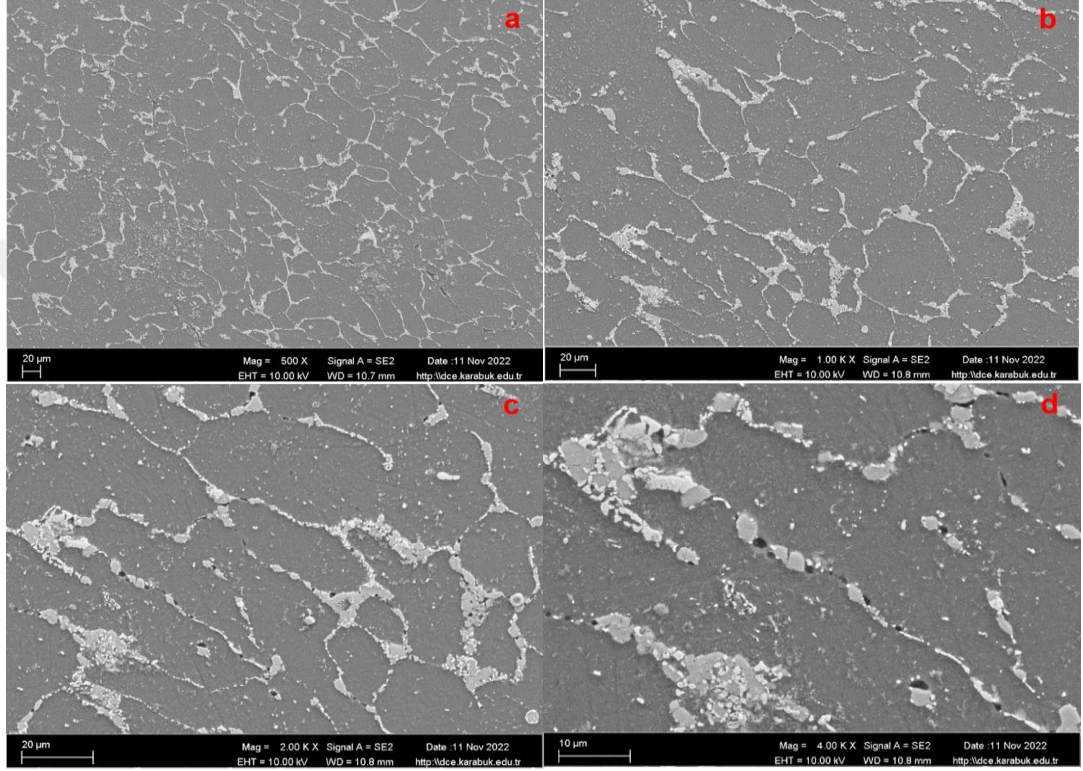
Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin MAP görüntüleri Şekil 4.17’ de verilmiştir.



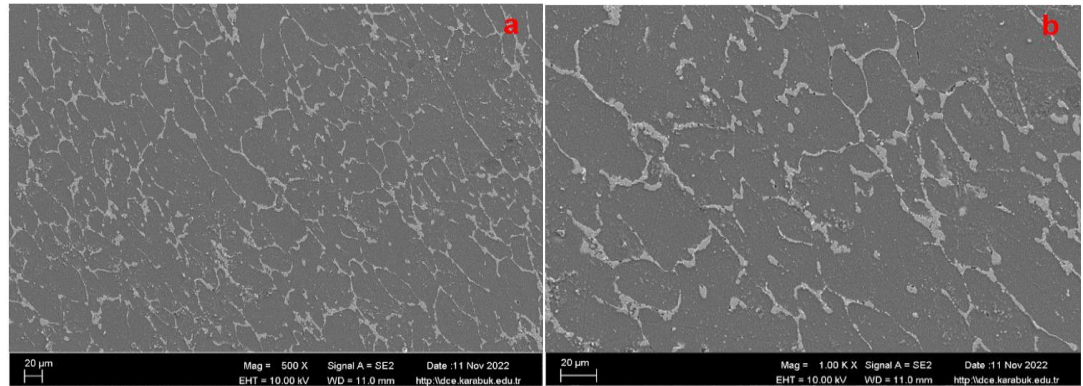
Şekil 4.17. Bir dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait MAP görüntüleri

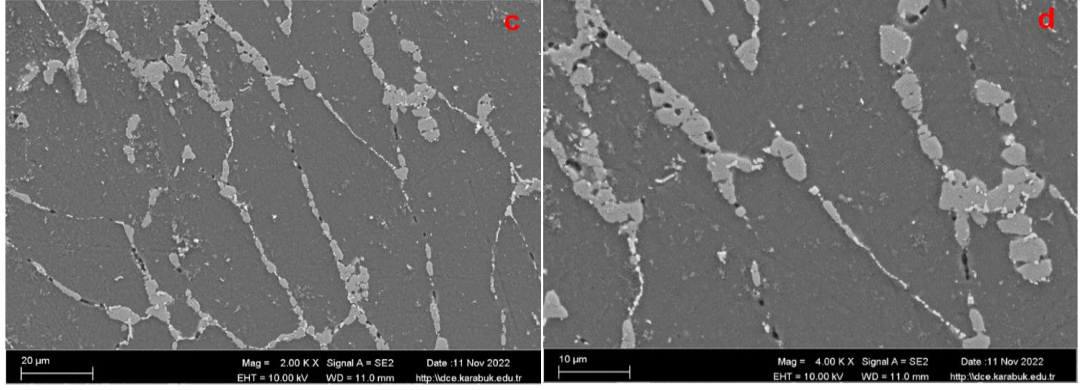
4.1.7. İki Dövme İşlemi Sonrası Yapılan SEM, EDX ve MAP Görüntüleme İşlem Sonuçları ve Değerlendirilmesi

EZ43A alaşımının iki dövme sonrası SEM görüntüsü Şekil 4.18’de EZ43B alaşımının iki dövme sonrası SEM görüntüsü ise Şekil 4.19’da verilmiştir.



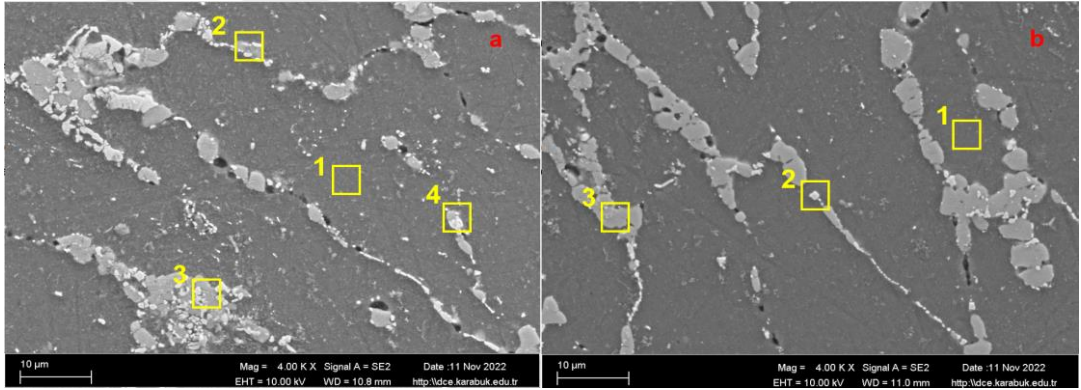
Şekil 4.18. EZ43A alaşımının iki dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a)500x, b)1kx, c) 2kx, d)4kx





Şekil 4.19. EZ43B alaşımasının iki dövme sonrası SEM analiz görüntüleri a)500kx, b) 1kx, c) 2kx, d)4kx

İki dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ait SEM- EDX görüntüleri Şekil 4.20 ve Çizelge 4.5 ile Çizelge 4.6’da sırasıyla verilmiştir.



Şekil 4.20. İki dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait SEM-EDX görüntüleri.

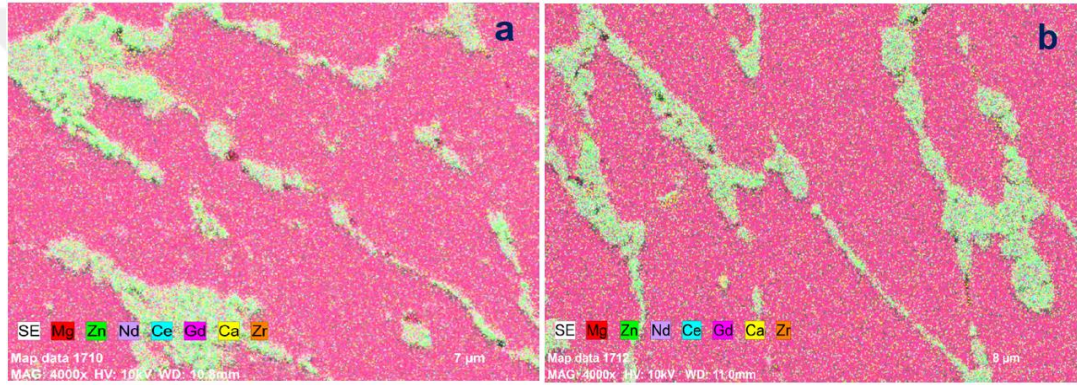
Çizelge 4.5. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımasının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.

EZ43A		Mass percent (%)					
Spc.	Mg	Ca	Zn	Zr	Ce	Nd	Gd
1	72.93	0.015	1.085	0.00	0.1	0.13	25.75
2	55.27	1.36	16.65	0.03	3.10	7.34	22.25
3	44.11	0.41	18.68	0.12	5.04	11.90	19.73
4	15.7	2.55	31.22	0.18	3.83	23.60	22.9

Çizelge 4.6. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımlarının SEM görüntüsünde seçilen alanların EDX spektrum sonuçları.

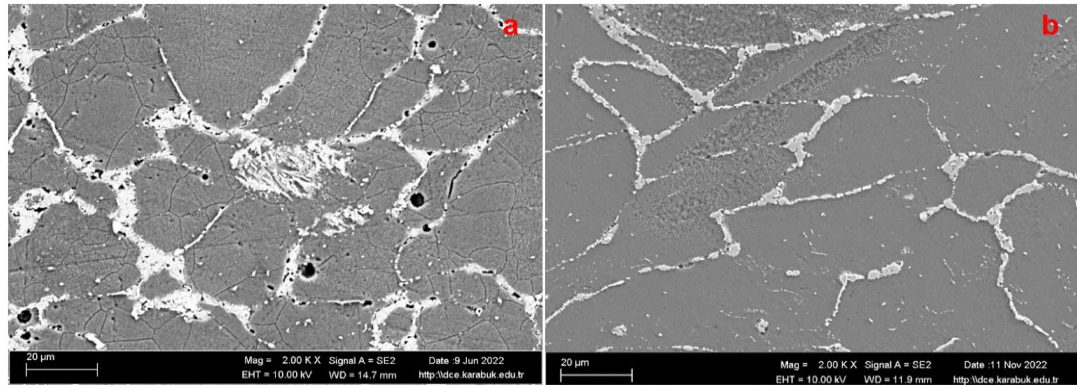
EZ43B	Mass percent (%)						
Spc.	Mg	Ca	Zn	Zr	Ce	Nd	Gd
1	72.52	0.18	2.08	0.06	0.15	0.32	24.70
2	38.80	0.26	18.11	14.94	2.07	4.88	21.00
3	44.80	0.39	17.29	0.11	12.2	6.3	18.96

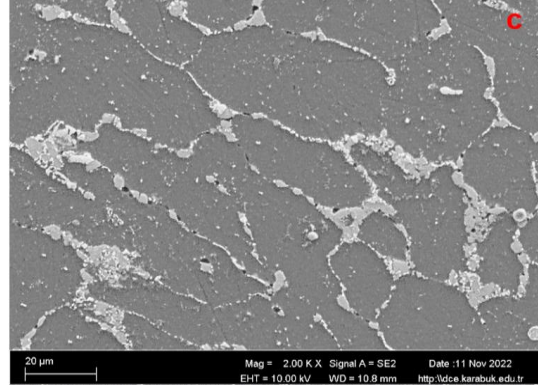
İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin MAP görüntüleri Şekil 4.21’ de verilmiştir.



Şekil 4.21. İki dövme işlemi sonrası a) EZ43A ve b) EZ43B alaşımlarına ait MAP görüntüleri

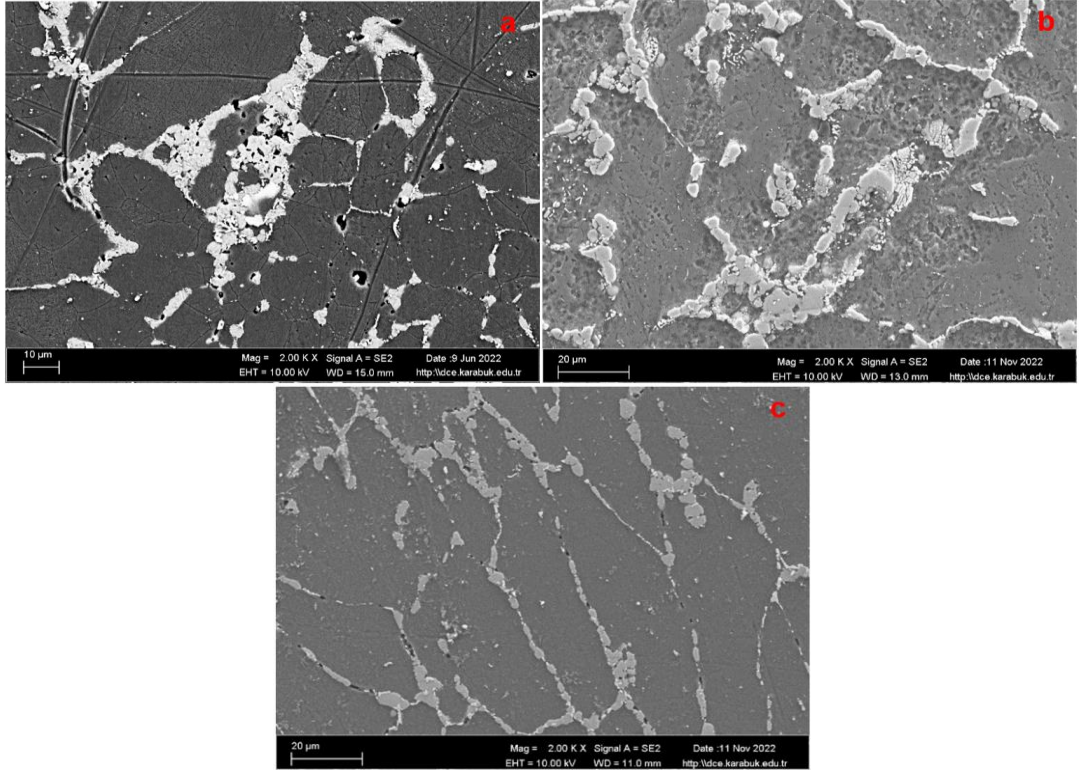
EZ43A alaşımlarının Ekstrüzyon ve bir ile iki yönlü dövme işlemi sonrası SEM analiz görüntülerinin karşılaştırması Şekil 4.22’de birlikte verilmiştir.





Şekil 4.22. EZ43A alaşımasının SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (2kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (2kx) c) İki dövme işlemi sonrası (2kx)

EZ43B alaşımasının Ekstrüzyon ve bir ile iki yönlü dövme işlemi sonrası SEM analiz görüntülerinin karşılaştırması şekil 4.23'te birlikte verilmiştir.

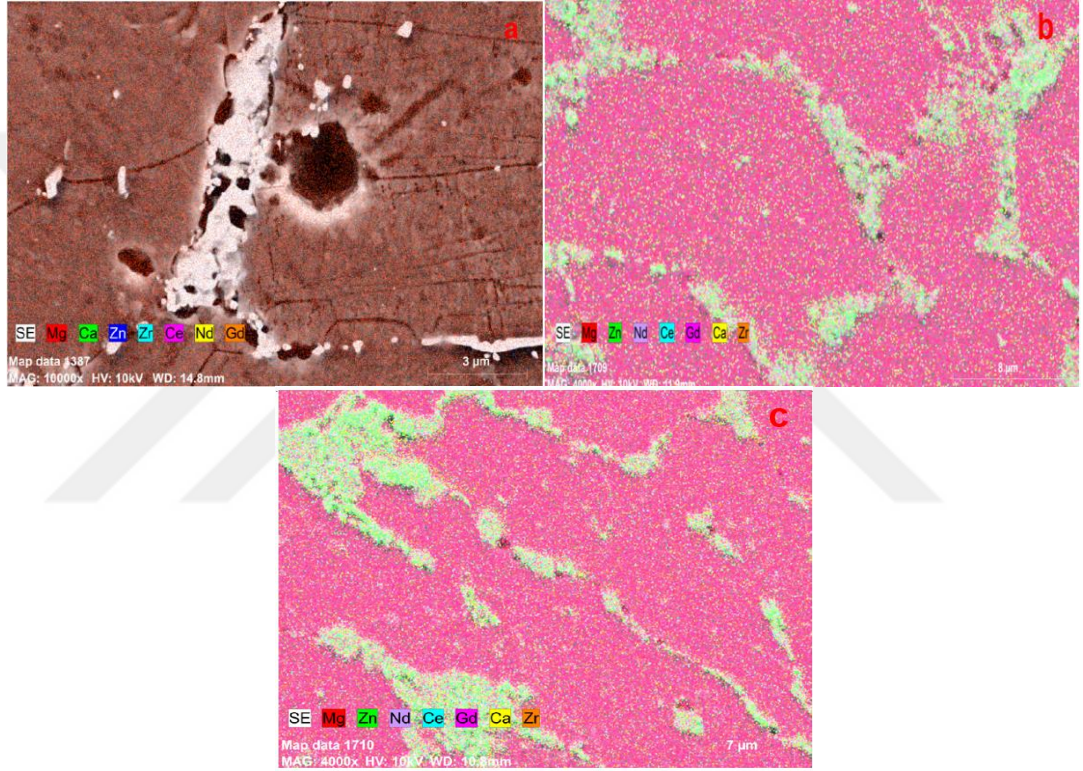


Şekil 4.23. EZ43B Alaşımasının SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (2kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (2kx) c) İki dövme işlemi sonrası (2kx)

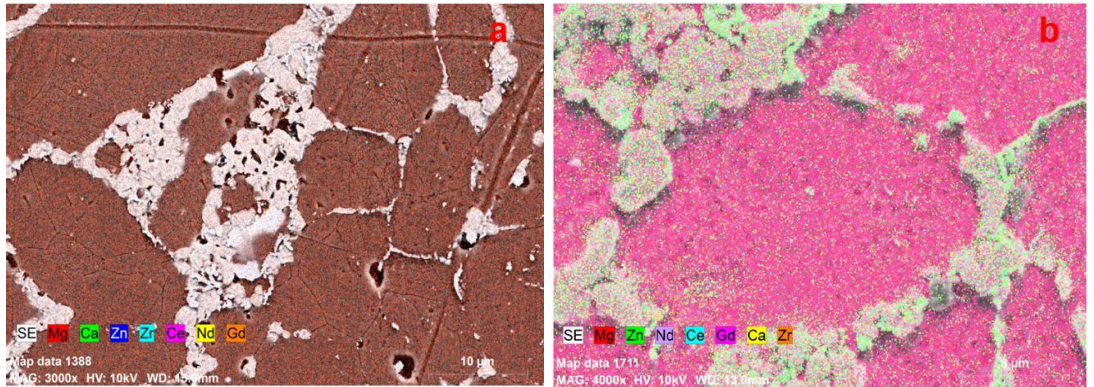
SEM görüntülerine baktığımızda birinci dövme sonrası tane sınırlarında kaymaların meydana geldiği görülürken, ikinci dövme sonunda tanelerin uzadıkları

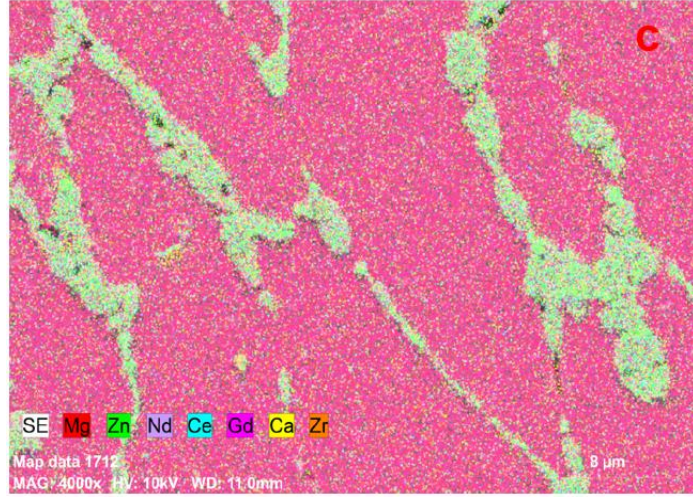
gözlemlenmiştir. Ayrıca tane sınırlarında intermetalik fazların olduğu gözlemlenmektedir.

EZ43A alaşımının ekstrüzyon ve bir ile iki yönlü dövme işlemi sonrası MAP görüntülerinin karşılaştırması Şekil 4.24'te, EZ43B alaşımının Ekstrüzyon ve bir ile iki yönlü dövme işlemi sonrası MAP görüntülerinin karşılaştırması ise Şekil 4.25'te birlikte verilmiştir.



Şekil 4.24. EZ43A alaşımının MAP Görüntüleri (a) Ekstrüzyon işlemi sonrası (b) Bir dövme işlemi sonrası (c) İki dövme işlemi sonrası





Şekil 4.25. EZ43B alaşımasının MAP görüntüleri (a) Ekstrüzyon işlemi sonrası (b) Bir dövme işlemi sonrası (c) İki dövme işlemi sonrası

4.2. MEKANİK ÖZELLİKLERİN KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Mekanik özelliklerin karakterizasyonu ile ilgili EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Ekstrüzyon sonrası sertlik, çekme ve kuru/korozif ortam aşınma testleri uygulanmıştır. Bir ve iki dövme işlemi sonrası ise sertlik ve kuru/korozif aşınma testleri uygulanmıştır.

4.2.1. Sertlik Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ekstrüzyon işlemine ve dövme işlemine tabi tutulmuş EZ43 alaşımlarının sertlik deneyi numuneleri her iki alaşımında merkezlerinden olmak üzere 20x20x20 mm boyutlarında çıkartılmış ve yüzeyleri uygun ölçülerde zımparalar ile zımparalanarak parlatılmıştır. Hazırlanan numunelere sertlik testi uygulanırken numunenin ölçüm yapılabilecek en dış noktasından merkezine kadar olacak şekilde eşit aralıklarda en az üç farklı nokta belirlenmiş ve belirlenen bu noktalardan sertlik ölçümü yapılarak elde edilen bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Numunelerin sertlikleri, KBÜ Mühendislik Fakültesi Laboratuvarlarında bulunan BMS 3000 - HB BRINELL marka Hardness Tester cihazında Brinell sertlik testi ile belirlenmiştir. Sertlik deneyi 750 kgf yük altında 5 mm bilya çapı ile 10 sn uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Yapılan sertlik testi sonucunda Çizelge 4.7’de gösterilen ortalama sertlik değerleri elde edilmiştir.

Çizelge 4.7. EZ43 alaşımlarının sertlik testi sonuçları

SERTLİK TESTLERİ	EZ43A	EZ43B
Ekstrüzyon sonrası	60.41	63.34
Bir dövme sonrası	74.92	75.60
İki dövme sonrası	74.95	78.27

Alaşımların sertlik değerlerine baktığımızda bir ve ikinci dövme arasında kayda değer bir değişimin olmadığı gözlemlenirken Ekstrüzyon sonrası alınan sertlik değeri ile çok yönlü dövme sonrası alınan sertlik değerleri arasında ekstrüzyon sonrası ölçülen sertlik değerlerine göre EZ43A numunesinde %25 EZ43B numunesinde ise %28'lik bir artış söz konusu olmuştur. EZ43A alaşımının sertlik değeri ile EZ43B alaşımının sertlik değerleri arasındaki fark küçük olup seryum 'un (Ce) artışıyla EZ43B alaşımında tane sınırlarında oluşan intermetalik fazlarının yoğun olmasından dolayı batıcı ucun batmasına karşı düşük miktarda direncin oluşumuna dayandırılabilir. Tong ve arkadaşları % 0.5 Ce ilavesine kadar çekme testi özelliklerinin arttığını ve % 1 Ce ilavesi ile dayanımının düştüğünü rapor etmişlerdir (Tong vd., 2016). Bu çalışmada maksimum ilave edilen Ce miktarı % 2 olup oluşan intermetaliklerin sertlik üzerinde %5 oranında iyileşme gösterdiği gözlenmiştir.

4.2.2. Çekme Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A ve EZ43B alaşımlarından 30 mm x 5 mm ölçülerinde şekil 4.26'da verilen köpek kemiği şeklinde olan numuneden her bir alaşım için 5 adet çekme numunesi hazırlanmıştır. Numunelerin çekme testleri KBÜ Laboratuvarlarında Shimadzu marka 5 ton çekme kapasitesine ayarlanabilen çekme cihazında 1 mm/dakika çekme hızında gerçekleştirilmiştir.

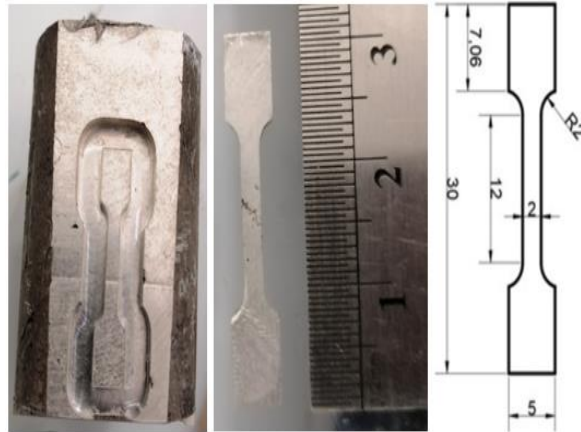
Çekme testi sonucunda elde edilmiş olan gerilme -uzama diyagramlarından elde edilen akma ve çekme dayanımları ile elastisite modülü değerleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

Çizelge 4.8' de verilen bu sonuçlara göre, Ce/Nd oranı 0,5 olan EZ43A alaşımının akma dayanımının 199,18 MPa, Ce/Nd oranı 2 olan EZ43B alaşımının akma dayanımının ise 202,88 MPa olduğu görülmektedir. Ayrıca EZ43A alaşımının çekme

dayanımının 242,30 Mpa, EZ43B alaşımının ise 257,13 Mpa olduğu görülmektedir. Elastik modülüne baktığımızda ise EZ43A alaşımının elastik modülünün 103,13 Gpa, EZ43B alaşımının ise 115,80 Gpa olduğu görülmektedir. İncelenen alaşımlarda Ce/Nd oranı arttıkça $Mg_{0.97}Zn_{0.03}/Mg_{41}Nd_5/Mg_3Gd/Mg_{17}Ce_2$ kuaterner ötektik yapısındaki artışa bağlı olarak EZ43B alaşımının mukavemet özelliklerinin bir miktar arttığı gözlemlenmiştir. Rogal ve diğerlerinin (Rogal vd., 2019) ve Tong ve diğerlerinin (Tong vd., 2016) [1] bulguları bu araştırmanın bulgularıyla benzerlik göstermektedir. Tong ve diğerleri (Tong vd., 2016) çekme testi özelliklerinin 0,5 Ce/La oranına kadar arttığını ve 1 Ce/La oranının eklenmesiyle mukavemetin azaldığını bildirmiştir. Bu çalışmada, eklenen maksimum Ce/Nd oranı 2 iken, oluşan ötektik intermetaliklerin sertliğinde %5'lik bir iyileşme göstermiştir.

Çizelge 4.8. EZ43 alaşımlarının akma-çekme dayanımları ile yüzde uzama değerleri

Numune	Elastisite Modülü (GPa)	Akma Mukavemeti %0,2 (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)
1 EZ43A	103.13	199.18 MPa	242.30 MPa
2 EZ43B	115.80	202.88 MPa	257.13 MPa



Şekil 4.26. Çekme deney numunesi

4.2.3. Aşınma Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Aşınma testi olarak EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Ekstrüzyon sonrası ve bir dövme işlemi sonrası kuru ve koroziif ortam aşınma testleri uygulanmış, İki kere dövme işlemi sonrası ise EZ43A alaşımına kuru ve koroziif ortam aşınma testi uygulanmış olup EZ43B alaşımından iki dövme işlemi sonrası gerekli ölçülerde numune alınamadığı için kuru ve koroziif ortam aşınma testi uygulanamamıştır.

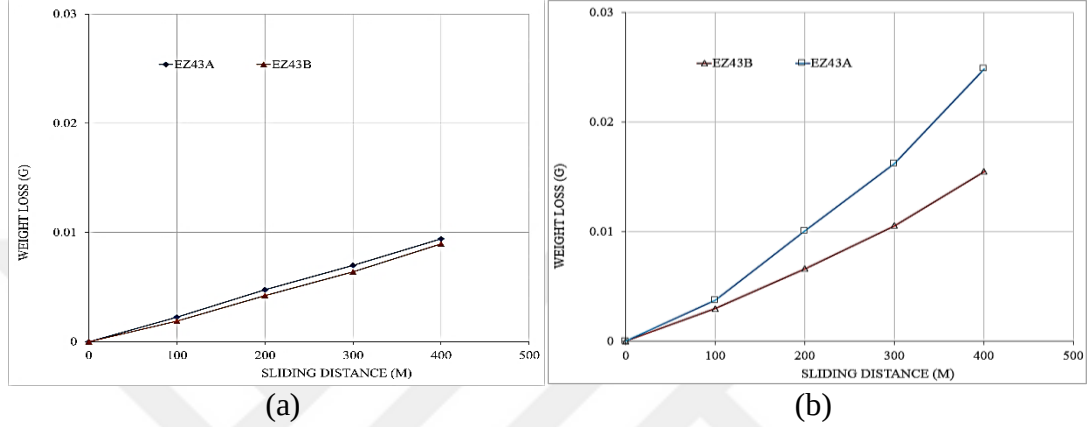
4.2.3.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Aşınma Testi ve Değerlendirilmesi

Aşınma testleri kuru ve koroziif ortam olmak üzere iki farklı çevrede gerçekleştirilmiştir. Her iki aşınma yönteminde de 20 Newton yük kullanılmış olup 100 m aralıklarla toplamda 400 m kayma mesafesinde 0.48 m/dk. kayma hızında gerçekleştirilmiştir. Aşınma testlerinde karşı yüzey olarak 6 mm çapında 100 Cr6 kalite çelik bilya kullanılmıştır. Aşınma testi öncesi numune yüzeyleri 400-1200 grit zımpara ile zımparalandıktan sonra alkol ile temizlenmiştir.

Aşınma deneylerinde her bir 100 metre kayma mesafesinden sonra 0,1 mg hassasiyetine sahip dijital hassas terazide ağırlıkları ölçülmüştür. Hassas terazide ağırlık kaybının ölçümü öncesinde numune saf su ve metil alkol ile temizlenerek kurutucu ile kurutulduktan sonra ağırlık kaybı ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm sonucunda alınan veriler kayıt altına alınarak kayma mesafesine göre ağırlık kaybı değişim grafikleri çıkarılmıştır. Koroziif aşınma testi, numune ve aşındırıcı çelik bilye birlikte, asitlik derecesi 7.4 pH olan NaCl 8.0 g/l, KCl 0.4 g/l, CaCl₂ 0.14 g/l, NaHCO₃ 0.35 g/l, C₆H₆O₆ (glucose) 1.0 g/l, MgCl₂·6H₂O 0.1 g/l, MgSO₄·7H₂O 0.06 g/l, KH₂PO₄ 0.06 g/l, Na₂HPO₄·12H₂O 0.06 g/l. bileşime sahip Hank sıvısı içerisinde iken gerçekleştirilmiştir. Aşınma testleri sonrasında kompozitlerin aşınma mekanizmalarını belirlemek için detaylı SEM ve elementel mapping (MAP) analizleri yapılmıştır.

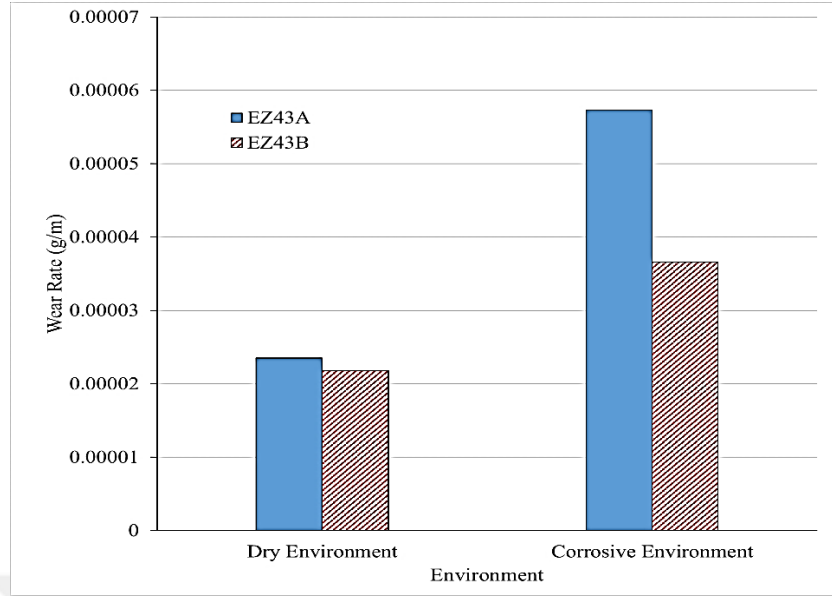
Hem kuru ortam hem de koroziif ortam aşınma testinde %1 Ce ilave edilen EZ43A numunesinin ağırlık kaybı değerleri %2Ce ilave edilen EZ43B numunesininkilerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ekstrüzyon işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının kuru aşınma sonuçlarına baktığımızda EZ43A numunesi EZ43B numunesine göre % 7.8 daha fazla aşınmıştır. Ayrıca Koroziif ortam ağırlık kayıpları

kuru ortam ağırlık kayıplarından belirgin bir şekilde yüksektir. AZ43A numunesi, kuru ortama kıyasla, korozi ortamda %144 daha fazla aşınmıştır. EZ43B numunesi ise kuru ortama kıyasla, korozi ortamda %68 daha fazla aşınmıştır. İncelenen numunelerin korozi aşınma sonuçları kendi içerisinde incelendiğinde, EZ43A alaşımının EZ43B alaşımından % 56 daha fazla korozi ortamda aşınma gösterdiği görülmüştür.



Şekil 4.27. Ekstrüzyon işlemi uygulanmış olan EZ43 alaşımının (a) kuru ortam ve (b) Korozi ortam aşınma deney sonuçları

Şekil 4.27’de verilen ağırlık kaybı-kayma mesafesi eğrilerinin eğimi, g/m cinsinden aşınma hızını vermekte olup incelenen malzemelerin aşınma hızları değişimi Şekil 4.28’de verilmiştir. Şekil 4.28’de görüldüğü üzere kuru aşınma kayıplarının korozi ortam aşınma kayıplarından daha düşük ve EZ43B alaşımının aşınma kaybının EZ43A alaşımının aşınma kayıplarından düşük olduğu desteklenmiştir.



Şekil 4.28. İncelenen alaşımların aşınma hızlarının değişimi.

İncelenen alaşımlarının Şekil 4.28’de verilen aşınma hızı verileri kullanılarak, kuru ortamda aşındırılan EZ43A alaşımının aşınma katsayısı 1 alınarak diğerlerin rölatif aşınma davranışlarının karşılaştırılması Çizelge 4.9’da verilmiştir. Çizelge 4.9’a göre kuru ortam EZ43A alaşımına %1 Ce ilave edilmesi % 1 Nd nin azaltılması (EZ43B) durumunda aşınma katsayısı 0.93 değerine gerilemiş, aşınma ortamı koroziif ortama değiştirilmesi halinde EZ43A’nın rölatif aşınma davranışı 2.44 değerine yükselmiş ve koroziif ortamda Ce miktarının % 2’ye artırılması, Nd miktarının %1’e düşürülmesi (EZ43B) ile aşınma katsayısı tekrar 1.56 değerine gerilemiştir.

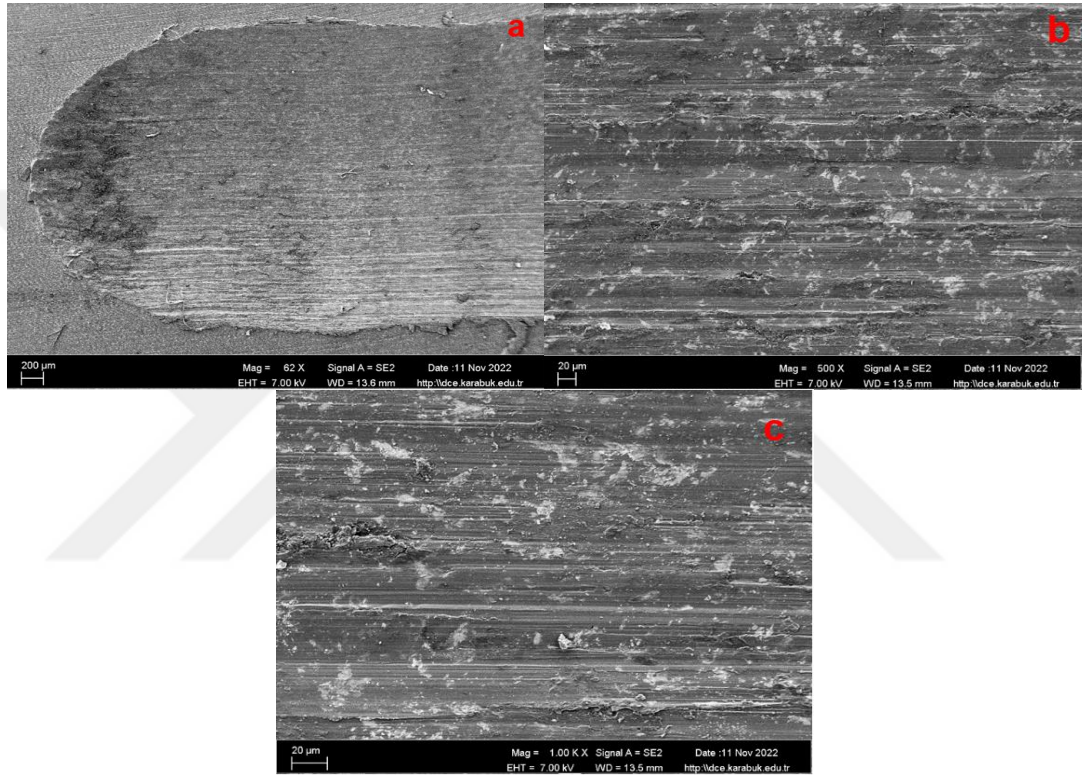
Çizelge 4.9. İncelenen alaşımların rölatif aşınma davranışlarının karşılaştırılması

Ortam	Alaşım Tipi	Aşınma Davranışı
Kuru ortam	EZ43A	1.00
	EZ43B	0.93
Koroziif ortam	EZ43A	2.44
	EZ43B	1.56

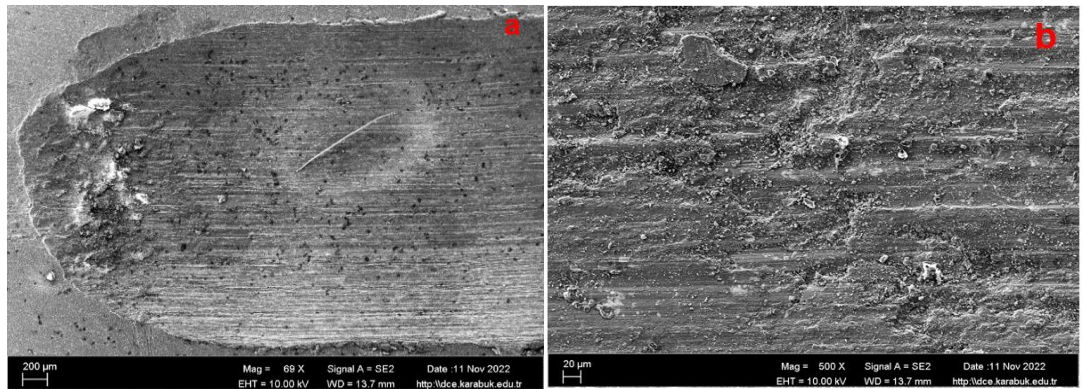
İncelenen EZ43B numunelerinin EZ43A numunelerine kıyasla, aşınma dirençlerinin daha iyi olması daha fazla ilave edilen Ce’nin yapıda oluşturduğu quaternary ötektik intermetalik fazlarının yoğunluğundan kaynaklandığı düşünülmektedir.

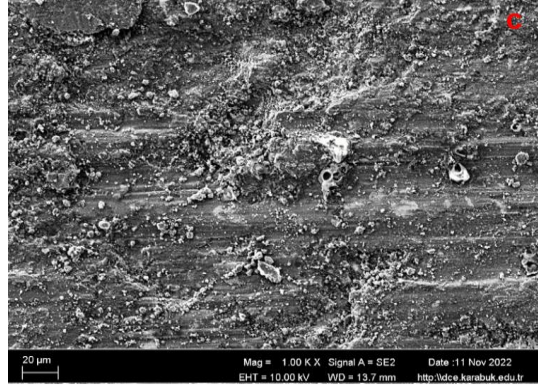
Kuru ortam aşınma deneyi sonrası EZ43A ve EZ43B numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.29 ve 4.30’da verilmiş olup, koroziif ortam aşınma deneyi sonrası EZ43A ve EZ43B numunelerin SEM görüntüleri Şekil 4.31 ve 4.32’de verilmiştir. Şekil 4.29 ve 4.30’da verilen kuru ortam SEM görüntüleri aşınmanın yiv oluşumu ile geliştiğini ve EZ43A alaşımının aşınmış yüzey görünümüne kıyasla EZ43B alaşımının SEM görüntüsünde yüzeye yapışmış pürüzlü bölgelerin varlığı gözlenmektedir. Pürüzlü aşınmış yüzey SEM görüntüsü adhezyon aşınma mekanizmasının var olduğunu işaret ederken, pürüzsüz yivli yüzey (EZ43A alaşımının SEM görüntüsü) abrasif aşınma mekanizmasının var olduğunu göstermektedir. Şekil 4.31 ve 4.32’de verilen koroziif ortam SEM görüntülerine göre EZ43B alaşımının aşınma yüzeyinde oksijence zengin bölgelerinin daha yoğun olduğunu göstermektedir.

Şekil 4.33'te incelenen alaşımların kuru ortam aşınmış yüzeylerinin element haritalama analiz sonucu verilmiştir. Şekil 4.32'de görüldüğü gibi, EZ43B alaşımının aşınma yüzeyinde oksijence zengin bölgelerinin daha yoğun olması yüzeye oksitli filmin yapıştığını gösterirken EZ43A alaşımının aşınmış yüzey MAP analizi, oksit filminden ziyade, Mg element dağılımını göstermesi aşınma süresince ana matris yapının sürekli yüzeye çıktığını göstermektedir.

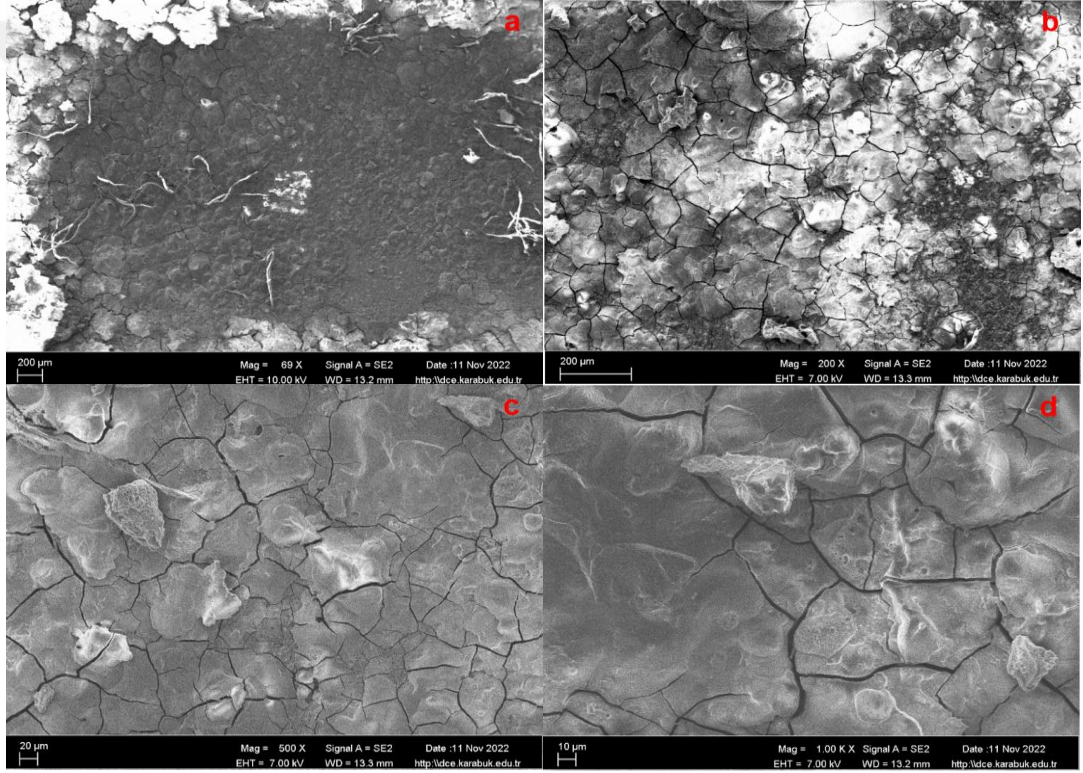


Şekil 4.29. Ekstrüzyon işlemi sonrası aşınma testi uygulanan EZ43A alaşımlarının kuru ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro b) 500x c) 1kx

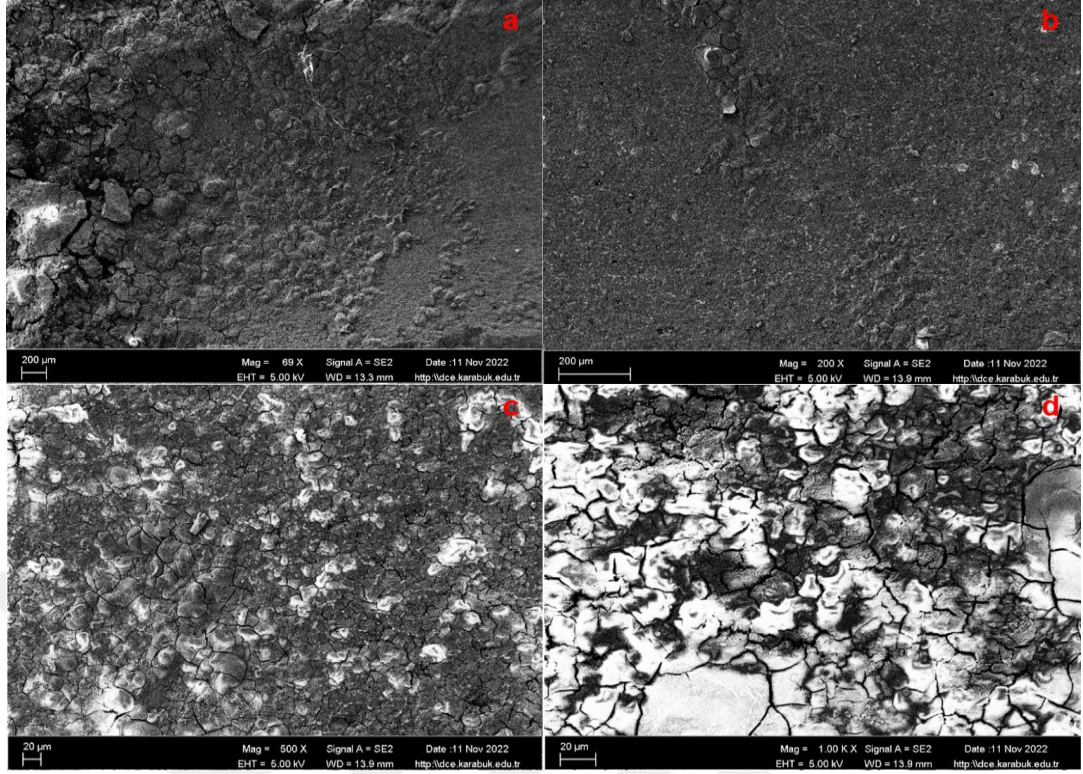




Şekil 4.30. Ekstrüzyon işlemi sonrası aşınma testi uygulanan EZ43B alaşımlarının kuru ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro b) 500x c) 1 kx

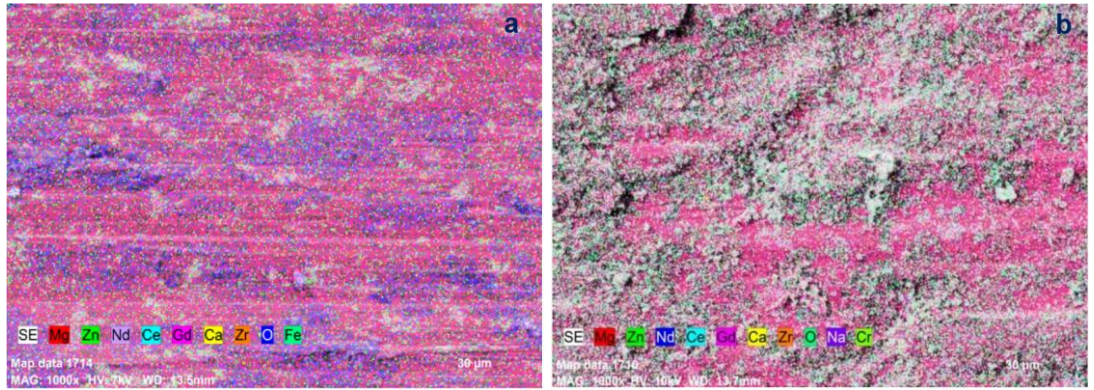


Şekil 4.31. Ekstrüzyon işlemi sonrası aşınma testi uygulanan EZ43A alaşımlarının Koroziv ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro b) 200x c) 500x d) 1kx



Şekil 4.32. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımlarının korozyif ortam aşınma testi sonrası SEM görüntüleri a) makro, b) 200x, c) 500x, d) 1 kx

Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A ve EZ43B alaşımlarının kuru ortam aşınmış yüzeylerinin element haritalama analizi görüntüsü Şekil 4.33’te verilmiştir.



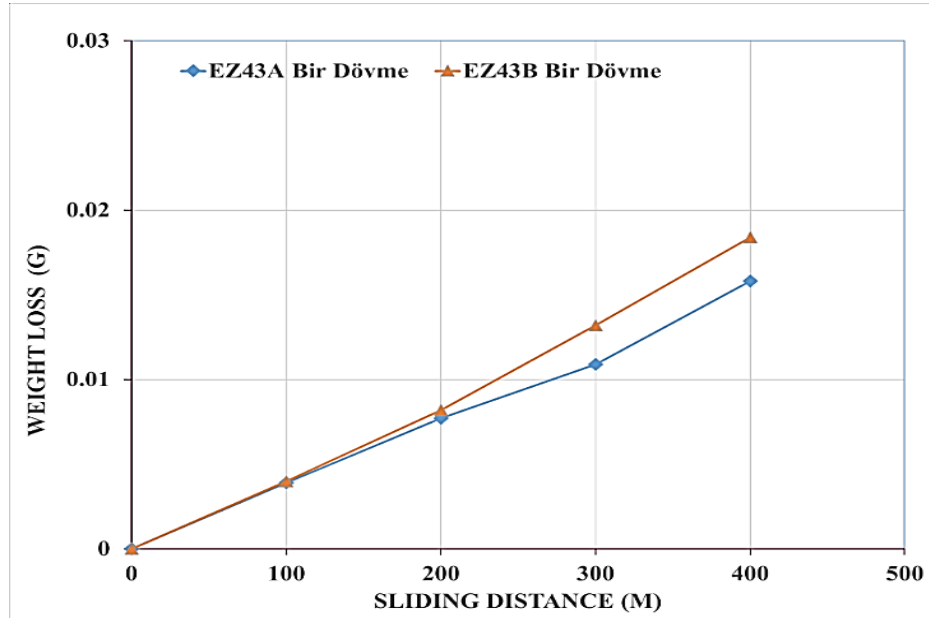
Şekil 4.33. (a) EZ43A ve (b) EZ43B alaşımlarının kuru ortam aşınmış yüzeylerinin element haritalama analizi görüntüsü (1kx)

Alaşımların korozyif ortam aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde, EZ43A alaşımının düz, parlak yüzey sergilediğini ve EZ43B alaşımının ise aşınma sonrasında pürüzlü bir yüzey geride bıraktığı görülmektedir. Tong ve arkadaşları; Mg-Zn-Ca

alaşımına Ce ilavesi ile korozyon davranışını incelemişler ve % 0.5 Ce ilavesi ile yüzeyde oksit filminin oluştuğunu, bu oksit filmi ile birlikte oluşan oyuklar ile kırıkların korozyon davranışını hızlandırdığını rapor etmişlerdir (Tong vd., 2016). Şekil 4.32’de verilen %2Ce içeren EZ43B alaşımının aşınmış yüzeyinde küresel ve yüzeye yapışmış parçacıkların görülmesi, aşınma süresince oluşan korozyon ürünlerinin uygulanan yük ile yüzeyde bir oksit tabakasının kalmasına yol açtığı düşünülmektedir. Bu durum korozif ortamda EZ43B alaşımının aşınma direncini kuru ortama kıyasla belirgin bir şekilde iyileştirmiştir.

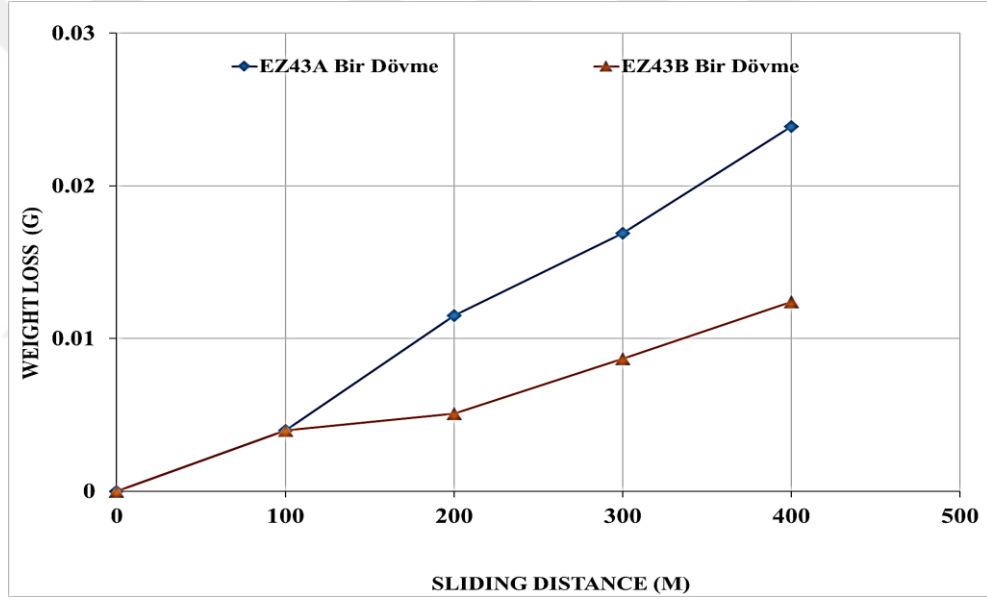
4.2.3.2. Bir Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Aşınma Testi ve Değerlendirilmesi

EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Ekstrüzyon sonrası bir kere dövme işlemi uygulanmış ve bu dövme işleminden sonra numunelere Adhezif ve korozif aşınma testleri uygulanarak SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. Bir kere dövme işlemi sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği Şekil 4.34’te, korozif aşınma grafiği ise Şekil 4.35’te verilmiştir.



Şekil 4.34. Bir kere dövme işlemi sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği

Ağırlık kaybı–Mesafe eğrisinde Adhezif aşınma eğrilerine bakıldığında EZ43A numunesinin EZ43B numunesine göre mesafeye bağlı ağırlık kaybının daha düşük olduğu görülmektedir. Buradan, EZ43A numunesinin EZ43B numunesine göre adhezif aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmaktadır. Ağırlık kaybı–Mesafe eğrisinde koroziif aşınma eğrilerine bakıldığında, EZ43A numunesinin EZ43B numunesine göre mesafeye bağlı ağırlık kaybının daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan, EZ43B numunesinin EZ43A numunesine göre koroziif aşınmaya karşı da daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca Ağırlık kaybı–Mesafe eğrisinde de görüldüğü üzere koroziif aşınmada A ve B numunesi arasındaki ağırlık kaybı farkının adhezif aşınmaya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.



Şekil 4.35. Bir kere dövme işlemi sonrası koroziif aşınma grafiği

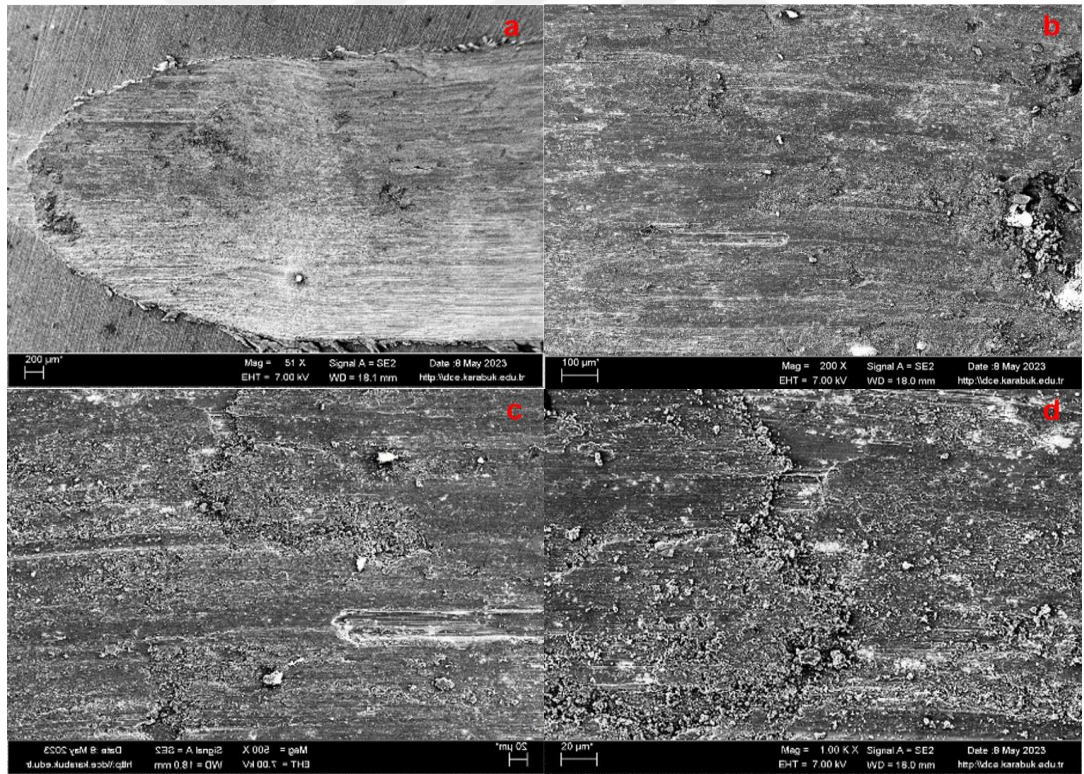
Şekil 4.35 de verilen grafik incelendiğinde EZ43B numunesinin EZ43A numunesine göre koroziif aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca Ağırlık kaybı – Mesafe eğrisinde de görüldüğü üzere Koroziif aşınmada EZ43A ve EZ43B numunesi arasındaki ağırlık kaybı farkının adhezif aşınmaya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.

Ağırlık kaybı – Mesafe eğrisine bakıldığında Koroziif aşınmış EZ43A numunesindeki ağırlık kaybı, adhezif aşınmış EZ43A numunesinin ağırlık kaybından daha yüksek olduğu görülmektedir. Aynı durum EZ43B numunesi içinde geçerlidir. Koroziif

aşınmış EZ43B numunesindeki ağırlık kaybı, adhezif aşınmış EZ43B numunesinin ağırlık kaybından daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan, EZ43A ve EZ43B numunelerinin adhezif aşınma dayanımının koroziv aşınma dayanımından daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Ancak koroziv aşınmada ağırlık kaybının yalnız sürtünme kaynaklı olmayacağını numunenin korozyona uğraması sonucu ağırlık kaybının meydana geleceği göz önünde bulundurulmalıdır.

Adhezif ve koroziv aşınma deneyleri sonrasında KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM mikroyapı inceleme biriminde Taramalı Elektron Mikroskobu ile numunelerin aşınan kısımlarına SEM ve EDX analizleri yapılmıştır.

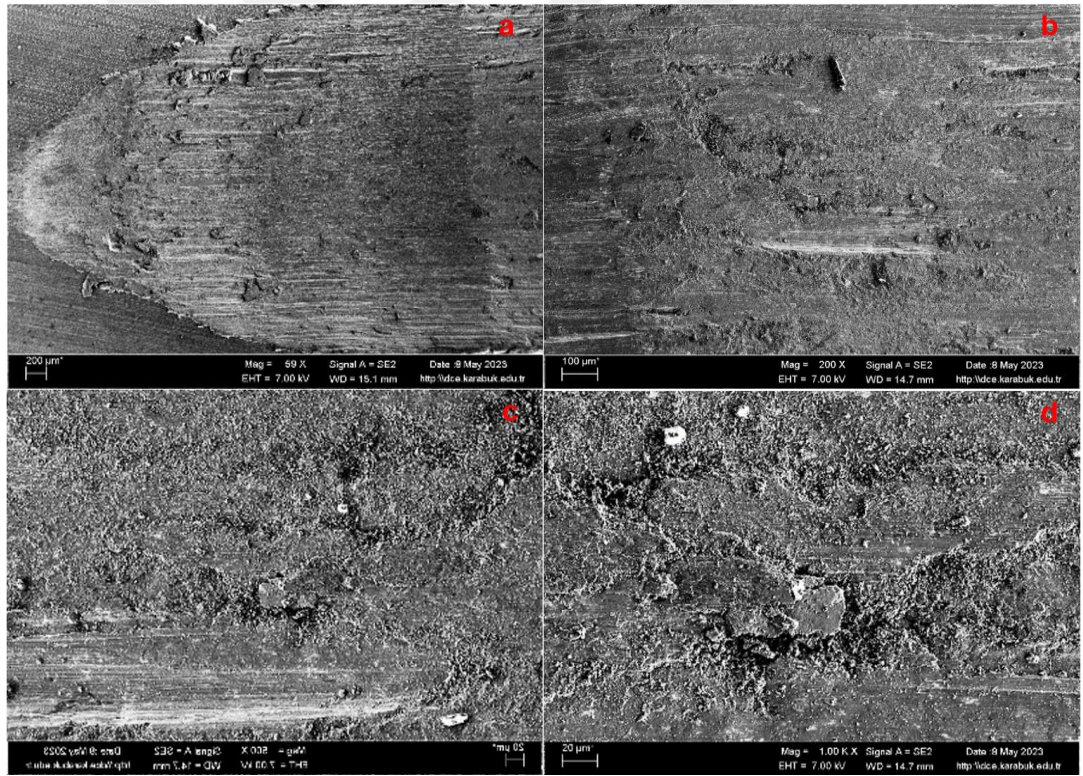
Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A Alaşımının Adhezif aşınma testi sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.36'da verilmiştir.

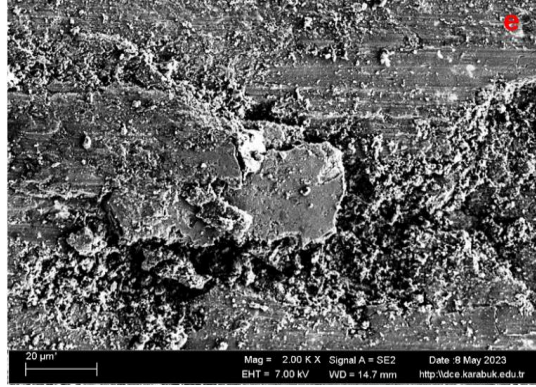




Şekil 4.36. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının Adhezih aşınma testi sonrası SEM görüntüsü (a) Makro görüntü (b) 200x (c) 500x (d) 1kx (e) 2kx

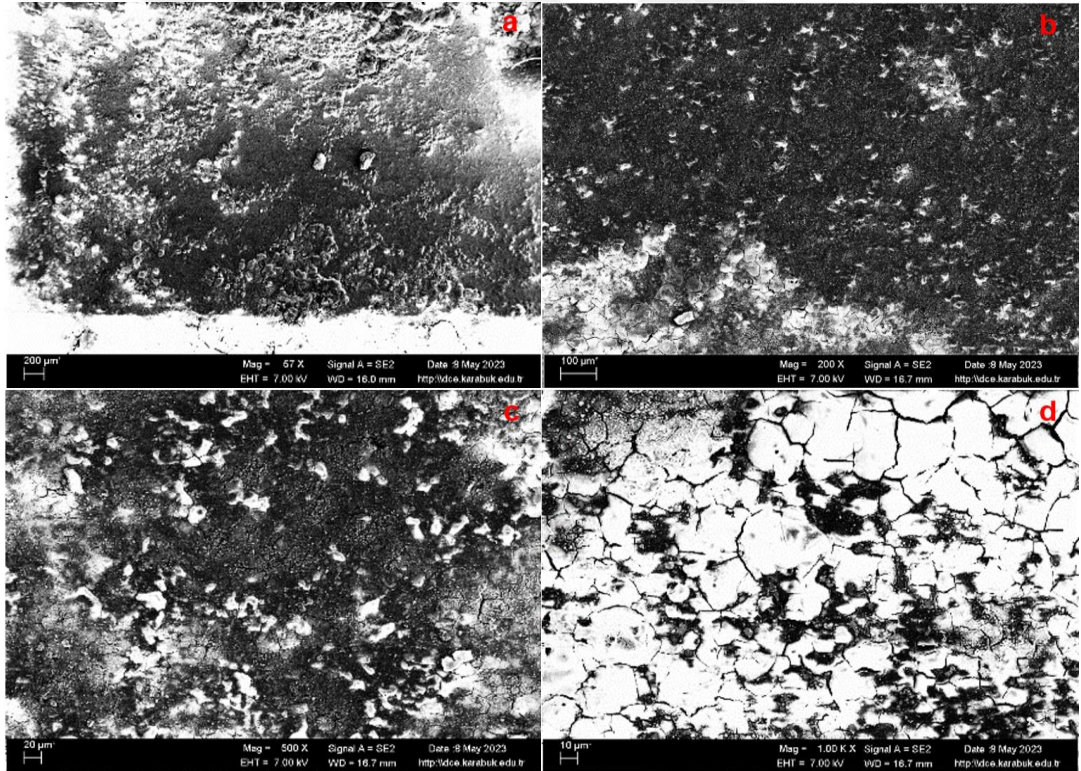
Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının Adhezih aşınma testi sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.37’de verilmiştir.

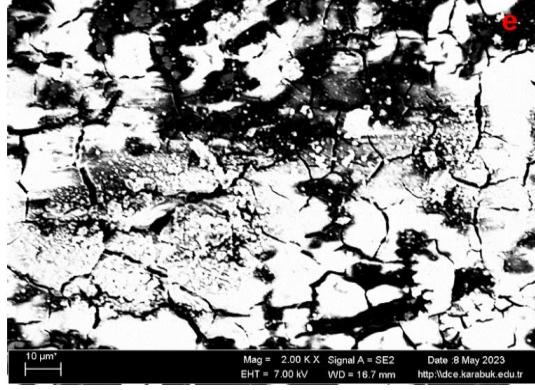




Şekil 4.37. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının Adhezih aşınma testi sonrası SEM görüntüsü (a) Makro görüntüsü, (b)200x (c) 500x (c) 1kx (e) 2kx

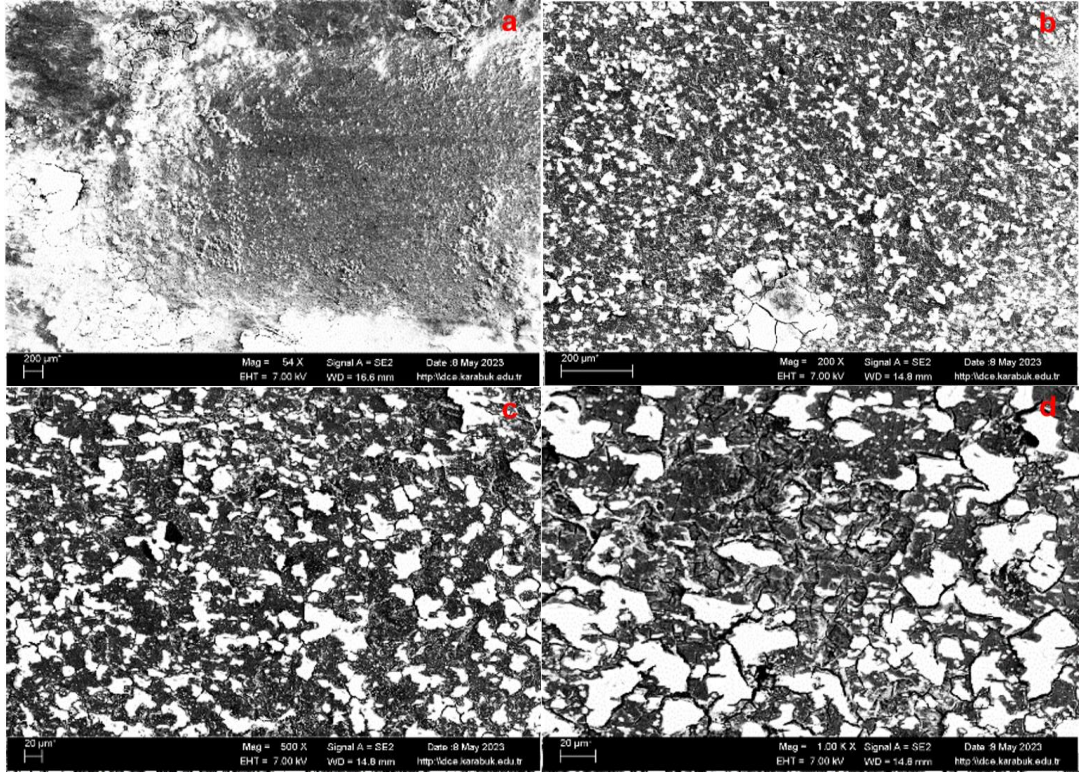
Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.38’de verilmiştir.

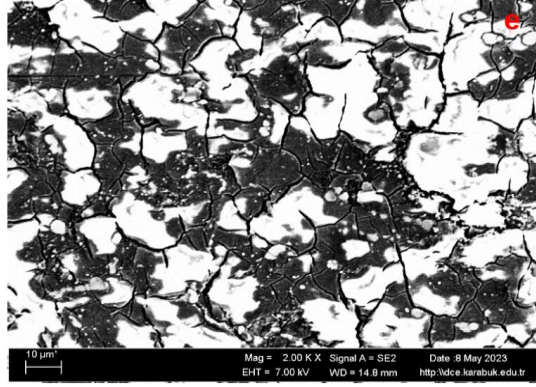




Şekil 4.38. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüsü (a) Makro görüntüsü, (b)200x (c) 500x (d) 1kx (e) 2kx

Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.39’da verilmiştir.



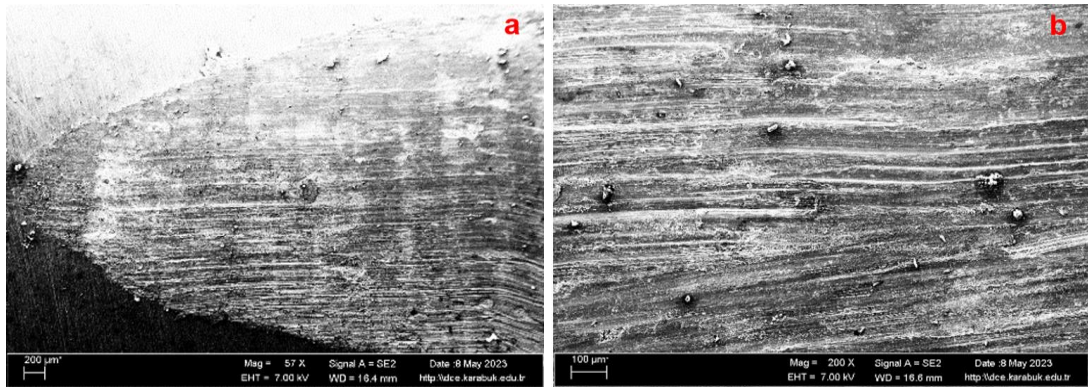


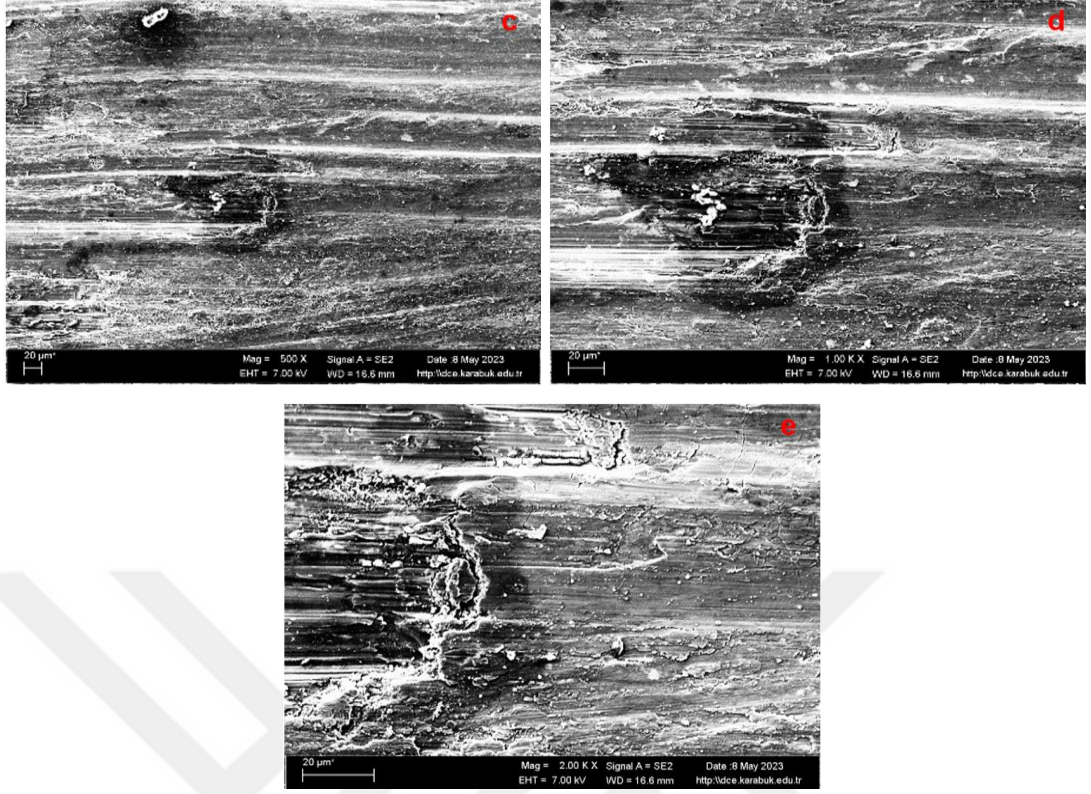
Şekil 4.39. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüsü a) Makro, b) 200x, c) 500x, d) 1kx, e) 2kx

4.2.3.3. İki Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Aşınma Testi ve Değerlendirilmesi

EZ43A alaşımına Ekstrüzyon sonrası, önce bir kere dövme işlemi uygulanmış ardından ise aynı numunelere ikinci kez dövme işlemi uygulanmıştır. Bu ikinci kez dövme işleminden sonra Ekstrüzyon sonrası ve bir dövme işleminden sonra olduğu gibi numuneye Adhezif ve korozif aşınma testleri uygulanarak SEM ve EDX analizleri yapılmıştır. EZ43B alaşımı birinci dövme işlemi sonrası Ekap şeklinde parçalandığından adhezif ve korozif aşınma için numune alınamamış ve ilgili testler EZ43B ye yapılamamıştır.

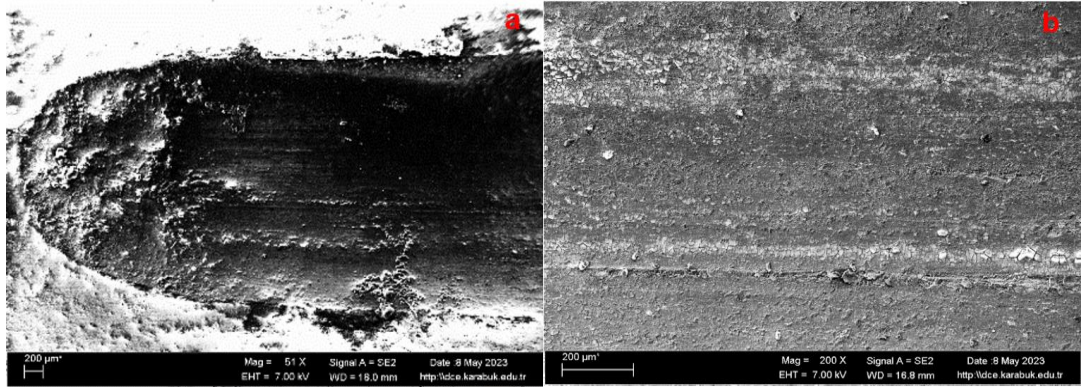
EZ43A alaşımına iki kere dövme işlemi sonrası yapılan kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği Şekil 4.40'ta, korozif ortam aşınma grafiği ise Şekil 4.41'de verilmiştir.

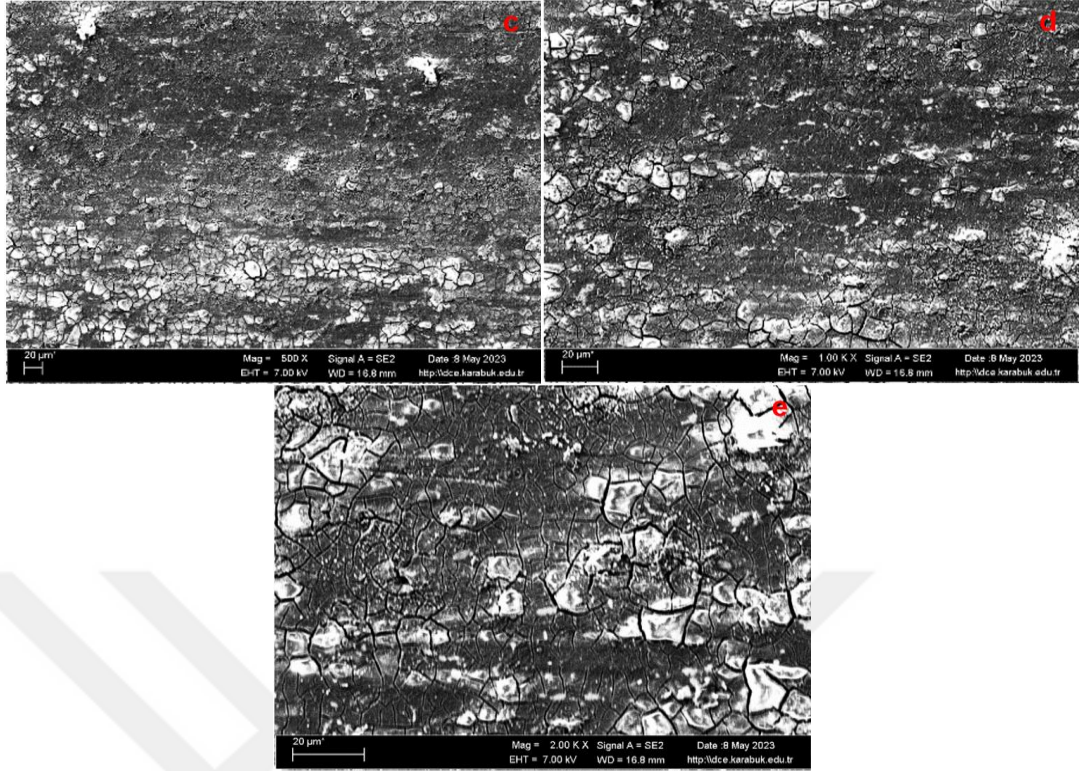




Şekil 4.40. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının Adhezif aşınma testi sonrası SEM görüntüsü a) Makro, b) 200x, c) 500x, d) 1kx, e) 2 kx

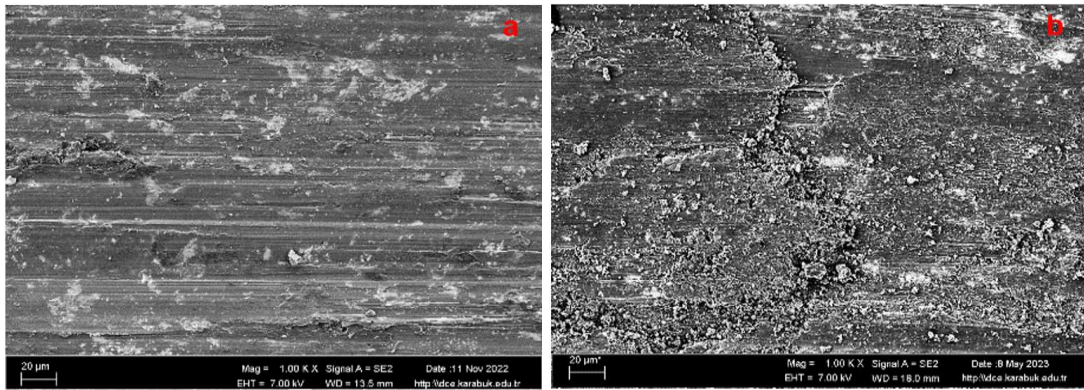
İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının korozif aşınma testi sonrası SEM görüntüleri Şekil 4.41’de verilmiştir.

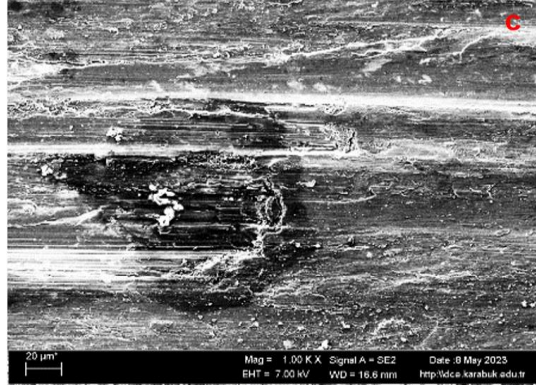




Şekil 4.41. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının korozyif aşınma testi sonrası SEM görüntüsü a) Makro, b) 200x, c) 500x, d) 1kx, e) 2kx

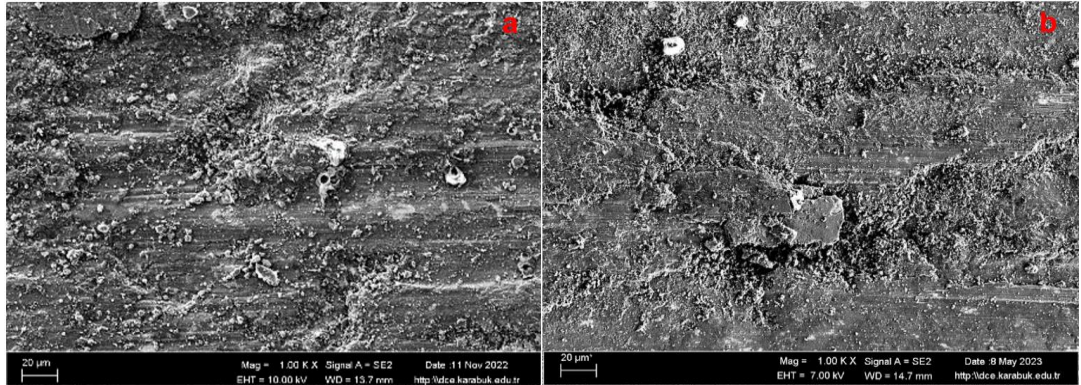
EZ43A alaşımına ekstrüzyon, bir dövme işlemi ve iki dövme işlemi sonrası yapılan Adhezih aşınma testinin SEM analiz görüntüleri Şekil 4.42’de verilmiştir.





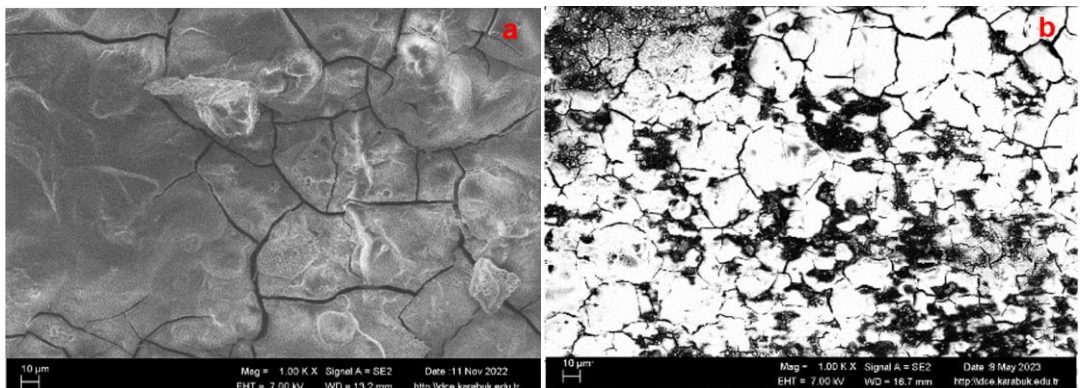
Şekil 4.42. EZ43A alaşımlarının Adheziyon aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx) c) İki dövme işlemi sonrası (1kx)

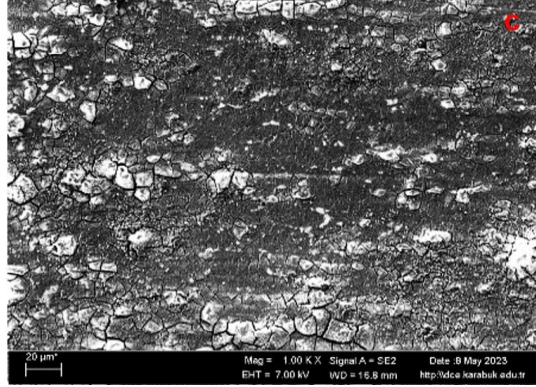
EZ43B alaşımına ekstrüzyon ve bir dövme işlemi sonrası yapılan Adheziyon aşınma testinin SEM analiz görüntüleri Şekil 4.43'te verilmiştir.



Şekil 4.43. EZ43B alaşımlarının Adheziyon aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx)

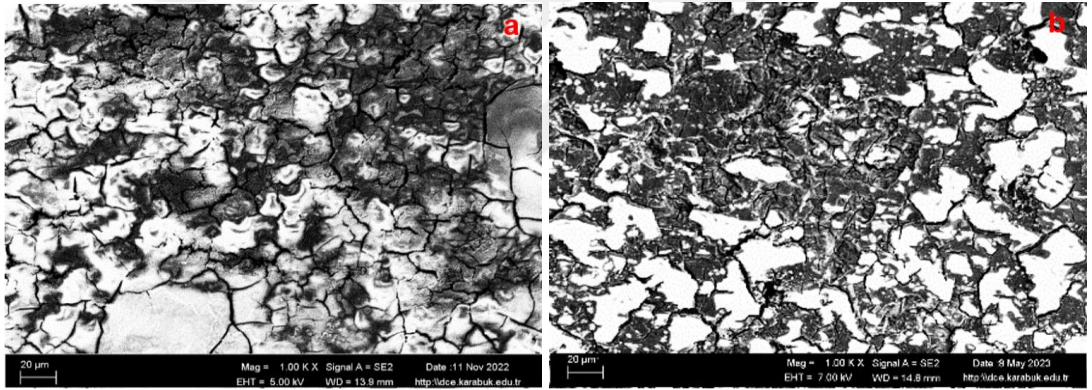
EZ43A alaşımına ekstrüzyon, bir dövme işlemi ve iki dövme işlemi sonrası yapılan korozyon aşınma testinin SEM analiz görüntüleri Şekil 4.44'te verilmiştir.





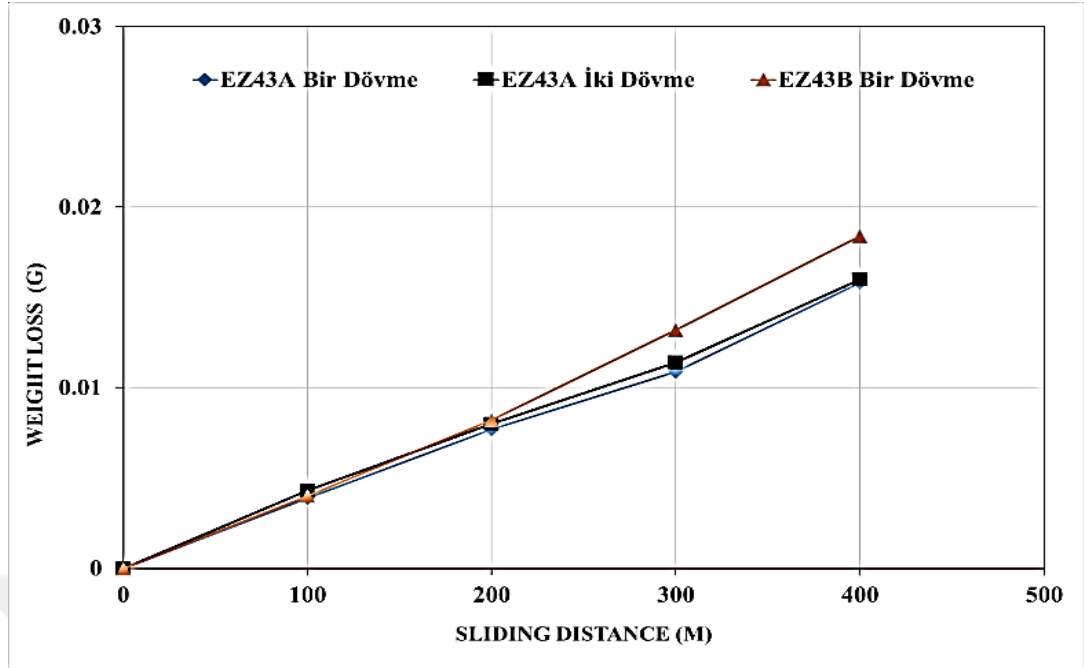
Şekil 4.44. EZ43A alaşımasının korozif aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx) c) İki dövme işlemi sonrası (1kx)

EZ43B alaşımına Ekstrüzyon ve bir dövme işlemi sonrası yapılan korozif aşınma testinin SEM analiz görüntüleri Şekil 4.45’te verilmiştir.

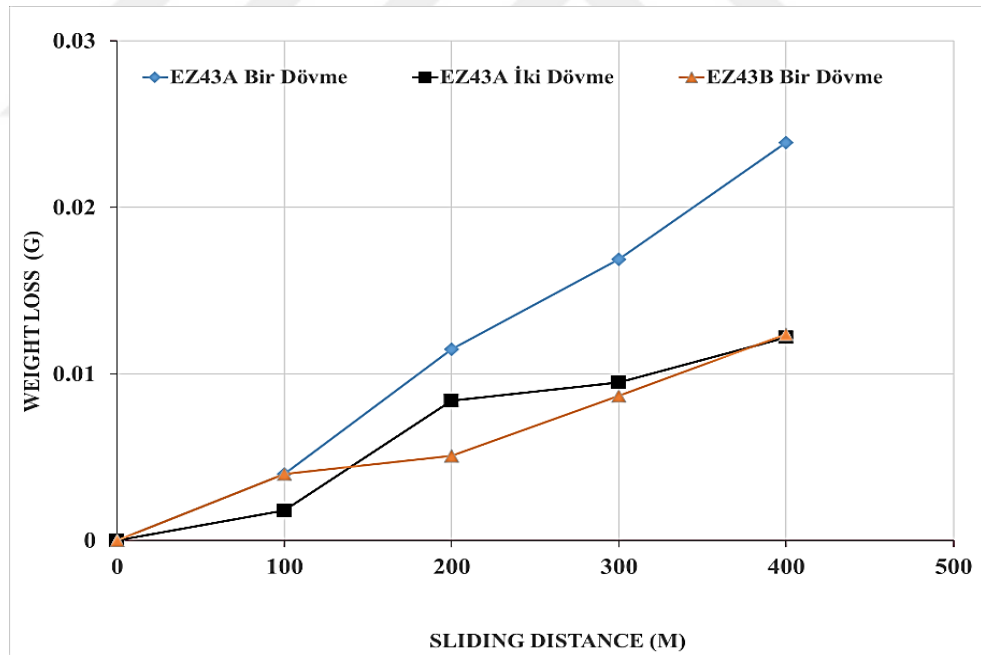


Şekil 4.45. EZ43B alaşımasının korozif aşınma testi sonrası SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (1kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (1kx)

EZ43A ve EZ43B alaşımlarının bir ve iki dövme sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği Şekil 4.46’da korozif aşınma grafiği ise Şekil 4.47’de verilmiştir.

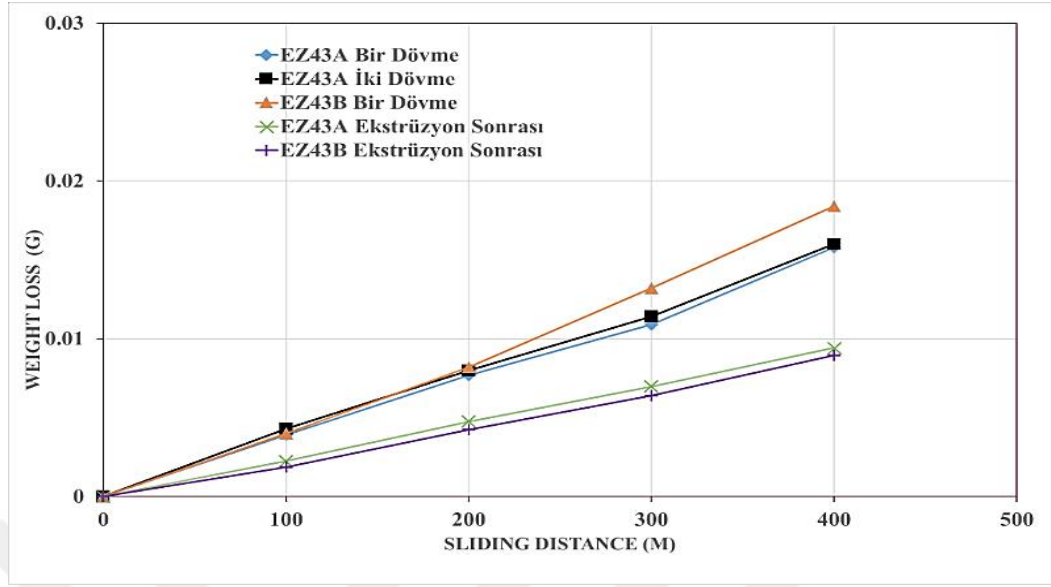


Şekil 4.46. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının bir ve iki dövme sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği

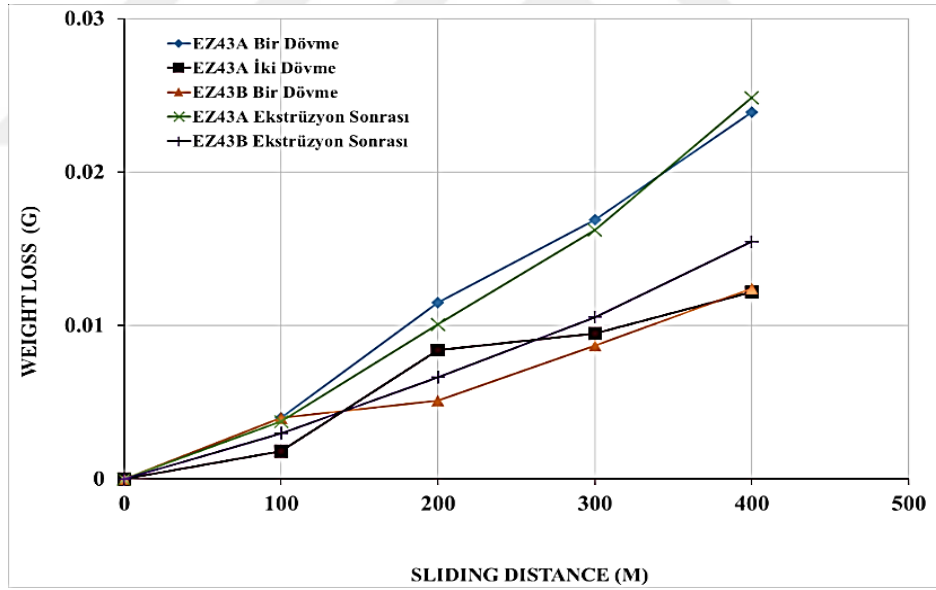


Şekil 4.47. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının bir ve iki dövme sonrası korozif aşınma grafiği

EZ43A ve EZ43B alaşımlarının ekstrüzyon ve bir ile iki dövme işlemi sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği toplu olarak Şekil 4.48’de verilirken korozif aşınma grafikleri ise Şekil 4.49’da verilmiştir.



Şekil 4.48. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon ve bir ile iki dövme işlemi sonrası kuru ortam (Adhezif) aşınma grafiği



Şekil 4.49. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon ve bir ile iki dövme işlemi sonrası korozif ortam aşınma grafiği

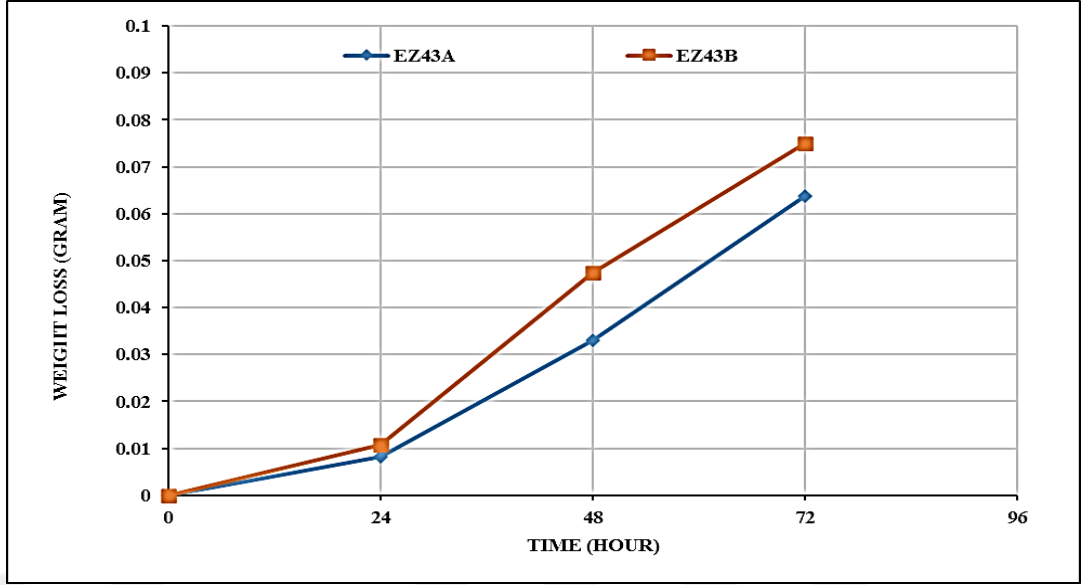
4.3. KOROZYON ÖZELLİKLERİNİN KARAKTERİZASYONU İLE İLGİLİ YAPILAN DENEYLERİN SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Ekstrüzyon işlemi ile bir ve iki dövme işlemleri sonrası daldırma korozyonu, potansiyodinamik, Hidrojen Evolution ve empedans testleri uygulanmıştır.

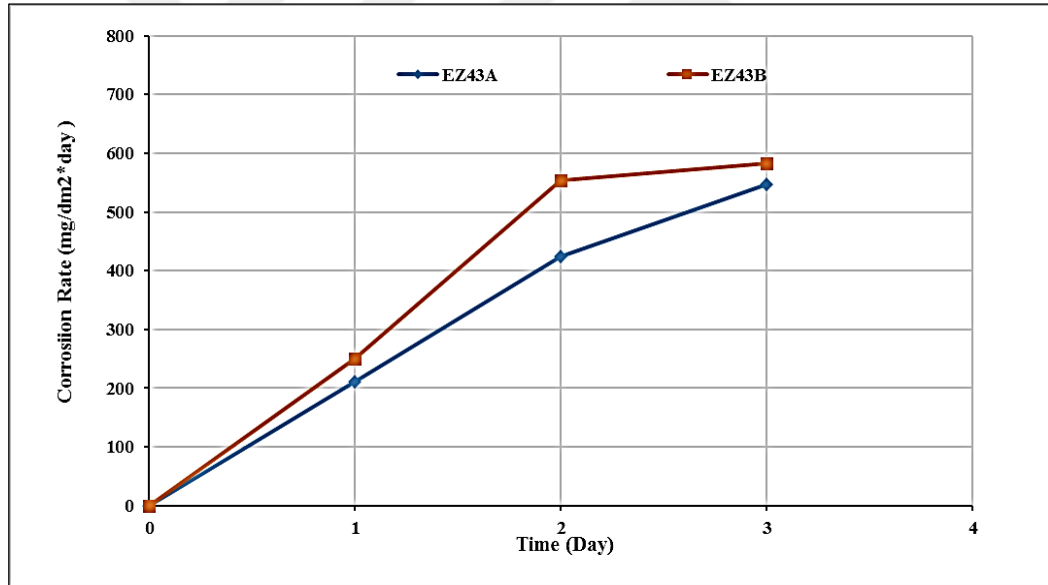
4.3.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Daldırma Korozyon Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçlarından zaman/korozyona uğrama oranı şekil 50’de verilirken zaman/ağırlık kaybı sonuçları ise Şekil 51’de verilmiştir.

Şekil 4.50 de verilen Mdd-Gün daldırma grafiğinde, herhangi bir günde numunelerin birim alanından (dm^2) ayrılan ya da kopan parçaların Mg’ sine bakıldığında EZ43A numunesinin korozyona uğrama hızı, EZ43B numunesinin korozyona uğrama hızından düşük olduğu görülmektedir. Buradan EZ43A numunesinin EZ43B numunesine kıyasla korozyon dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır. Mdd-Gün daldırma grafiğine bakıldığında, her iki A ve B numunesinde korozyon hızı başlangıçta artış göstermektedir. Ancak ardından zamanla korozyon hızında azalma söz konusudur. Bunun nedeni magnezyumun yüzeyinde oluşturduğu oksit tabakası pasif özellik göstererek korozyon hızının azalmasına neden olmaktadır.



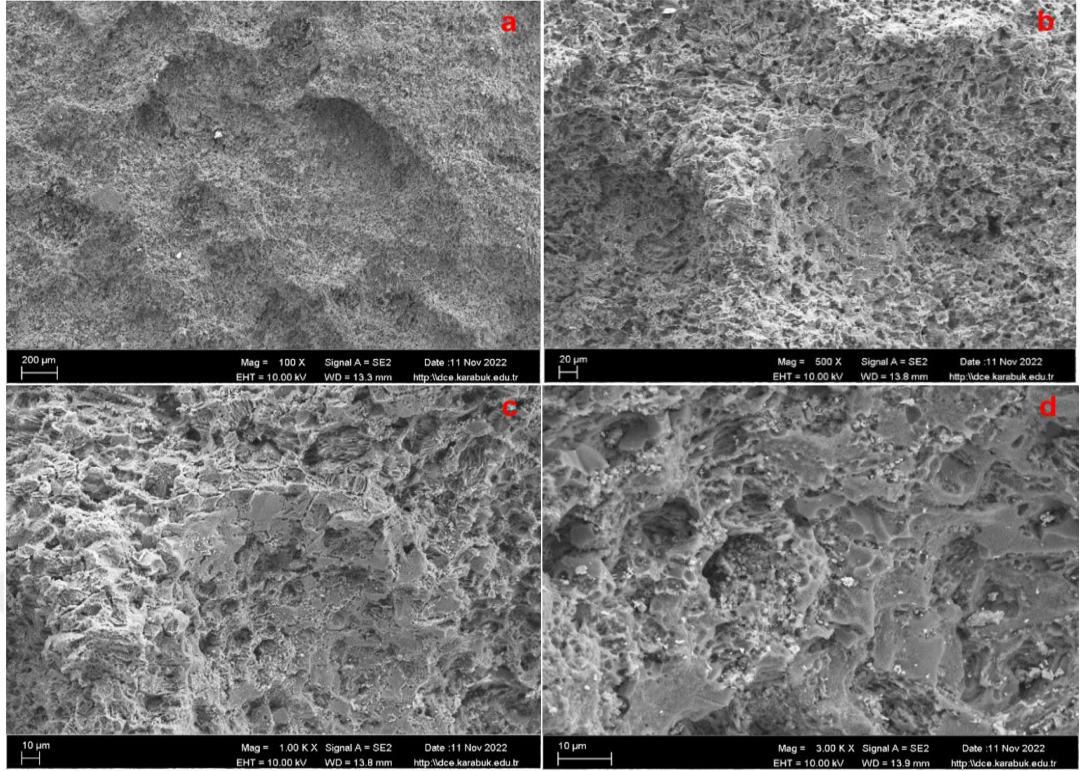
Şekil 4.50. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /ağırlık kaybı)



Şekil 4.51. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /korozyon uğrama oranı)

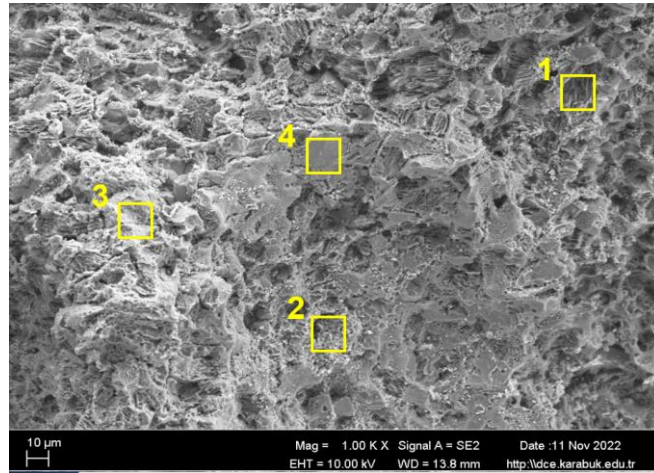
Daldırma korozyon işlemi sonrası KBÜ Demir Çelik Enstitüsü MARGEM mikroyapı inceleme biriminde numunelerin SEM ve EDX analizleri yapılmıştır.

Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A alaşımına uygulanan daldırma korozyon testinin SEM görüntüleri Şekil 4.52’de verilmiştir.



Şekil 4.52. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43A alaşımına uygulanan daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a) 100x, b) 500x c) 1kx d) 3kx

Ekstrüzyon İşlemi Sonrası EZ43A alaşımının EDX analizi (1kx) yapılmış ve sonuçları şekil 4.53 ile Çizelge 4.10’da verilmiştir.

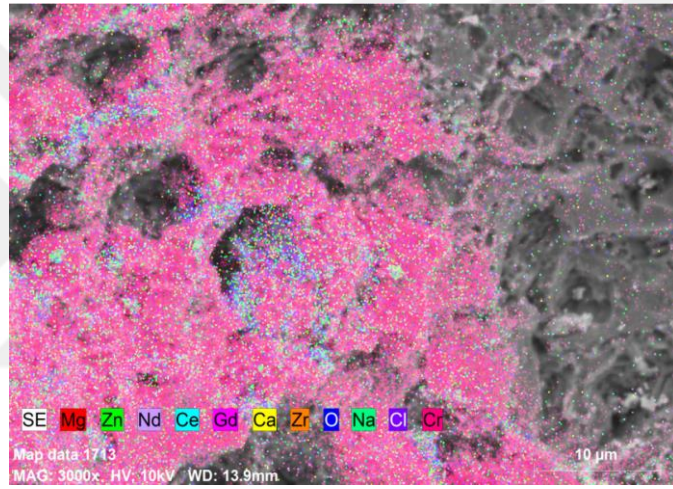


Şekil 4.53. EZ43A alaşımının Ekstrüzyon işlemi sonrası daldırma korozyon EDX analizi (1kx)

Çizelge 4.10. Şekil 4.53'te verilen EZ43A alaşımının EDX spektrum sonuçları.

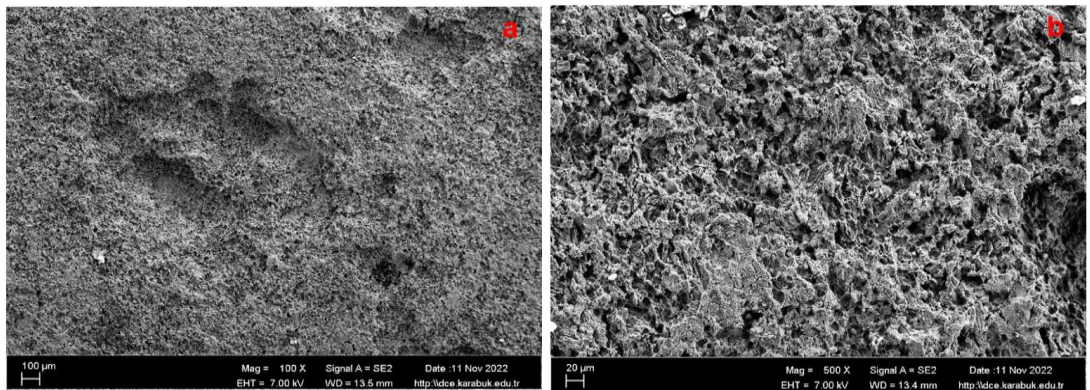
EZ43A	Mass percent (%)													
Spc.	H	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Cr	Zn	Zr	Ag	Ce	Nd	Gd
1	64.6	0.44	0.08	14.84	0.08	0.08	0.19	5.02	0.9	0.02	0.17	2.42	7.05	4.68
2	31.05	0.15	0.0	49.58	0.18	0.0	0.25	2.03	0.05	0.10	0.16	0.0	2.22	14.22
3	1.18	1.53	0.60	69.01	0.07	0.0	0.13	0.83	0.35	0.11	0.06	0.03	1.56	24.26
4	0.80	3.8	0.8	61.90	0.07	0.05	0.11	3.38	1.48	0.14	0.22	1.90	3.41	21.93

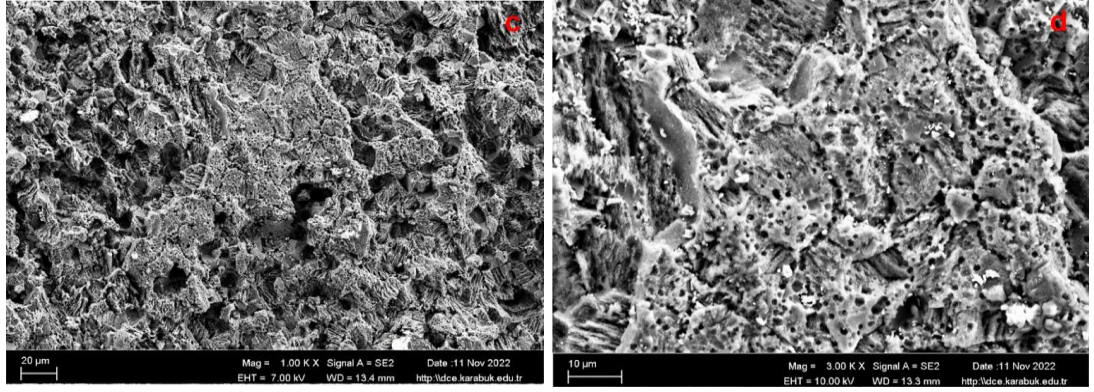
EZ43A alaşımının Ekstrüzyon sonrası daldırma korozyon testi MAP görüntüsü Şekil 4.54'te verilmiştir.



Şekil 4.54. EZ43A alaşımının Ekstrüzyon sonrası daldırma korozyon testi MAP görüntüsü

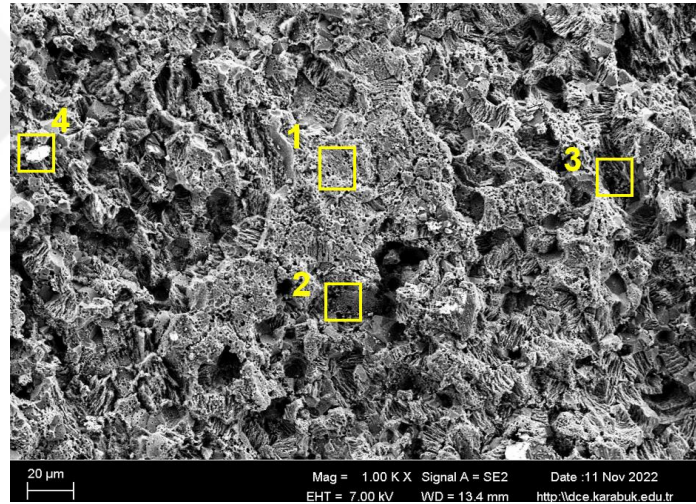
Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımına uygulanan daldırma korozyon testinin SEM görüntüleri Şekil 4.55'te verilmiştir.





Şekil 4.55. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımına uygulanan daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x, b)500x, c)1kx, d) 3kx

Ekstrüzyon İşlemi Sonrası EZ43B alaşımının EDX analizi (1kx) yapılmış ve sonuçları Şekil 4.56 ile Çizelge 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.56. Ekstrüzyon işlemi sonrası EZ43B alaşımı daldırma korozyon EDX analizi (1kx)

Çizelge 4.11. Şekil 4.56’da verilen EZ43B alaşımının EDX spektrum sonuçları.

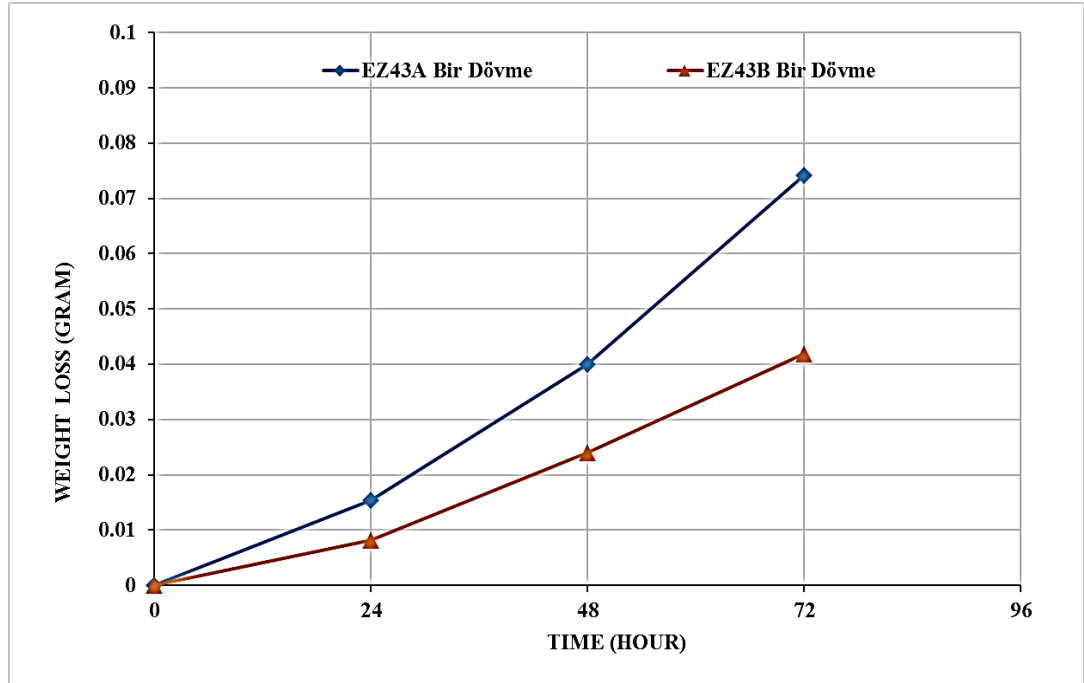
EZ43B	Mass percent (%)													
Spc.	H	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Cr	Zn	Zr	Ag	Ce	Nd	Gd
1	0.0	3.10	0.88	65.17	0.68	0.18	0.16	3.42	1.56	0.07	0.03	0.0	0.0	24.8
2	19.37	2.86	0.0	63.68	0.0	0.0	0.96	0.0	1.31	0.09	0.0	0.0	0.0	11.73
3	0.0	5.0	0.53	64.48	0.33	0.05	0.43	3ç27	1.81	0.0	0.19	0.0	0.0	23.75
4	0.0	20.13	2.45	20.01	2.51	1.65	0.56	13.0	0.0	0.9	0.43	0.5	11.27	7.22

Ekstrüzyon sonrası EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon testi MAP görüntüsü Şekil 4.57’de verilmiştir.

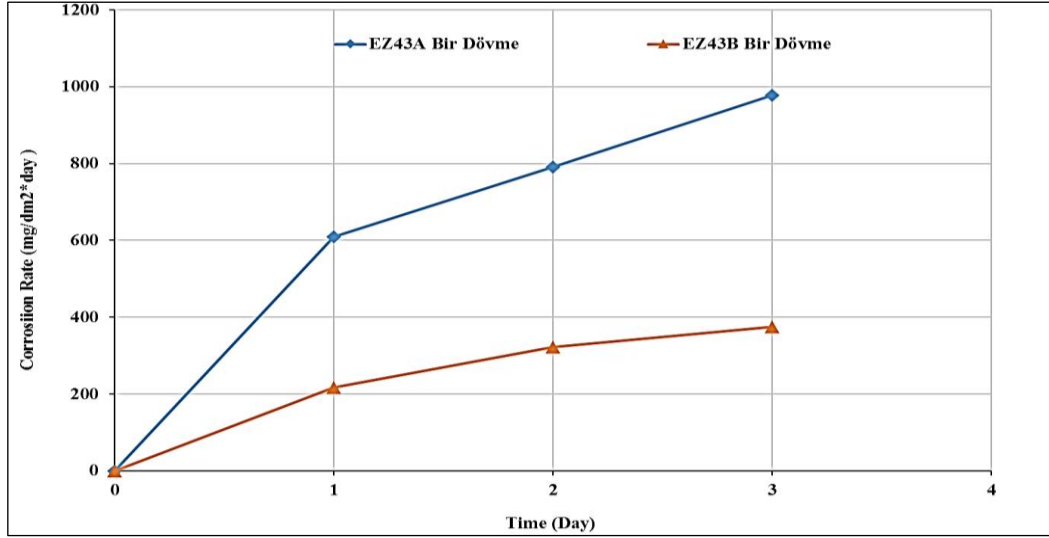


Şekil 4.57. Ekstrüzyon sonrası EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon testi MAP görüntüsü

4.3.2. Bir Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Daldırma Korozyon Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

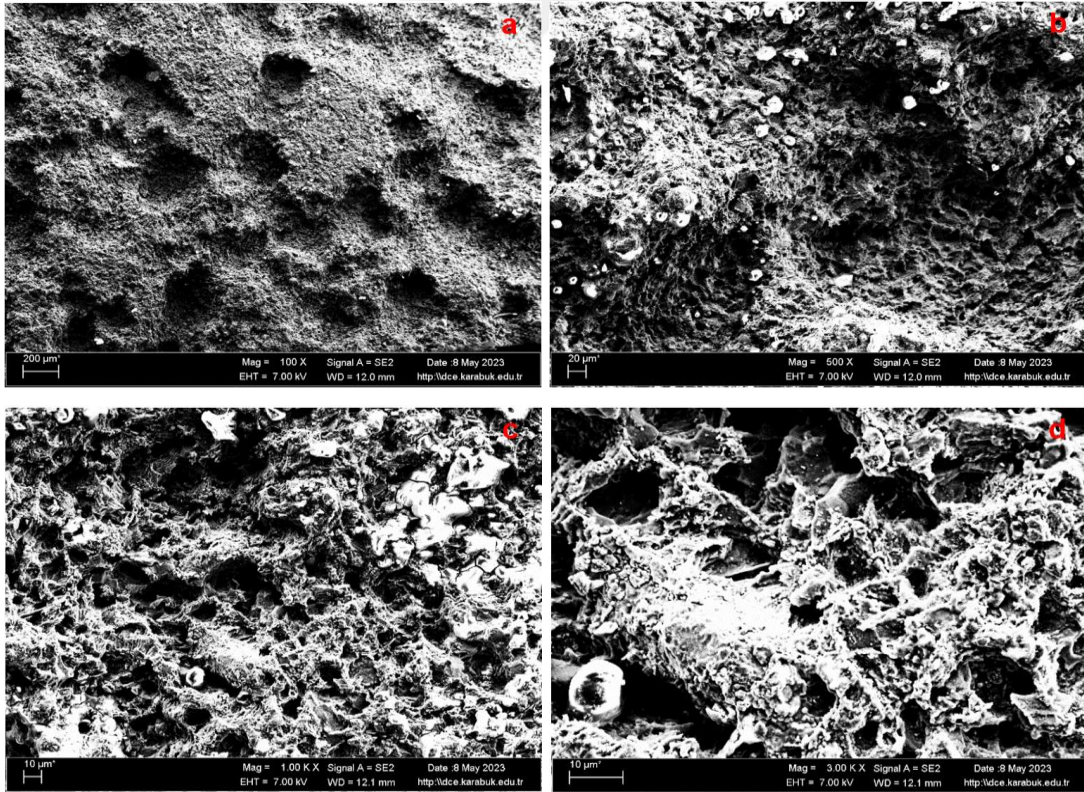


Şekil 4.58. Bir dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /ağırlık kaybı)



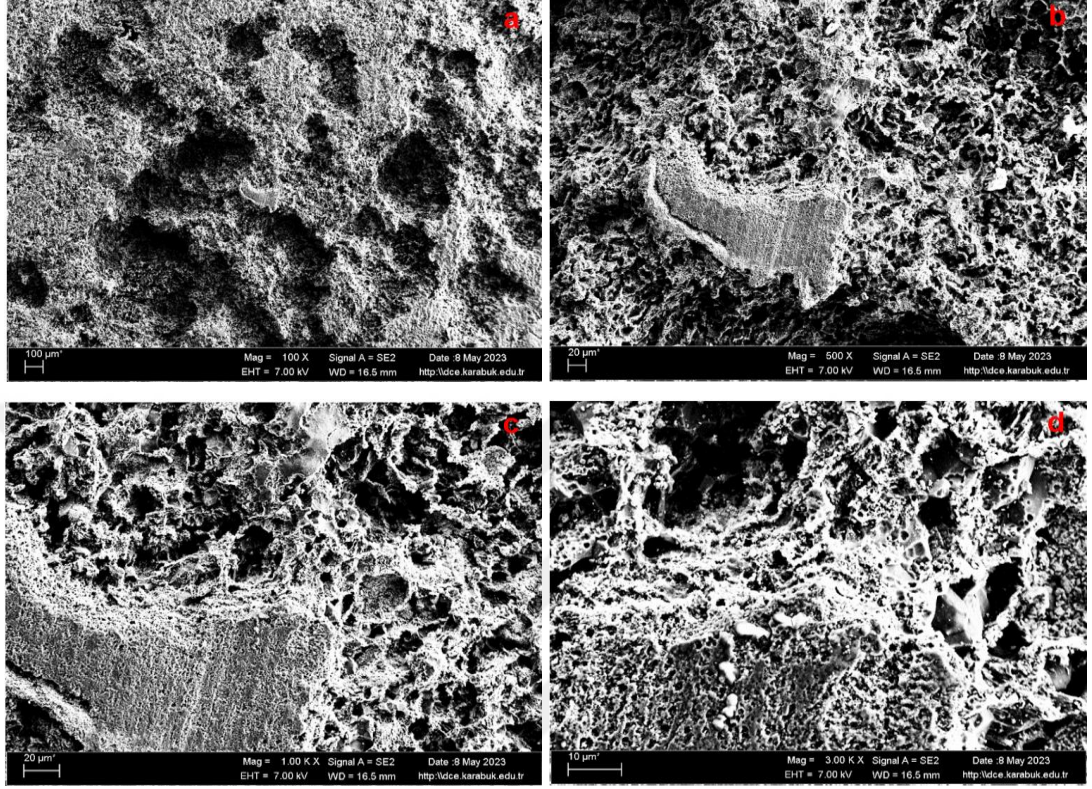
Şekil 4.59. Bir Dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /korozyon oranı)

EZ43A alaşımına bir dövme işlemi sonrası daldırma korozyon testi uygulanmış ve akabinde numunenin SEM görüntüleri alınarak Şekil 4.60'ta verilmiştir.



Şekil 4.60. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a) 100x, b) 500x, c) 1000x, d) 3000x

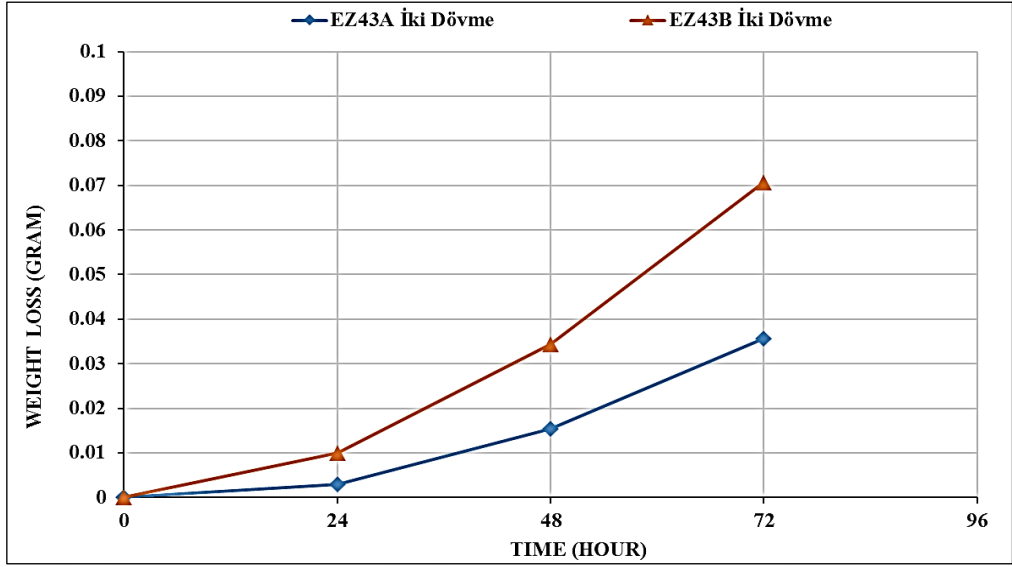
EZ43B alaşıma da bir dövme işlemi sonrası daldırma korozyon testi uygulanmış ve akabinde numunenin SEM görüntüleri alınarak Şekil 4.61’de verilmiştir.



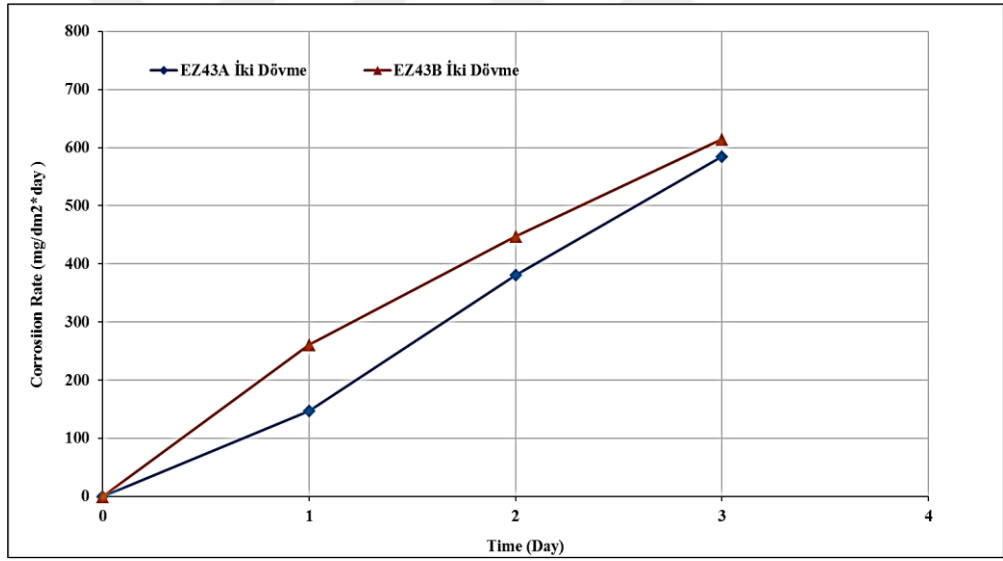
Şekil 4.61. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x, b)500x, c)1kx, d)3kx

4.3.3. İki Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Daldırma Korozyon Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

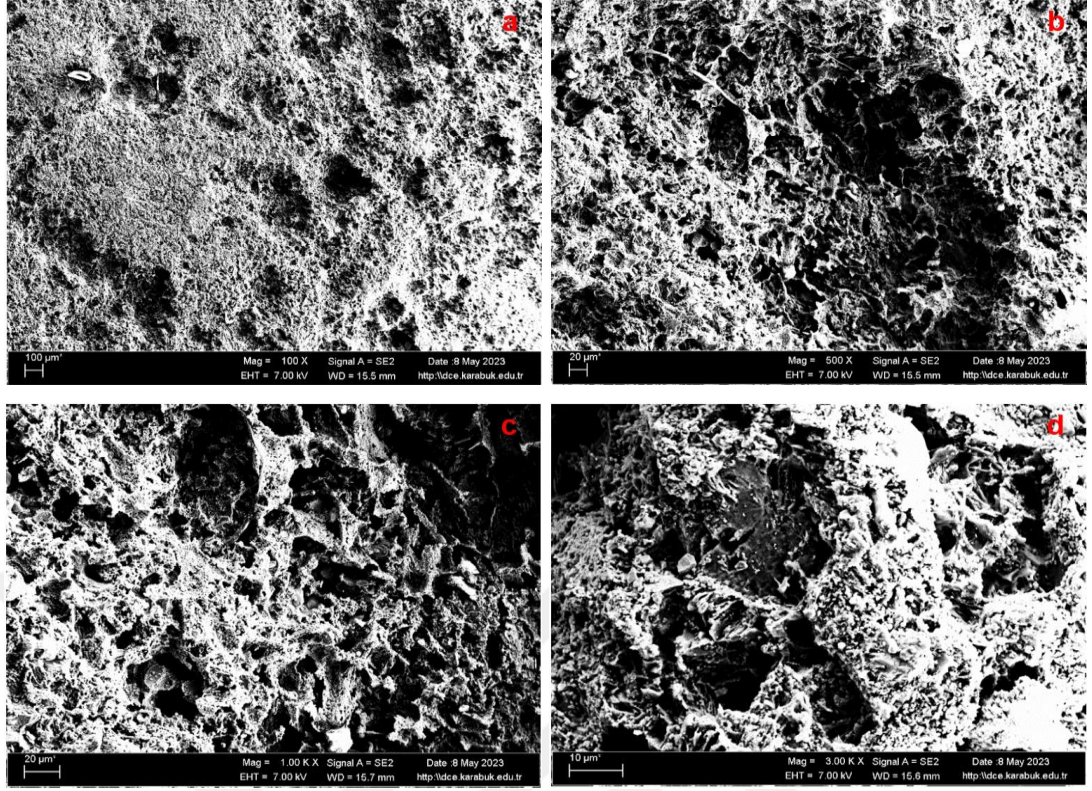
EZ43A alaşıma iki dövme işlemi sonrası daldırma korozyon testi uygulanmış ve akabinde numunenin SEM görüntüleri alınarak Şekil 4.64’te verilmiştir.



Şekil 4.62. İki kere dövme işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /ağırlık kaybı)

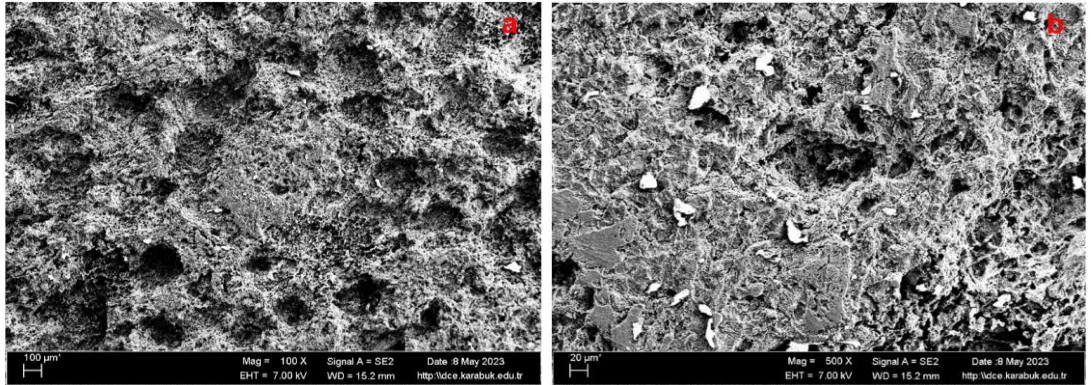


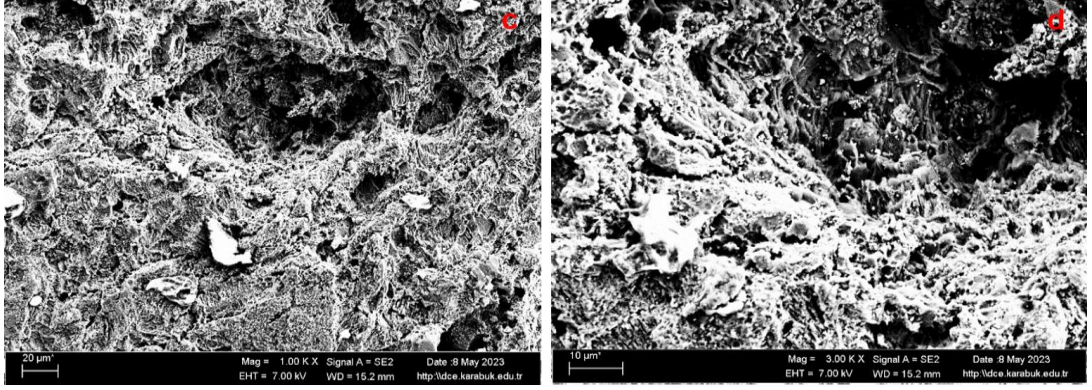
Şekil 4.63. İki Dövmе işlemi sonrası EZ43A ve EZ43B alaşımlarının daldırma korozyon test sonuçları (zaman /Korozyon oranı)



Şekil 4.64. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x, b)500x, c)1kx, d)3kx

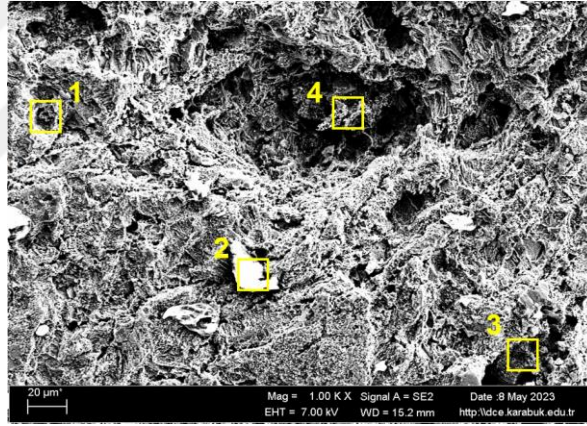
EZ43B alaşımına da iki dövme işlemi sonrası daldırma korozyon testi uygulanmış ve akabinde numunenin SEM görüntüleri alınarak Şekil 4.65'te verilmiştir.





Şekil 4.65. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımlının daldırma korozyon testi sonrası SEM görüntüleri a)100x, b)500x, c)1kx, d)3kx

İki kere dövme işlemi uygulanmış olan EZ43B alaşımına daldırma korozyon testi sonrası EDX analizleri (1kx) yapılmış ve sonuçları Şekil 4.66 ve Çizelge 4.12’ de verilmiştir.

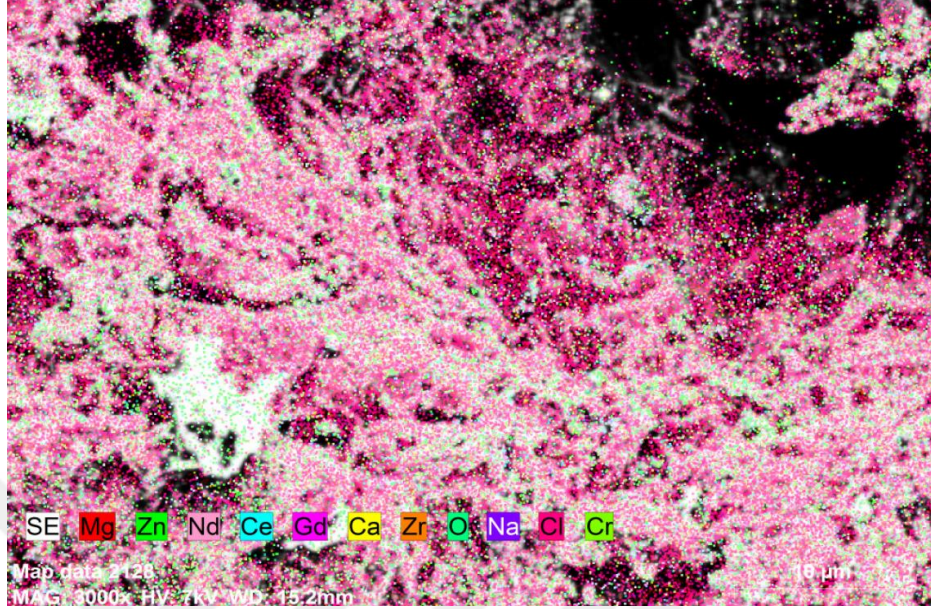


Şekil 4.66. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımlının daldırma korozyon testi sonrası EDX analizi (1kx)

Çizelge 4.12. Şekil 4.66’da verilen iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımlının EDX spektrum sonuçları.

EZ43A	Mass percent (%)													
Spc.	H	O	Na	Mg	Cl	K	Ca	Cr	Zn	Zr	Ag	Ce	Nd	Gd
1	0.0	6.19	1.31	63.12	0.65	0.0	1.35	3.86	0.55	0.3	0.0	10.3	0.0	22.65
2	0.0	35.0	4.13	17.3	0.36	1.58	12.50	0.13	0.0	0.1	0.0	0.0	7.35	7.97
3	40.67	0.30	0.0	42.0	0.92	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	16.0
4	0.0	8.56	1.06	59.7	0.44	0.47	3.48	2.83	1.03	2.73	0.0	0.0	0.0	19.8

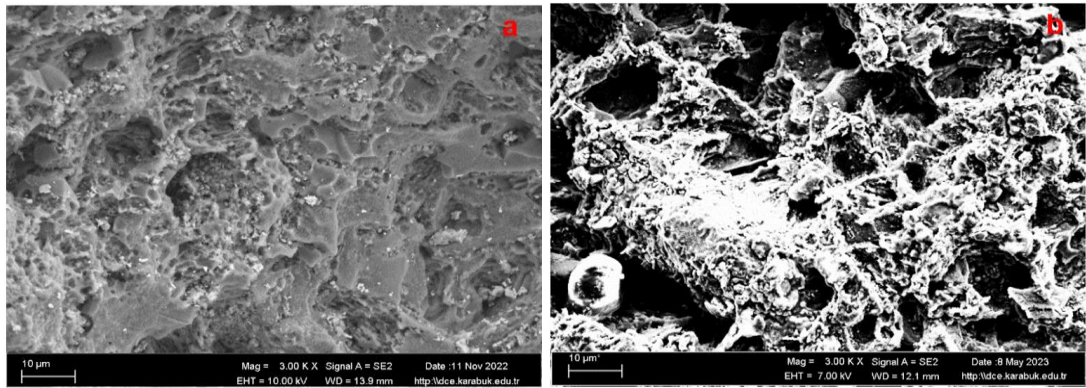
İki kere dövme işlemi uygulanmış olan EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası MAP görüntüsü Şekil 4.67’de verilmiştir.

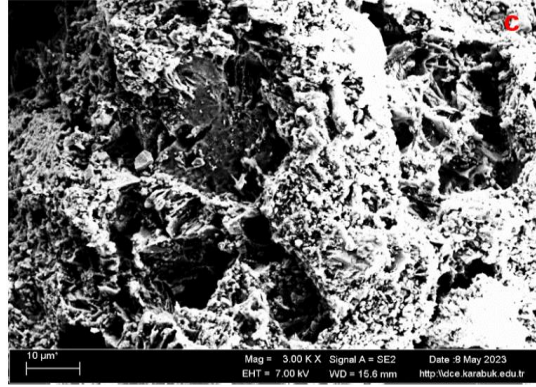


Şekil 4.67. İki kere dövme işlemi uygulanmış olan EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası MAP görüntüsü (3kx)

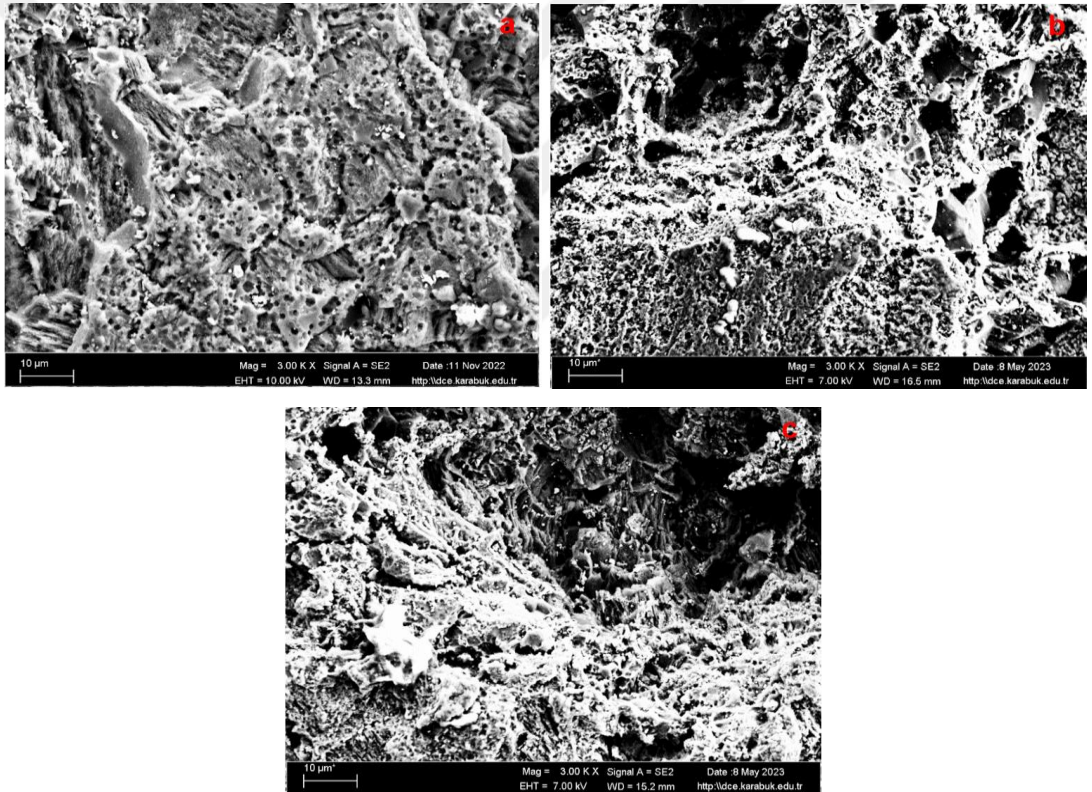
Ekstrüzyon işlemi ile bir kere ve iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM analiz görüntüleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.68’ de verilmiştir.

Ekstrüzyon işlemi ile bir kere ve iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B alaşımının daldırma korozyon testi sonrası SEM analiz görüntüleri karşılaştırmalı olarak Şekil 4.69’ da verilmiştir.



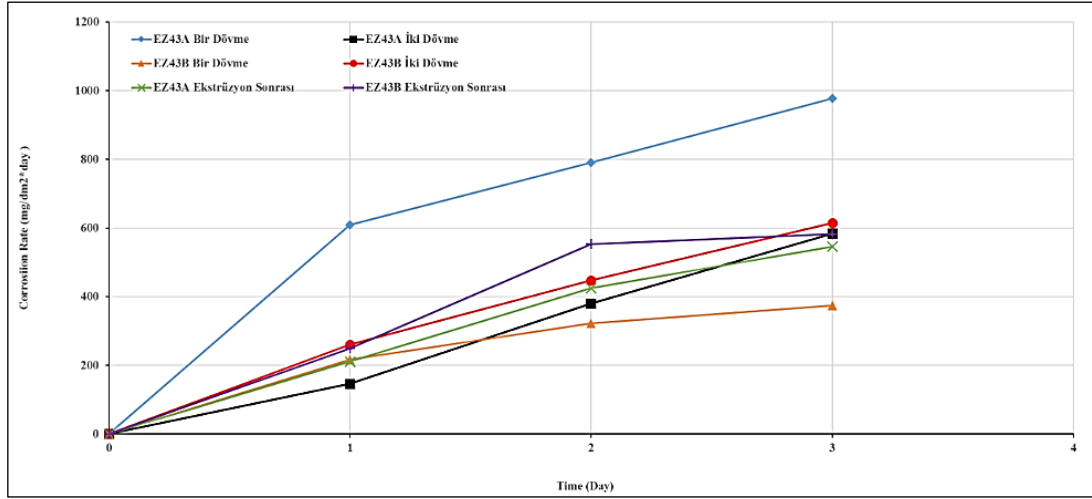


Şekil 4.68. EZ43A alaşımının daldırma korozyon deneyi sonrası numunelerin SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (3kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (3kx) c) İki dövme işlemi sonrası (3kx)



Şekil 4.69. EZ43B alaşımının daldırma korozyon deneyi sonrası numunelerin SEM analiz görüntüleri a) Ekstrüzyon sonrası (3kx) b) Bir dövme işlemi sonrası (3kx) c) İki dövme işlemi sonrası (3kx)

EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon işlemi sonrası ile bir kere ve iki kere dövme işlemi uygulanmış numunelerinin daldırma korozyon testi sonuçları karşılaştırmalı olarak Şekil 4.70’ de grafik halinde verilmiştir.



Şekil 4.70. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon ve dövme işlemleri sonrası daldırma korozyon grafiği

Daldırma korozyon grafiğine baktığımızda bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinin iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesine göre korozyona uğrama hızının yüksek olduğu gözlenmiştir. EZ43B numunesinde ise bunun tersi bir durum gözlenmiş olup bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesine göre korozyona uğrama hızının düşük olduğu gözlemlenmiştir.

Ekstrüzyon işlemi sonrası uygulanan daldırma korozyon işlemi ile dövme işlemi sonrası uygulanan daldırma korozyon işlemi sonrasını kıyasladığımızda ise bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinin korozyona uğrama hızının Ekstrüzyon sonrası daldırma korozyonu işlemine tabi tutulan EZ43A numunesine göre yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ancak iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinin korozyona uğrama hızının Ekstrüzyon sonrası daldırma korozyonu işlemine tabi tutulmuş EZ43A numunesi ile paralellik gösterdiği gözlemlenmiştir.

EZ43B numunesine baktığımızda ise bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin korozyona uğrama hızının Ekstrüzyon sonrası daldırma korozyonu işlemine tabi tutulan EZ43B numunesine göre düşük olduğu görülmüştür. Yine iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin korozyona uğrama hızının Ekstrüzyon sonrası daldırma korozyonu işlemine tabi tutulmuş EZ43B numunesinden düşük olduğu gözlemlenmiştir.

En yüksek korozyona uğrama hızının bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinde olduğu gözlemlenirken en düşük korozyona uğrama hızının ise iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinde olduğu gözlemlenmiştir. İncelen tane yapısının korozyon direncini düşürdüğü, mekanik özellikleri arttırdığı düşünülmektedir.

4.4. POTANSİYODİNAMİK POLARİZASYON (PD) TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

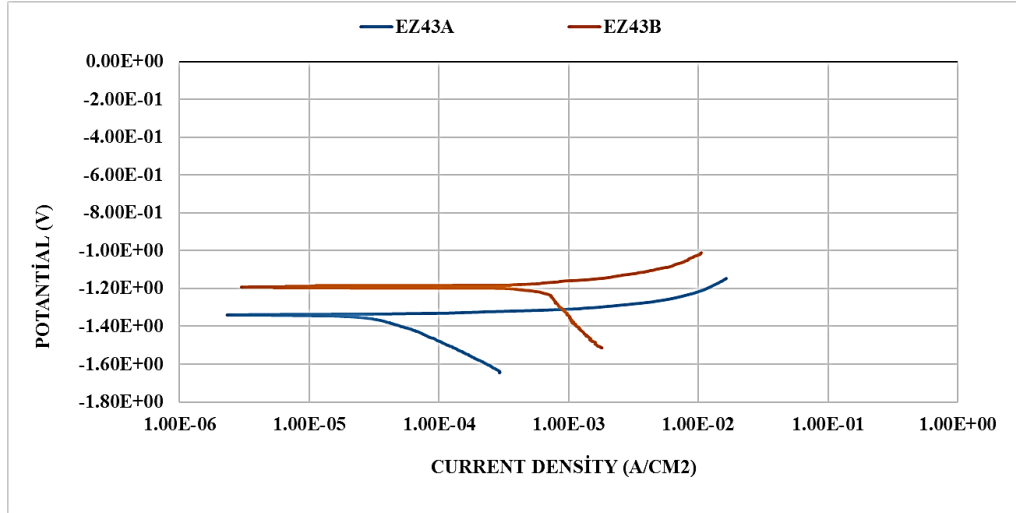
EZ43A ve EZ43B alaşımları Ekstrüzyon işlemi sonrası ve bir dövme ile iki dövme işlemi sonrası Hank sıvısı içinde Potansiyodinamik korozyon testine tabi tutulmuşlardır. Deney numunelerinin iletkenliğini sağlayabilmek için arka yüzeyine bakır tel bağlandı ve yalnızca elektrolit ile temasta olan yüzeyleri açıkta kalacak şekilde epoksi reçine ile kaplanmıştır. Deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak deney numuneleri, karşı elektrot görevini yapan karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot yerleştirilmiştir. Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiş olup deney çalışmalarının tamamında öncelikle sistemden akım geçmeksizin, vücut sıvısı çözeltisinin içine çalışma elektrodunun ve referans elektrodunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline (E_{cor}) ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri katodikten anodik yöne doğru kaydedilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{cor}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{cor}) hesaplanmıştır.

4.4.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Şekil 4.71’de verilen EZ43 alaşımlarının Potential (V) – Current Density (mA/cm^2) grafiği incelenip hem anodik hem de katodik bölgedeki verilen gerilim başına çekilen akım değerlendirildiğinde EZ43B numunesinin EZ43A numunesine göre daha pasif davrandığı grafik eğrilerinden anlaşılmaktadır. Bunların dışında grafiklerde herhangi bir aktifleşme ya da pasifleşme bölgesi oluşmamıştır. Grafikteki korozyon potansiyeli

(E_{cor}) değerleri değerlendirildiğinde EZ43A numunesinin potansiyel değeri EZ43B numunesine kıyasla negatif kısımda yer almaktadır. Bu sonuç anodik bölgedeki oluşum ile de tutarlılık göstermektedir.

Grafikteki akım yoğunluğu (I_{cor}) değerleri değerlendirildiğinde EZ43A numunesinin, EZ43B numunesine göre korozyon oranının düşük olduğu görülmektedir. Buradan EZ43A numunesinde korozyon hızının daha düşük olduğu böylece korozyon dayanımının EZ43B numunesinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç daldırma testi sonucuyla tutarlılık göstermektedir. Yine Şekil 4.71’de verilen potansiyel ve akım yoğunluğu değerlerine bakıldığında EZ43A numunesinin akım yoğunluğu, EZ43B numunesine kıyasla daha düşüktür ancak EZ43A numunesinin potansiyel değeri, EZ43B numunesine kıyasla negatif bölgeye yani aktif bölgeye daha yakındır. EZ43A numunesinin akım yoğunluğunun düşük olmasına rağmen potansiyelinin negatif alana, EZ43B numunesininkinden daha yakın olmasının nedeni EZ43A numunesinin başlangıçta daha hızlı korozyona uğradığının ardından dengeye geldiğinde korozyon hızının düştüğü ve bu nedenle de akım yoğunluğunun düşük olduğu sonucuna varılmıştır.



Şekil 4.71. EZ43 alaşımlarının potansiyodinamik korozyon testi sonuçları

4.4.2. Bir Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

Bir ve iki kez dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numuneleri vücut sıvısı çözeltisi içerisinde potansiyodinamik korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Deney numunelerinin iletkenliği sağlayabilmek için arka yüzeyine bakır tel bağlanarak yalnızca elektrolit ile temasta olan yüzeyleri açıkta kalacak şekilde epoksi ile kaplanmıştır. Deney hücresi içerisine, çalışma elektrotu olarak deney numuneleri, karşı elektrot görevini yapan karbon elektrot ve referans elektrot olarak da doygun kalomel elektrot yerleştirilmiştir.

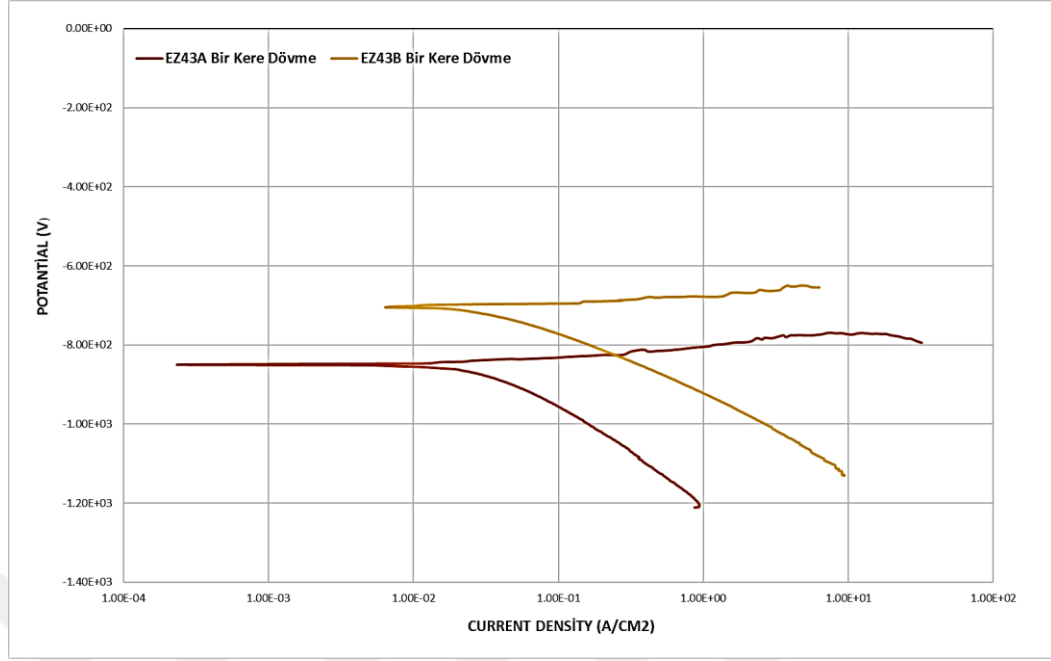
Çizelge 4.13. Ekstrüzyon sonrası potansiyodinamik testi uygulanmış olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ecor ve Icor sonuçları

	Ekstrüzyon A numunesi	Ekstrüzyon B numunesi
Ecor (Volt)	-1.34	-1.23
Icor A/cm2	48,1 x 10 ⁻⁶	142,33 x 10 ⁻⁶

Deneyler oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deney çalışmalarının tümünde, öncelikle sistemden akım geçmeksizin, vücut sıvısı çözeltisinin içine çalışma elektrodunun ve referans elektrodunun daldırılmasından itibaren ikisi arasındaki korozyon potansiyellerinin mV olarak değişimi zamana karşı ölçülmüştür. Denge potansiyeline (E_{cor}) ulaşıldıktan sonra potansiyodinamik polarizasyon eğrileri katodikten anodik yöne doğru kaydedilmiştir. Tafel eğrilerinden korozyon potansiyeli (E_{cor}) ve korozyon akım yoğunluğu (I_{cor}) hesaplanmış olup Çizelge 4.14’ de bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin potansiyodinamik testi sonrası E_{cor} - I_{cor} değerleri verilirken Şekil 4.72’de bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik grafiği verilmiştir.

Çizelge 4.14. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin potansiyodinamik testi sonrası Ecor- Icor değerleri

	Bir kere dövme uygulanmış EZ43A	Bir kere dövme uygulanmış EZ43B
Ecor (Volt)	-849	-702
Icor A/cm2	30,6 x 10 ⁻⁶	31,36 x 10 ⁻⁶



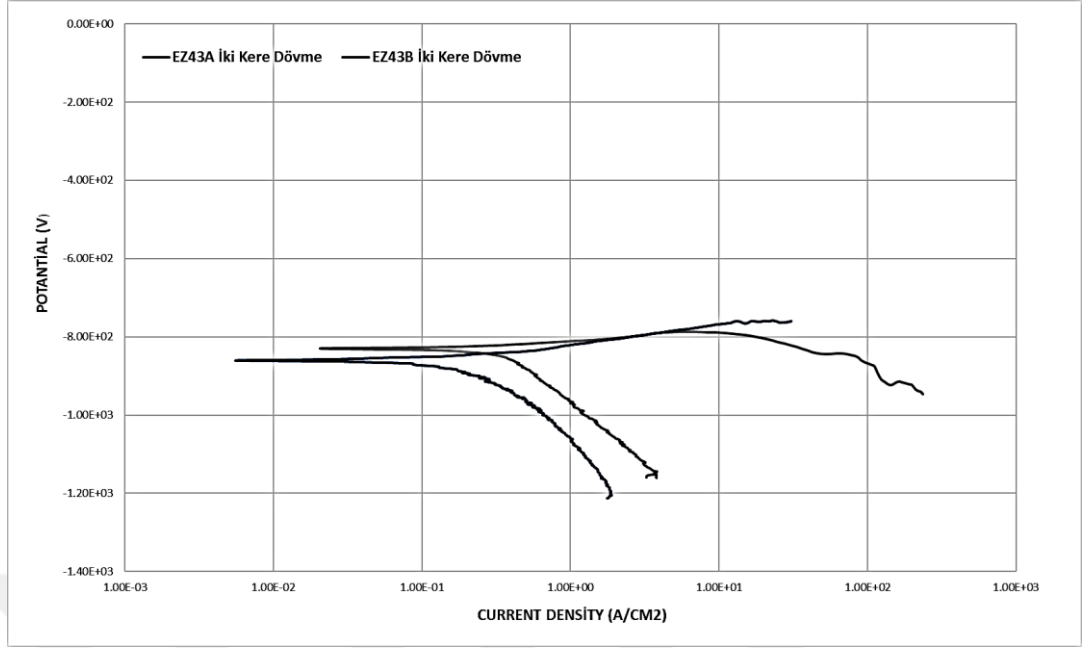
Şekil 4.72. Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik grafiği

4.4.3. İki Kere Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ekstrüzyon sonrası ve bir dövme işlemi sonrası yapıldığı yöntem ile Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) Testi yapılmış olup sonuçları Çizelge 4.15 ve Şekil 4.73'te verilmiştir.

Çizelge 4.15. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin potansiyodinamik testi sonrası Ecor- Icor değerleri

	İki kere dövme uygulanmış EZ43A	İki kere dövme uygulanmış EZ43B
Ecor (Volt)	-830	-861
Icor A/cm2	368 x 10 ⁻⁶	220,33 x 10 ⁻⁶

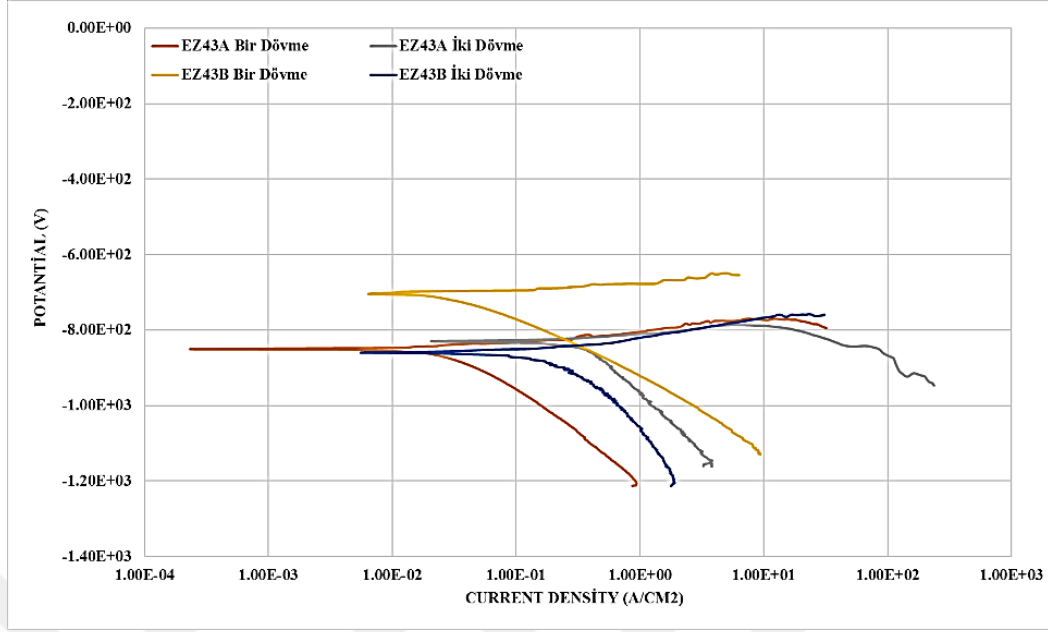


Şekil 4.73. İki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik grafiği

EZ43A ve EZ43B alaşımlarına bir ve iki dövme işlemi sonrasında uygulanan Potansiyodinamik Polarizasyon (Pd) testinin toplu sonuçları Çizelge 4.16 ve Şekil 4.74'te verilmiştir.

Çizelge 4.16. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının bir ve iki dövme sonrası Ecor/Icor değerleri

	ÇYD A1 numunesi	ÇYD A2 numunesi	ÇYD B1 numunesi	ÇYD B2 numunesi
Ecor (Volt)	-849	-830	-702	-861
Icor A/cm2	$30,6 \times 10^{-6}$	368×10^{-6}	$31,36 \times 10^{-6}$	$220,33 \times 10^{-6}$
	Ekstrüzyon A numunesi		Ekstrüzyon B numunesi	
Ecor (Volt)	-1.34		-1.23	
Icor A/cm2	$48,1 \times 10^{-6}$		$142,33 \times 10^{-6}$	



Şekil 4.74. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Potansiyodinamik korozyon grafiği

Potential (V) – Current Density (mA/cm^2) grafikleri incelenip hem anodik hem de katodik bölgedeki verilen gerilim başına çekilen akım değerlendirildiğinde Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A numunesinin korozyon potansiyeli (E_{cor}) -1.34 iken bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinin E_{cor} değerinin -849, iki kere dövme işlemine uğramış EZ43A numunesinin E_{cor} değerinin ise -830 olduğu gözlenmiştir. Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43B numunesinin korozyon potansiyeli (E_{cor}) -1.23 iken bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin E_{cor} değerinin -702, iki kere dövme işlemine uğramış EZ43B numunesinin E_{cor} değerinin ise -861 olduğu gözlenmiştir.

Bu sonuçlara göre EZ43B numunesinin korozyona uğrama potansiyelinin EZ43A numunesine göre yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Yine korozyon akım yoğunluğuna (I_{cor}) baktığımızda Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A numunesinin korozyon akım yoğunluğu (I_{cor}) $48,1 \times 10^{-6}$ iken bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinin I_{cor} değerinin $30,6 \times 10^{-6}$, iki kere dövme işlemine uğramış EZ43A numunesinin I_{cor} değerinin ise 368×10^{-6} olduğu gözlenmiştir. Yine EZ43B numunesinin korozyon akım yoğunluğuna (I_{cor}) baktığımızda Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43B numunesinin korozyon akım

yoğunluğu (I_{cor}) $142,33 \times 10^{-6}$ iken bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin I_{cor} değerinin $31,36 \times 10^{-6}$, iki kere dövme işlemine uğramış EZ43B numunesinin I_{cor} değerinin ise $220,33 \times 10^{-6}$ olduğu gözlenmiştir.

Bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesine göre iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinin korozyon potansiyelinin daha yüksek olduğu gözlenmiştir. EZ43B numunesinde ise bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin korozyon potansiyelinin iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesine göre daha düşük olduğu gözlenmiştir.

Grafiklerdeki akım yoğunluğu (I_{cor}) değerleri değerlendirildiğinde Ekstrüzyon sonrası Potansiyodinamik testine tabi tutulan EZ43A numunesinin, EZ43B numunesine göre korozyon oranının düşük olduğu görülmektedir. Bir dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerine baktığımızda ise EZ43B numunesinin EZ43A numunesine göre korozyon dayanımının kısmen daha düşük olduğu görülürken iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B numunelerinin potansiyodinamik testi sonuçlarına baktığımızda EZ43A numunesinin EZ43B numunesine göre korozyon dayanımının daha düşük olduğu değerlendirilmektedir. Buradan EZ43A numunesinde korozyon hızının daha düşük olduğu böylece korozyon dayanımının EZ43B numunesinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç daldırma testi sonucuyla tutarlılık göstermektedir.

4.5. HİDROJEN EVOLÜTİON TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

Korozyon işlemi sırasında hidrojen çıkışı, özellikle kısa süreli daldırmada Mg alaşımlarının korozyon direncini değerlendirmek için doğru bir tekniktir (Tong vd., 2016). Bir Mg atomunun çözünmesi bir H_2 molekülü üretecektir. Mg alaşımının ağırlık kaybı hacmi H_2 nin serbest bırakılması ile ölçülebilir. Bununla birlikte ağırlık kaybı yönteminde korozyon ürünlerini uzaklaştırmak için numunelerin kromik asit ile temizlenmesi gerekir. Buda Hidrojen evolution testi ile arasında küçük sapmaya neden olur (Tong vd., 2016).

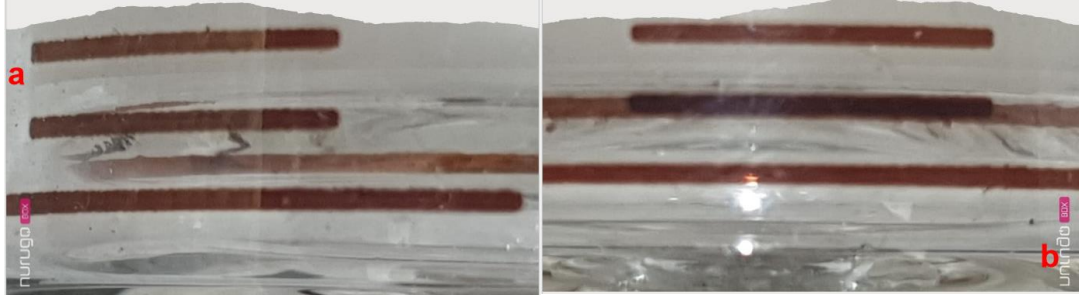
EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ekstrüzyon işlemi sonrasında ve İki dövme işlemi sonrasında Hidrojen Evolution testleri Şekil 4.75'te gösterilen beher düzenek ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.75. EZ43A ve EZ43B alaşımlarına ekstrüzyon işlemi sonrasında ve İki dövme işlemi sonrasında Hidrojen Evolution testleri düzenneği

4.5.1. Ekstrüzyon İşlemi Sonrası Yapılan Hidrojen Evolution Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

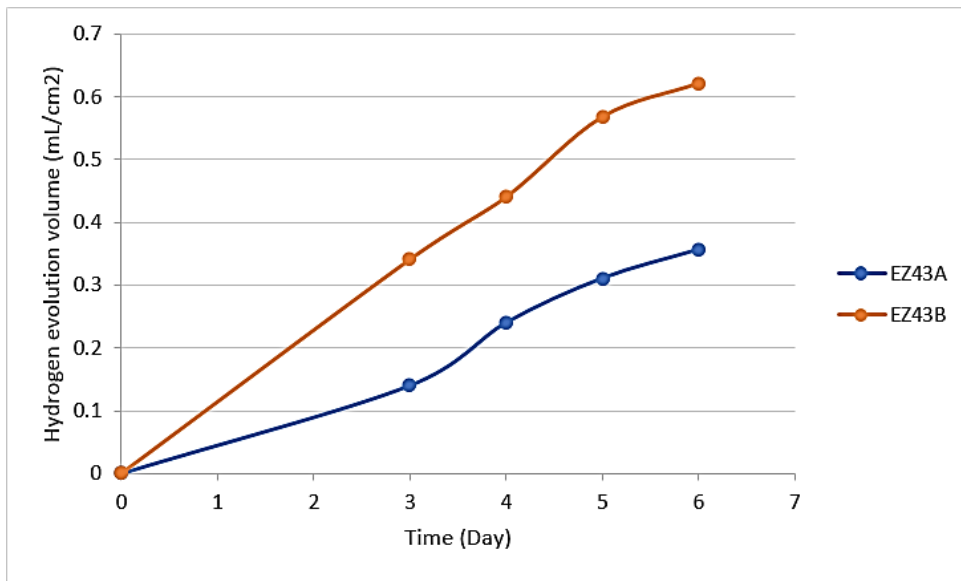
EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Hidrojen Evolution testleri Şekil 4.75'te gösterilen Beher düzenek ile gerçekleştirilirken ilk olarak beher kap içindeki vücut sıvısında (Hank Sıvısı) 144 saat bekletilecek numuneler hazırlandı. Buna göre EZ43A numunesinin ölçüleri 8.78 x 9.54 x 6.03, EZ43B numunesinin ölçüleri 9.25 x 10.35 x 6.05 dir. Beher kap içindeki numunelerin 24 saat ara ile fotoğrafları çekildi. Şekil 4.76'da verilen fotoğraflardan elde edilen verilere göre EZ43B numunesinin daha çok korozyona uğradığı görülmüştür. Beher içinde bulunan EZ43B numunesinden 2 ml hacminde hidrojen çıkışı görülmüşken EZ43A numunesinden ise 1 ml hidrojen çıkışı olduğu görülmüştür. Bu durumun Ce elementi ile ilgili olduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.76. Hidrojen Evolution testi sonrası beher düzenekte gözükten gaz çıkışı

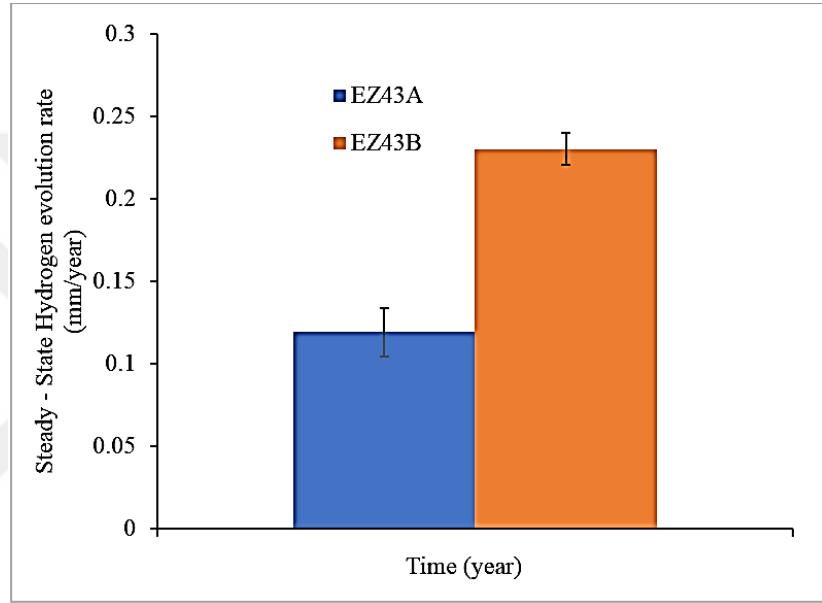
Tong ve arkadaşları da ekstrüde edilmiş Mg-Zn-Ca xCe/La'nın mikro yapıları, mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri ile ilgili yaptıkları çalışmalarda Ce oranının alaşımda artmasından sonra korozyon sürecinin hızlandığını ve daldırma süresinin 3 veya 5 günden fazla olduğunda korozyon ürünü filmlerin numune yüzeyini tamamen kaplaması ve yoğun bir bariyer etkisi oluşturması nedeniyle Ce alaşımının azaldığını da rapor etmişlerdir (Tong vd., 2016).

Ekstrüzyon işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Hidrojen Evolution testi sonrası zamana karşı Hidrojen hacminin değişim grafikleri Şekil 4.77' de verilmiştir. İncelenen tüm alaşımlarda zamana karşılık hidrojen çıkışında lineer bir değişim gözlenmiştir. Hem daldırma hem de potansiyodinamik korozyon testleri ile uyumlu olarak EZ43B'de hidrojen çıkışı EZ43A'dan daha yüksektir.



Şekil 4.77. Hidrojen evolution testi sonrası zamana karşı Hidrojen hacminin değişimi

Yukarıdaki şekilde her bir zamana karşılık ölçülen hidrojen çıkış değeri, Cheng Zhang ve arkadaşlarının yapmış oldukları “Effect of Zn concentration on microstructure and corrosion resistance of Mg-Zn alloys microalloyed with Ca and Ce” adlı çalışmadaki bağıntı kullanılarak mm/yıl cinsinden korozyon hızına dönüştürülmüştür (Zhang vd., 2020). İncelenen her iki alaşım için kararlı durum korozyon hızı karşılaştırılması Şekil 4.78’de verilmiştir. Hidrojen evolution testine göre EZ43B alaşımı EZ43A dan %91 daha yüksek korozyon göstermiştir.



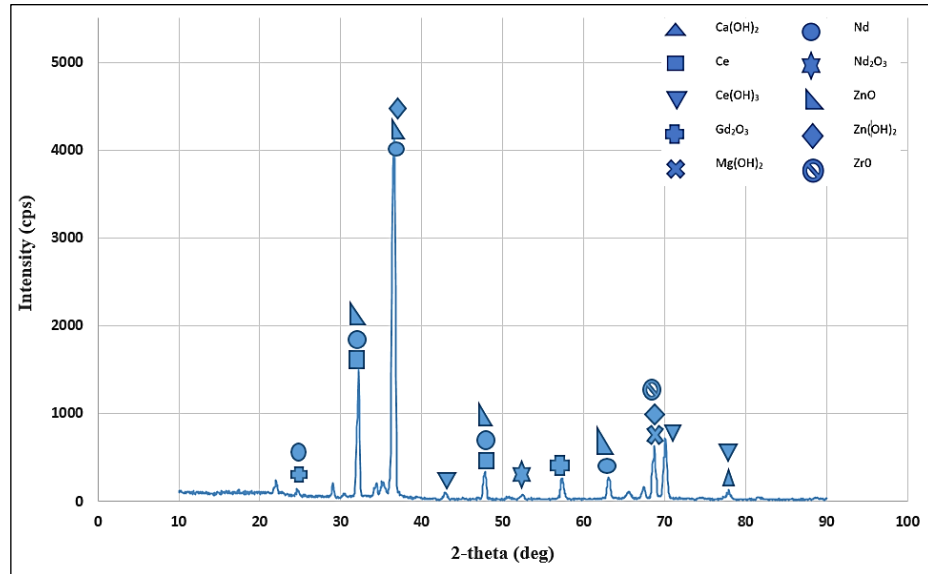
Şekil 4.78. Hidrojen evolution testi sonrası EZ43A ve EZ43B için kararlı durum korozyon hızı karşılaştırılması.

6 gün olarak gerçekleştirilen Hidrojen Evolution testi sonrası beher kabında kalan numunelerin görünümünün fotoğrafları Şekil 4.79’da verilmiştir. Fotoğraflardan elde edilen verilere göre EZ43B numunesinin daha çok korozyona uğradığı belirgindir. Bu durumun Ce elementi ile ilgili olduğu düşünülmektedir. Tong ve arkadaşları da ekstrüde edilmiş Mg-Zn-Ca xCe/La nın mikro yapıları, mekanik özellikleri ve korozyon dirençleri ile ilgili yaptıkları çalışmalarda Ce oranının alaşımda artmasından sonra korozyon sürecinin hızlandığını ve daldırma süresinin 3 veya 5 günden fazla olduğunda korozyon ürünü filmlerin numune yüzeyini tamamen kaplaması ve yoğun bir bariyer etkisi oluşturması nedeniyle Ce alaşımının azaldığını rapor etmişlerdir (Tong vd., 2016).

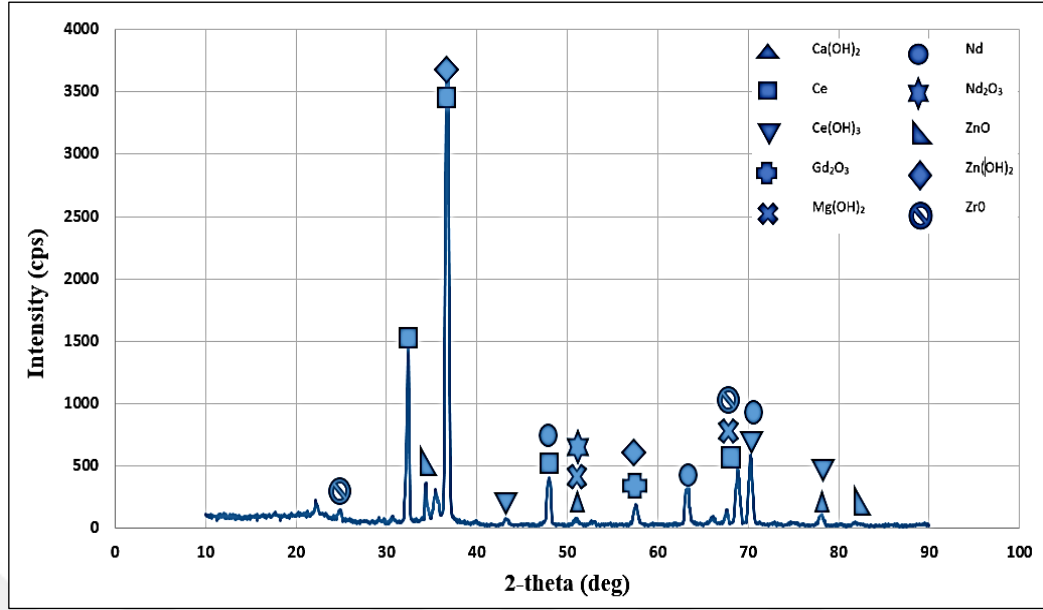
EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Hidrojen Evolution testi sonrası beher içinde kalan Şekil 4.79’ da verilen parçalar alınarak saf su ile yıkandı ve kurutuldu. Ardından faz analizleri için XRD analiz işlemi yapıldı. XRD analiz grafikleri Şekil 4.80 ve 4.81’ de verilmiş olup incelenen EZ43A ve EZ43B alaşımlarındaki fazların bileşimlerini gösteren XRD tepki spektrum sonuçlarına göre EZ43A ve EZ43B alaşımlarının XRD sonuçlarına baktığımızda; $\text{Ca}(\text{OH})_2$, Ce, $\text{Ce}(\text{OH})_3$, Gd_2O_3 , $\text{Mg}(\text{OH})_2$, Nd, Nd_2O_3 , ZnO, $\text{Zn}(\text{OH})_2$ ve ZrO korozyon ürünleri tespit edilmiştir. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının kimyasal bileşimindeki farklar, tane boyutu hariç, oluşan fazların sayısını ve tipini değiştirmemiştir.



Şekil 4.79. Hidrojen Evolution testi sonrası beher kabında kalan numunelerin görünümünün fotoğrafları. a) EZ43A b) EZ43B



Şekil 4.80. Ekstrüzyon işlemi yapılmış EZ43A alaşımlarının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği

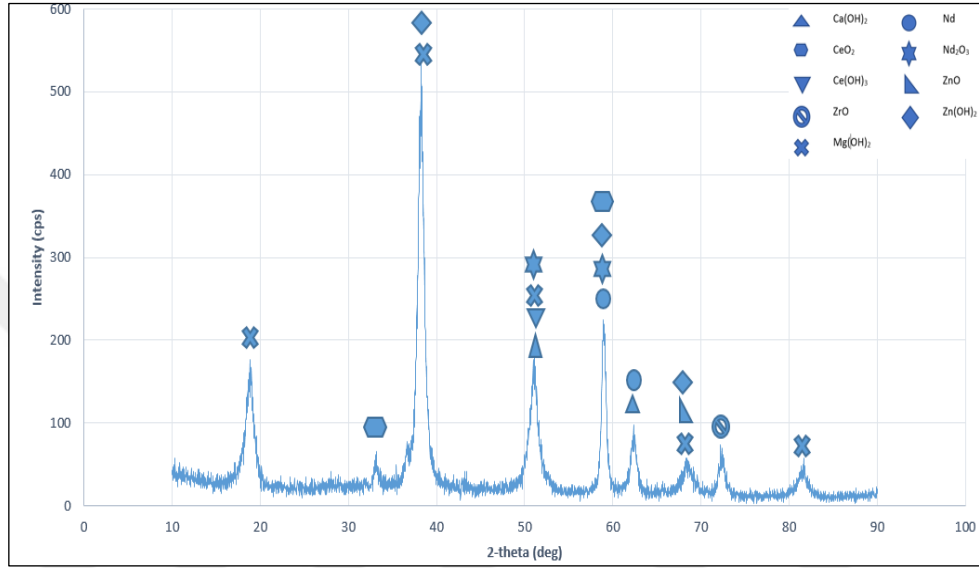


Şekil 4.81. Ekstrüzyon işlemi yapılmış EZ43B alaşımının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği

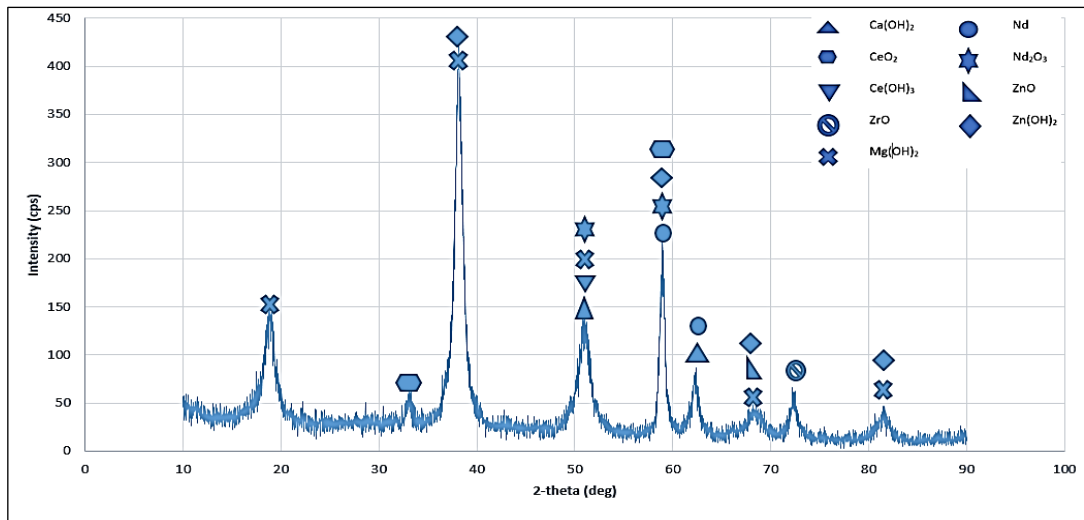
4.5.2. İki Dövme İşlemi Sonrası Yapılan Hidrojen Evolution Testi Sonuçları ve Değerlendirilmesi

İki kere dövme işlemine tabi tutulmuş olan EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Hidrojen Evolution testleri şekil 4.75’ te gösterilen beher düzenek ile gerçekleştirilmiştir. İki kere dövme işlemine tabi tutulmuş 19*0.6 mm boyutlarındaki dikdörtgen şeklindeki EZ43A numunesi ile 11*13*16.5 mm boyutlarında üçgen şeklindeki EZ43B numuneleri beher içindeki vücut sıvısında (Hank sıvısı) 144 saat bekletilmiş ve numunelerin 24 saat ara ile fotoğrafları çekilmiştir. Beher içinde bulunan EZ43A numunesinin üçüncü gün sonunda tamamen dağıldığı, hank sıvısının renginin değişerek açık pembe rengi aldığı gözlemlenmiştir. Yine EZ43A numunesinin bulunduğu beher kaptan ölçülemeyecek birimde çok az hidrojen çıktığı gözlemlenmiştir. EZ43B numunesinin EZ43A numunesine göre üçüncü gün sonunda bütünlüğünü koruduğu ve beher içindeki hank sıvısının renginin bozulmadığı gözlemlenmiştir. Yine EZ43B numunesinin bulunduğu beher kaptan 0.5 ml hidrojen çıktığı gözlemlenmiştir. Ekstrüzyon işleminden sonrası yapılan Hidrojen evolution testinde ise B numunesinden 2 ml, A numunesinden ise 1 ml hidrojen çıktığı gözlemlenmiştir.

EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Hidrojen Evolution testi sonrası beher içinde kalan parçaları alınarak saf su ile yıkandı ve kurutuldu. Ardından kimyasal bileşimleri KBÜ laboratuvarlarında XRF yöntemi ile Rigaku ZSX Primus II marka cihaz kullanılarak belirlenmiştir. Analiz sonuçları gösteren grafikler Şekil 4.82 ve Şekil 4.83'te verilmiştir.



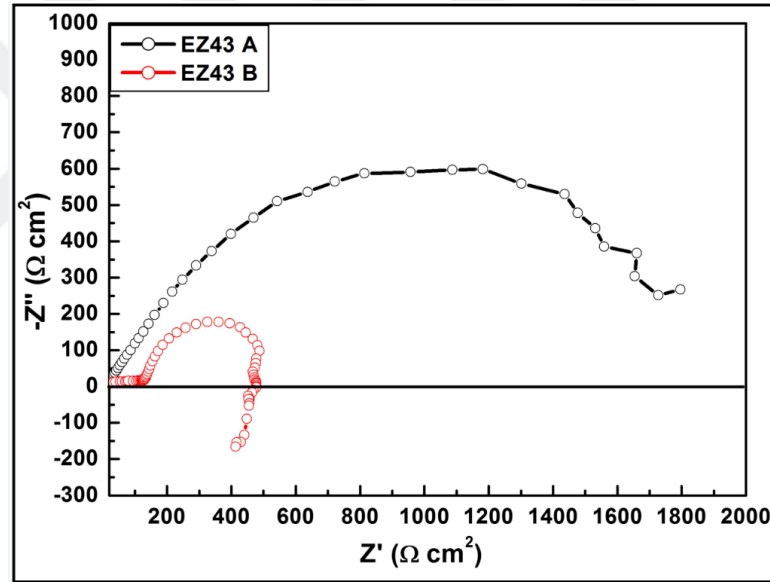
Şekil 4.82. İki dövme işlemi sonrası EZ43A alaşımının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği.



Şekil 4.83. İki dövme sonrası EZ43B alaşımının Hidrojen Evolution testi sonrası ağırlıkça element miktarı ve bileşimlerini gösteren XRD grafiği.

4.6. EMPEDANS TESTİ SONUÇLARI VE DEĞERLENDİRİLMESİ

EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Ekstrüzyon işlemi sonrası Empedans testi uygulanmıştır. EZ43 alaşımlarına Empedans testi Hank sıvısı içerisinde gerçekleştirilmiştir. Potansiyodinamik polarizasyon testi için hazırlanan numunelerin yüzeyleri, potansiyodinamik polarizasyon testinden sonra 1200 ve 2000 numaralı zımparalar ile temizlenmiş ve yüzeyine tekrar 0,25 cm² yuvarlak boş bir alana sahip yapışkan bant uygulanarak yapılmıştır. EIS deneyleri 10⁵ Hz ila 10⁻² Hz frekans aralığında 10mV'lik AC genliği ile açık devre potansiyelinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.84' de EZ43 alaşımlarının Ekstrüzyon işlemi sonrası elektrokimyasal empedans ölçümleri (EIS) sonrası oluşturulan Nyquist eğrileri verilmiştir.



Şekil 4.84. Elektrokimyasal empedans ölçümleri (EIS) sonrası oluşturulan Nyquist eğrileri

Şekil 4.84'te verilen EIS sonrası oluşturulan Nyquist eğrileri incelendiğinde, alaşımların korozyon dirençleri alaşım elementi ilavesi ile farklılık göstermiş olduğu tespit edilmiştir.

Elde edilen sonuçlar incelendiğinde EZ43A alaşımının elektrokimyasal empedans ölçümü (EIS) değerinin 1900 Ω.cm² olduğu gözlenirken, EZ43B alaşımının elektrokimyasal empedans ölçümü (EIS) değerinin 400 Ω.cm² olduğu görülmüştür.

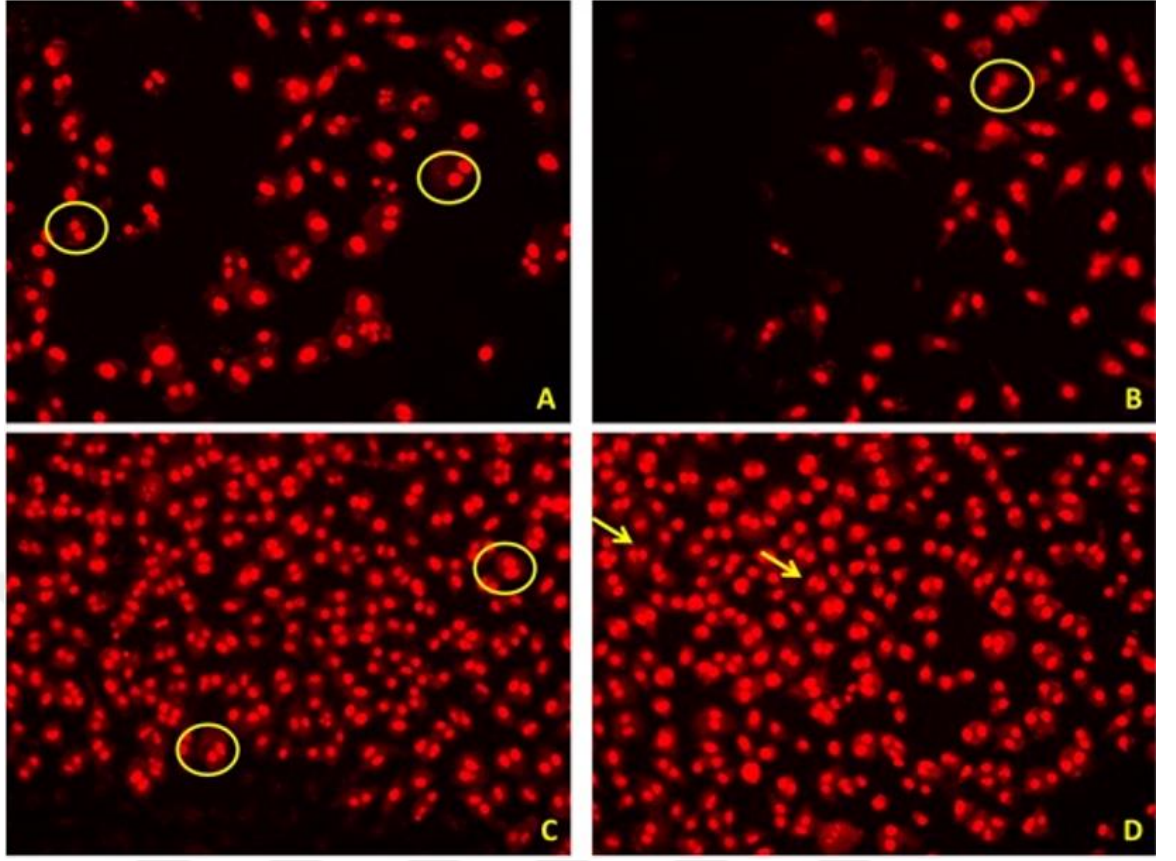
EZ43B alaşımının frekans kapasitans d6ngüsünün apı EZ43A alaşımınınkinden dūřuktur. Bu da yük transfer direncinin de EZ43B alaşımının EZ43A alaşımından dūřuk olduğunu g6stermektedir. Tong ve arkadaşları yaptıkları çalışmada; Mg-Zn-Ca-Ce alaşımının yüksek frekans kapasitans d6ngüsünün apı, Mg-Zn-Ca alaşımınınkinden çok daha küçük olduğunu ve Ce ilavesinin Nyquist izimlerinin boyut değişimleriyle uyumlu olan yüzey filminin hızlı bir şekilde bozulmasına neden olduğunu ima etmişlerdir (Tong vd., 2016).

Yapılan literatür çalışmalarında magnezyum alaşımlarının saf magnezyuma g6re daha çok korozyon direnci g6sterdiği g6rlmektedir (Dong vd., 2015). Mg alaşımlarının alaşım elementlerinin varlığında daha yüksek korozyon direnci, daha sürekli bir ağ oluşumu ile ince hale gelmiş β -fazı, daha az zararlı bir intermetalik oluşumu ile β -fazı oluşumunun bastırılması ve koruyucu filme eklenen elementler ile stabilitesinin artması gibi çeşitli fakt6rlere bağlanmıştır (Venkateswarlu vd., 2013; Yuan vd., 2019). Hem alaşım elementi ilavesi hem de ekstrüzyon etkisi neticesinde alaşımların korozyon dirençlerinde ortaya çıkan farklılıklar potansiyodinamik polarizasyon testi ve empedans 6lmleri ile tutarlı ve anlamlı hale gelmiştir.

4.7. BİYOUYUMLULUK HÜCRE KÜLTÜRÜ TESTLERİ SONUÇLARI VE DEğERLENDİRİLMESİ

4.7.1. Genotoksisite Testi

Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Biyo uyumluluk kapsamında Geno Toksisite testleri yapılmıştır. Testlerde Genetik yapıyı bozup bozmadıklarına ve Bakterileri 6ldrp 6ldrmediklerine bakılmıştır. Geno Toksitite testleri sonrasında her iki alaşımında Genetik yapıyı bozmadıkları izlenmiştir.



Şekil 4.85. Geno Toksikite testi sonuçları A) EZ43A B)EZ43B C) Negatif Kontrol D) Pozitif Kontrol

Geno Toksikite testlerinde ise Şekil 4.85'te gözüktüğü üzere Genomlar oluşmuş ve çiftleşmeler ve üremeler devam etmiştir. Genom bozukluk olmadığı gözlemlenmiştir.

4.7.2. Sitotoksosite Testi

Ekstrüzyon işlemine tabi tutulmuş EZ43A ve EZ43B alaşımlarına Biyo uyumluluk kapsamında Sitotoksosite testleri yapılmıştır. Testlerde Genetik yapıyı bozup bozmadıklarına ve Bakterileri öldürüp öldürmediklerine bakılmıştır. Testlerde Genetik yapıyı bozup bozmadıklarına ve Bakterileri öldürüp öldürmediklerine bakılmıştır.

Sitotoksosite testlerinde EZ43A alaşımının Bakteri sayısında %142 den fazla artış sağladığı ve EZ43B alaşımının ise Bakteri sayısında %116 artış sağladığı izlenmiştir. Standartlara göre %70 den fazla olursa malzeme Biyoyumlu olduğundan her iki alaşımında biyoyumlu alaşım olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.17. Sitotoksosite testi % canlılık sonuçları

	ez 43-a rich Nd				ort	ez-43 B rich Ce			ort
1/1	139,8277	144,5986	142,9116	142,446		116,2268	113,3696	115,0476	114,8813
1/2	117,2426	121,6417	122,8209	120,5684		111,2381	115,1202	111,0204	112,4596
1/4	96,30839	102,8209	101,9955	100,3749		111,0113	113,034	112,1542	112,0665
1/8	103,9002	99,13832	101,9955	101,678		100,3719	98,40091	177,415	125,3959

BÖLÜM 5

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada Yeni bir alaşım olan EZ43A ve EZ43B alaşımları üretilerek, üretilen bu alaşımların mikro yapı, mekanik, korozif ve biyouyumluluk testleri yapılarak incelenmiştir. Yapılan test ve analiz neticesinde elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

1. EZ43A alaşımı EZ43B alaşımından daha iri tanelidir. EZ43B alaşımının tane boyutu 8,52 μm iken EZ43A alaşımının tane boyutu 9,01 μm 'dir.
2. EZ43A ve EZ43B alaşımlarının Ekstrüzyon sonrası XRD sonuçları incelendiğinde α -Mg, Mg_{0.97}Zn_{0.03}, Mg₄₁Nd₅, Mg₁₇Ce₂, Mg₂Ca, Mg₃Gd ve Zr intermetalik fazları gözlenmiştir. EZ43A ve B alaşımlarının kimyasal bileşimindeki farklılıklar, tane boyutu dışında, oluşan fazların sayısını ve türünü değiştirmemiştir.
3. Alaşımların EDX analiz sonuçları, EZ43A alaşımının tane sınırlarında Mg_{0.97}Zn_{0.03}/Mg₄₁Nd₅/Mg₃Gd karışık intermetaliklerden üçlü bir ötektik yapı oluştuğunu, EZ43B alaşımının tane sınırlarında ise Mg_{0.97}Zn_{0.03}/Mg₄₁Nd₅/Mg₃Gd/Mg₁₇Ce₂ dörtlü fazlarının oluştuğunu göstermektedir.
4. Ce/Nd oranı arttıkça, akma ve çekme mukavemeti sırasıyla %2 ve %6 oranında iyileşmiştir. Elastisite modülündeki artış ise %3'tür. %2 Ce ilavesi, oluşan intermetalikler nedeniyle sertlikte %5'lik bir iyileşmeye yol açmıştır.

5. EZ43A alaşımının (%1 Ce ve %2 Nd içeren) kuru ortam aşınma davranışı, EZ43B'ninkinden (%2 Ce ve %1 Nd ile alaşımlandırılmış) %7,8 daha şiddetlidir. Korozi ortam aşınma testinde, Nd içeriğinin %1'e dūřürölmesi (EZ43B) aşınma miktarını %56 oranında azaltmıştır.
6. EZ43 alaşımlarının mikroyapısı incelendiğinde, eş eksenli bir yapı gözlenmiştir. Tane sınırlarında sürekli uzanan intermetalik fazlar gözükmemektedir. EZ43A açık gri renkli EZ43B ise koyu renkli intermetalik fazlardır.
7. Ekstrüde edilen numunelerin tane yapıları incelendiğinde tanelerin genellikle eř boyutlu olduğu görölmektedir. Yine çevrelerinde ötektik karışım ve kompleks intermetalik fazların varlığını dūřündüren yüksek konsantrasyonda alaşım elementleri ve deformasyon ikizleri gözlenmiştir.
8. Ekstrüde edilmiş EZ43A numunesinin korozyona uğrama hızı, EZ43B numunesinin korozyona uğrama hızından düşük olduğu görölmektedir. Buradan A numunesinin, B numunesine kıyasla korozyon dayanımının daha yüksek olduğu sonucuna varılmaktadır. Mdd-Gün daldırma grafiğine bakıldığında, her iki A ve B numunesinde korozyon hızı başlangıçta artış göstermektedir. Ancak ardından zamanla korozyon hızında azalma söz konusudur. Bunun nedeni magnezyumun yüzeyinde oluşturduğu oksit tabakası pasif özellik göstererek korozyon hızının azalmasına neden olmaktadır.
9. Daldırma korozyon deneyi sonrası numunelere uygulanan SEM görüntölleme işlemi sonrasında numuneler de çukur korozyon oluştuğu gözlenmektedir.
10. Potansiyodinamik Korozyon Testi Potential (V) – Current Density (mA/cm²) grafiği incelenip hem anodik hemde katodik bölgedeki verilen gerilim başına çekilen akım değerlendirildiğinde B numunesinin A numunesine göre daha pasif davrandığı grafik eğrilerinden anlaşılmaktadır. Bunların dışında grafiklerde herhangi bir aktifleşme ya da pasifleşme bölgesi oluşmamıştır.
11. Potansiyodinamik Korozyon Testi Grafiğindeki akım yoğunluğu (I_{cor}) değerleri değerlendirildiğinde A numunesinin, B numunesine göre korozyon

oranının düşük olduğu gör÷lmektedir. Buradan A numunesinde korozyon hızının daha düşük olduğu böylece korozyon dayanımının B numunesinden daha yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. Bu sonuç daldırma testi sonucuyla tutarlılık göstermektedir.

12. Hidojen Evolution Testi sonrasında EZ43B numunesinin daha çok korozyona uğradığı gör÷lmüştür.
13. EZ43A alaşımının elektrokimyasal empedans ölçümü (EIS) değerinin 1900 $\Omega.cm^2$ olduğu gözlenirken, EZ43B alaşımının elektrokimyasal empedans ölçümü (EIS) değerinin 400 $\Omega.cm^2$ olduğu ve EZ43B alaşımının frekans kapasitans döngüsünün çapının EZ43A alaşımınıninkinden düşük olduğu gör÷lmüştür. Bu da EZ43B alaşımının yük transfer direncinin EZ43A alaşımından düşük olduğunu göstermektedir.
14. Bir kere dövme işlemi Uygulanmış EZ43A numunesinin iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesine göre mesafeye bağı ağırlık kaybının kısmen daha düşük olduğu gör÷lmektedir. Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış A numunesi ile çok yönlü dövme işlemi uygulanmış A numunelerinin kıyaslandığında ise ÇYD işlemi uygulanmış numunelerin Ekstrüzyon işleminden sonra Adhezif aşınma testi uygulanmış numuneye göre mesafeye bağı ağırlık kaybının çok daha yüksek olduğu gör÷lmektedir.
15. Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış EZ43B numunesi ile bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinin kıyaslandığında ise Dövme işlemi uygulanmış B numunesinin Ekstrüzyon işleminden sonra Adhezif aşınma testi uygulanmış numuneye göre mesafeye bağı ağırlık kaybının çok daha yüksek olduğu gör÷lmektedir. Ve yine tüm numunelerin birlikte değerlendirildiğinde Bir kere dövme işlemi uygulanmış B numunesinin mesafeye bağı ağırlık kaybının diğer numunelerle kıyaslandığında çok daha yüksek olduğu gör÷lmektedir.
16. Ekstrüzyon sonrası EZ43A ve B numunelerinin Ağırlık kaybı – Mesafe eğrisinde Koroziif aşınma eğrilerine bakıldığında, A numunesinin B

numunesine göre mesafeye bağı ağırlık kaybının daha yüksek olduğı görölmektedir.

17. Bir kere dövme işlemi Uygulanmış A numunesinin iki kere dövme işlemi uygulanmış A numunesine göre mesafeye bağı ağırlık kaybının daha yüksek olduğı görölmektedir.
18. Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış A numunesi ile Çok yönlü dövme işlemi uygulanmış A numunelerinin kıyaslandığında ise Bir kere Dövme işlemi Uygulanmış A numunesinin mesafeye bağı ağırlık kaybının Ekstrüzyon işleminden sonra koroziif aşınma testi uygulanmış numuneye göre mesafeye bağı ağırlık kaybının çok daha yüksek olduğı görölmektedir. İki kere dövme işlemi uygulanmış A numunesinin Mesafeye bağı ağırlık kaybının Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış A numunesine göre daha düşük olduğı gözlenmiştir.
19. Ekstrüzyon sonrası adezif aşınma uygulanmış B numunesi ile bir kere dövme işlemi uygulanmış B numunesinin kıyaslandığında ise Bir kere Dövme işlemi Uygulanmış B numunesinin mesafeye bağı ağırlık kaybının Ekstrüzyon işleminden sonra koroziif aşınma testi uygulanmış numuneye göre mesafeye bağı ağırlık kaybının çok daha düşük olduğı görölmektedir.
20. Bir kere dövme işlemi uygulanmış B numunesinin mesafeye bağı ağırlık kaybının diğ er numunelerle kıyaslandığında en düşük düzeyde olduğı gözlenmiştir.
21. Biyo uyumluluk kapsamında yapılan Geno Toksinite testleri sonrasında her iki al aşımında Genetik yapıyı bozmadıkları izlenmiştir. Geno Toksisite testlerinde Genomlar oluşmuş, çiftleşmeler ve üremeler devam etmiştir. Genom bozukluk olmadığı gözlemlenmiştir.
22. Biyo uyumluluk kapsamında yapılan Sito toksite testlerinde EZ43A al aşımının Bakteri sayısında %142 den fazla artış sağladığı ve EZ43B al aşımının ise Bakteri sayısında %116 artış sağladığı izlenmiştir. Standartlara

göre %70 den fazla olursa malzeme Biyouyumlu olduğundan her iki alaşımında biyouyumlu alaşım olduğu görülmüştür.

23. EZ43 alaşımlarının mikroyapısı incelendiğinde, birinci dövme işlemi sonrasında iç yapıda deformeler olduğu görülmüş, ikinci dövme işlemi sonrası ise bu deformasyonların arttığı ve tane sınırlarında kopmaların meydana geldiği görülmüştür.

24. SEM görüntülerinden ve EDX analiz sonuçlarından EZ43A alaşımına kıyasla EZ43B alaşımında daha yoğun intermetalik oluşumu belirlenmiştir. Ötektik karışım ve kompleks intermetalik fazların varlığını düşündüren yüksek konsantrasyonda alaşım elementleri gözlenmiştir.

25. Alaşımların sertlik değerlerine baktığımızda bir ve ikinci dövme arasında kayda değer bir değişimin olmadığı gözlemlenirken Ekstrüzyon sonrası alınan sertlik değeri ile çok yönlü dövme sonrası alınan sertlik değerleri arasında Ekstrüzyon sonrası ölçülen sertlik değerlerine göre EZ43A numunesinde %25 EZ43B numunesinde ise %28'lik bir artış söz konusu olmuştur.

26. Çekme testi sonucunda elde edilmiş olan gerilme -uzama diyagramlarından elde edilen akma ve çekme dayanımları ile elastisite modülü değerleri sonuçlarına göre, Ce/Nd oranı 0,5 olan EZ43A alaşımının akma dayanımının 199,18 MPa, Ce/Nd oranı 2 olan EZ43B alaşımının akma dayanımının ise 202,88 MPa olduğu görülmektedir. Ayrıca EZ43A alaşımının çekme dayanımının 242,30 Mpa, EZ43B alaşımının ise 257,13 Mpa olduğu görülmektedir. Elastik modülüne baktığımızda ise EZ43A alaşımının elastik modülünün 103,13 Gpa, EZ43B alaşımının ise 115,80 Gpa olduğu görülmektedir. İncelenen alaşımlarda Ce/Nd oranı arttıkça Mg_{0.97}Zn_{0.03}/Mg₄₁Nd₅/Mg₃Gd/Mg₁₇Ce₂ kuaterner ötektik yapısındaki artışa bağlı olarak EZ43B alaşımının mukavemet özelliklerinin bir miktar arttığı gözlemlenmiştir.

27. Hem kuru ortam hem de korozyon ortam aşınma testinde %1 Ce ilave edilen EZ43A numunesinin ağırlık kaybı değerleri %2Ce ilave edilen EZ43B numunesininkilerine göre daha yüksek olduğu görülmektedir. Ekstrüzyon

işlemi uygulanmış EZ43A ve EZ43B alaşımlarının kuru aşınma sonuçlarına baktığımızda EZ43A numunesi EZ43B numunesine göre % 7.8 daha fazla aşınmıştır. Ayrıca Korozif ortam ağırlık kayıpları kuru ortam ağırlık kayıplarından belirgin bir şekilde yüksektir. EZ43A numunesi, kuru ortama kıyasla, korozif ortamda %144 daha fazla aşınmıştır. EZ43B numunesi ise kuru ortama kıyasla, korozif ortamda %68 daha fazla aşınmıştır. İncelenen numunelerin korozif aşınma sonuçları kendi içerisinde incelendiğinde, EZ43A alaşımının EZ43B alaşımından % 56 daha fazla korozif ortamda aşınma gösterdiği görülmüştür.

28. Alaşımların korozif ortam aşınma yüzey görüntüleri incelendiğinde, EZ43A alaşımının düz, parlak yüzey sergilediğini ve EZ43B alaşımının ise aşınma sonrasında pürüzlü bir yüzey geride bıraktığını görülmektedir.
29. Bir kere dövme işlemi sonrası Ağırlık kaybı – Mesafe eğrisinde Adhezif aşınma eğrilerine bakıldığında EZ43A numunesinin EZ43B numunesine göre mesafeye bağlı ağırlık kaybının daha düşük olduğu görülmektedir. Buradan, EZ43A numunesinin EZ43B numunesine göre adhezif aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmaktadır. Ağırlık kaybı – Mesafe eğrisinde korozif aşınma eğrilerine bakıldığında, EZ43A numunesinin EZ43B numunesine göre mesafeye bağlı ağırlık kaybının daha yüksek olduğu görülmektedir. Buradan, EZ43B numunesinin EZ43A numunesine göre korozif aşınmaya karşı da daha dayanıklı olduğu sonucuna varılmaktadır. Ayrıca Ağırlık kaybı – Mesafe eğrisinde de görüldüğü üzere korozif aşınmada A ve B numunesi arasındaki ağırlık kaybı farkının adhezif aşınmaya göre daha yüksek olduğu görülmektedir.
30. En yüksek korozyona uğrama hızının bir kere dövme işlemi uygulanmış EZ43A numunesinde olduğu gözlemlenirken en düşük korozyona uğrama hızının ise iki kere dövme işlemi uygulanmış EZ43B numunesinde olduğu gözlemlenmiştir.
31. İncelenen tüm alaşımlarda zamana karşılık hidrojen çıkışında lineer bir değişim gözlenmiştir. Hem daldırma hem de potansiyodinamik korozyon testleri ile uyumlu olarak EZ43B’de hidrojen çıkışı EZ43A’dan daha yüksektir.

5.2. ÖNERİLER

Mg alaşımlarının sahip olduğu mekanik, mikroyapı ve biyo özellikleri sayesinde Mühendislik ve Tıp alanında gelecek vadetmekte olup daha farklı alanlarda daha yaygın olarak kullanılmak üzere daha fazla miktar ve çeşitte alaşım elementleri ilavesi ile daha üstün özelliklere sahip Mg alaşımları ve malzemeler üretilebilir.



KAYNAKÇA

Alemdağ, Y., Karabıyık, S. and Pürçek G., “Effect of multi-directional hot forging on mechanical and tribological properties of Al-7Si-4Zn-3Cu alloy”, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi university*, 36 (1): 255 – 256 (2021).

Andreas, F., Christian, L., Andreas, F. and Johann, W., “The new BMW inline six-cylinder composite Mg/Al crankcase”, *BMW AG: IMA*, Germany, (2005).

Aoba, T., Kobayashi, M. and Miura, H., “Microstructural Evolution and Enhanced Mechanical Properties by Multi-Directional Forging and Aging of 6000 Series Aluminum Alloy”, *Materials Transactions*, 59 (3): 373-379 (2018).

Avedesian, M. M. and Baker, H., "ASM Specialty Handbook: Magnesium and Magnesium Alloys", *ASM International*, 336 SAYFA-EKSİK (1999).

Aydın, H., Şendeniz, M., Demirci, A. H., “Ekstrüzyon Öncesi ve Sonrası Uygulanan Isıl İşlemlerin AA 6063 Alüminyum Alaşımının Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisi”, *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14 (2), 1-10, (2009).

Azushima, A., Kopp, R., Korhonen, A., Yang, D. Y., Micari, F., Lahoti, G. D., Groche, P., Yanagimoto, J., Tsuji, N., Rosochowski, A. and Yanagida, A., “Severe Plastic Deformation (SPD) Processes for Metals”, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57: 716-735 (2008).

Baik, S. C., Hellmig, R. J., Estrin, Y. and Kim, H. S., “Modelling of Deformation Behavior of Copper under Equal Channel Angular Pressing”, *Zeitschrift fuer. Metallkunde*, 94 (6): 754-760 (2003).

Ball, E. A. and Prangnell, P.B., “Tensile-compressive yield asymmetries in high strength wrought magnesium alloys”, *Scr. Metall. Mater.* 31: 111–116 (1994).

Barber, L.P., “Characterization of the solidification behavior and resultant microstructures of magnesium-aluminum alloys”, A Thesis of Master, *Worcester Polytechnic Institute*, Worcester, 10 - 46 (2004).

Barnett, M. R., Keshavarz, Z., Beer, A. G. and Atwell, D., “Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg–3Al–1Zn”, *Acta Mater.* 52: 5093 (2004).

Bhadeshia, H.K.D.H., “Solid Solutions: The Hume-Rothery Rules”, <https://www.phase-trans.msm.cam.ac.uk/2004/titanium/hume.rothery.html> (2023)

Bingöl, S., “Kalıp girişinin ekstrüzyon edilebilirlik üzerindeki etkisi”, *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 7 (1): 159 -167 (2016).

Birbilis, N., Cavanaugh, M. K., Sudholz, A. D., Zhu, S. M., Easton, M. A. and Gibson, M. A. “Performance-driven design of Biocompatible Mg alloys”, *Corros. Sci.* 53: 168–176 (2010).

Biswas, S. and Suwas, S., “Evolution of sub-micron grain size and weak texture in magnesium alloy Mg–3Al–0.4Mn by a modified multi-axial forging process”, *Scripta Materialia*, 66 (2): 89-92 (2012).

Blawert, C., Hort, N. and Kainer, K. U., “Automotive applications of magnesium and its alloys”, *Trans. Indian. Inst. Met.*, 57: 397–408 (2004).

Bohlen, J., Yi, S., Letzig, D. and Kainer, K. U., “Effect of Rare Earth Elements on the Microstructure and Texture Development in Magnesium–Manganese Alloys During Extrusion”, *Materials Science and Engineering A*, 527: 7092– 7098 (2010).

Bourget, J. P., Fafard, M., Shakeri, H. R. and Côté, T. “Optimization of heat treatment in cold-drawn 6063 aluminium tubes”, *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (11): 5035-5041 (2009).

Büyükgenç, Ö., “AM60 and AZ61 Magnezyum Alaşımlarının Soğuma Hızına Bağlı Mekanik ve Mikroyapı Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2011).

Cao, Y., Ni, S., Liao, X., Song, M. and Zhu, Y., “Structural evolutions of metallic materials processed by severe plastic deformation”, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 133: 1-59 (2018).

Cherukuri, B., Nedkova, T. S. and Srinivasan, R., “A comparison of the properties of SPD-processed AA- 6061 by equal-channel angular pressing, multi-axial compressions/forgings and accumulative roll bonding”, *Materials Science and Engineering: A*, 93: 410-411, 394- 397, (2005).

Chia, T. L., Easton, M. A., Zhu, S. M. and Gibson, M. A., Birbilis, N., Nie, J. F., “The effect of alloy composition on the microstructure and tensile properties of binary Mg-rare earth alloys”, *Intermetallics*, 17: 481–490 (2009).

Ding Y, Wen C, Hodgson P, Li Y. “Effects of alloying elements on the corrosion behavior and biocompatibility of biodegradable magnesium alloys: a review”, *J Mater Chem B*, 2: 1912–1933 (2014).

Dobrzanski, L.A., Tanski, T., Cizek, L., Brytan, Z., “Structure and properties of magnesium cast alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192/193: 567-574 (2007).

Dong, K., Y. Song, D. Shan, and E. H. Han, “Formation mechanism of a self-sealing pore micro-arc oxidation film on AM60 magnesium alloy”, *Surf Coat Technol*, 266: 188–196, (2015).

Elen, L., “Mg-Ag Alaşımlarının Mekanik and Biyo çözünebilirlik Özelliklerine İlave Elementlerin Etkisinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Karabük (2021).

Eliezer, D., Aghion, E. and Froes, F. H., “Magnesium science, technology and applications”, **Advanced Performance Materials**, 5: 201-212 (1998).

Elmar Willbold, E., Gu, X., Devon, A., Kalla, K., Bobe, K., Brauneis, M., Janning, C., Nellesen, J., Czayka, W., Tillmann, W., Zheng, Y. and Witte, F. “Effect of the addition of low rare earth elements (lanthanum, neodymium, cerium) on the biodegradation and biocompatibility of magnesium”, **Acta Biomaterialia**, 11: 554-562 (2015).

Fei, Z. D., Gang Q. F., Wei L., Liang S. G. and Bing Z. X., “Effects of Ce Addition on Microstructure and Mechanical Properties of Mg-6Zn-1Mn Alloy”, **Trans. Nonferrous Met. Soc.** 21 (4): 703-710 (2011).

Friedrich, H. E. and Mordike, B. L., "Magnesium technology metallurgy", Design Data, Applications, **Springer**, Berlin, 80–124 (2006).

Friedrich, H. and Schumann, S., “Research for a new age of magnesium in the automotive industry”, **Journal of Materials Processing Technology**, 117: 276-281 (2001).

Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F. and Wu, S., “Potential automotive uses of wrought magnesium alloys”, **Automotive Technology Development**, Detroit, Michigan, 1-7 (1996).

Gao, L., Chen, R. S. and Han, E. H., “Effects of rare-earth elements Gd and Y on the solid solution strengthening of mg alloys”, **J. Alloy. Compd.**, 481: 379–384 (2009a).

Golmakaniyoon, S. and Mahmudi, R., “Comparison of the Effects of La- and Ce-Rich Rare Earth Additions on the Microstructure, Creep Resistance, and High- Temperature Mechanical Properties of Mg–6Zn–3Cu Cast Alloy”, **Materials Science and Engineering A**, 528: 5228–5233 (2011).

Hirsch, J. and Al-Samman, T. “Superior light metals by texture engineering: Optimized aluminum and magnesium alloys for automotive applications”, **Acta Mater.**, 61: 818–843 (2013).

Hort, N., Huang, Y., Fechner, D., Störmer, M., Blawert, C., Witte, F., Vogt, C., Drücker, H., Willumeit, R. and Kainer, K. U., “Magnesium alloys as implant materials - Principles of property design for Mg-RE alloys”, **Acta Biomater.**, 6: 1714–1725 (2010).

Hort, N., Huang, Y., Fechner, D., Störmer, M., Blawert, C., Witte, F., Vogt, C., Drücker, H., Willumeit, R. and Kainer, K. U., “Magnesium alloys as implant materials Principles of property design for Mg-RE alloys”, **Acta Biomater.**, 6: 1714–1725 (2010).

Huang, Y., Gan, W., Kainer, K. U. and Hort, N., “Role of multi-microalloying by rare earth elements in ductilization of magnesium alloys”, **J. Magnes. Alloys**, 2: 1–7 (2014).

Huppmann, M., Müller, S. and Reimers, W., “Changes of the Texture and the Mechanical Properties of the Extruded Mg Alloy ME21 as a Function of the Process Parameters”, **Materials Science and Engineering A**, 528: 342–354 (2010).

İslam, M. M., Mostafa, A. O. and Medraj, M., “Essential Magnesium Alloys Binary Phase Diagrams and Their Thermochemical Data. Journal of Materials”, **Article ID 704283**, 33: (2014).

Jun, J. H., Kim, J. M., Park, B. K., Kim, K. T. and Jung, W. J.” Effects of rare earth elements on microstructure and high temperature mechanical properties of ZC63 alloy”, **J. Mater. Sci**, 40: 2659–2661 (2005).

Kahriman, Ö. F. and Akata, H. E., “Eşit Kanallı Açısız Presleme (Ekap) Kalıplarının Geliştirilmesi ve Alüminyum Malzeme Uygulanması”, **İstanbul Aydın Üniversitesi Dergisi** 36: 51-59 (2017).

Kainer, K. U. and Von Buch, F., "The current state of technology and potential for further development of magnesium applications.", **Magnesium–alloys and technology**, 1-22 (2003).

Kainer, K. U., “Magnesium – Alloys and Technologies”, **John Wiley & Sons.**, Weinheim, 1–13 (2003).

Kai-Yang, Z., Xiao-Dong, P. and Wei-Dong, X., “Effects of Ce on Microstructure of Semi Continuously Cast Mg-1.5Zn-0.2Zr Magnesium Alloy Ingots”, **Transactions of Nonferrous Metals Society of China**, 20 (2): 324-330 (2010).

Kammer, C. and Aluminium-Zentrale, D., “Magnesium taschenbuch”, **Aluminium-Verlag**. Düsseldorf, Germany (2000).

Kara, İ. H., “Nadir Toprak Elementi İlaveli Sıcak Haddelenmiş Az31 Magnezyum Alaşımlarının Mekanik Korozyon ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2019).

Karabıyık, S., “Çok Yönlü Dövme İşleminin Çinko ve Bakır İçeren Al-7Si Esaslı Alaşımların Yapı, Mekanik ve Tribolojik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, (2019).

Karaer, H., “Biyomalzeme Olarak Magnezyum Alaşımlarının Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Mersin, (2019).

Kazdal, H. K., “Magnezyum Alaşımları : Otomotiv Endüstrisinde Uygulanması ve Geleceği”, **Tubitak Marmara Araştırma Merkezi**, Kocaeli, 3-39 (1999).

Kiani, M., Gandikota, I., Rais-Rohani, M. and Motoyama, K., "Design of lightweight magnesium car body structure under crash and vibration constraints", **Journal of Magnesium and Alloys**, 2 (2): 99–108 (2014).

Kim, H. S., Seo, M. H. and Hong, S. I., “Plastic Deformation Analysis of Metals during Equal Channel Angular Pressing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 113: 622-626, (2001).

Kim, I., Kim, J., Shin, D. H., Lee, C. S. and Hwang, S. K., “Effect of Equal Channel Angular Pressing Temperature on Deformation Structure of Pure Ti”, *Materials Science and Engineering A*, 342: 302-310 (2003).

Kim, W. J., An, C. W., Kim, Y. S. and Hong, S. I., “Mechanical Properties and Microstructures of an AZ61 Mg Alloy Produced by Equal Channel Angular Pressing”, *Scripta Materialia*, 47: 39-44 (2002).

Koç, E., “Biyooözünür Magnezyum Alaşımlarının Korozyona Bağlı Mekanik Davranışlarının Araştırılması” Doktora Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2013).

Kokubo T., Takadama H., “How useful is SBF in predicting in vivo bone bioactivity?”, *Biomaterials*, 27: 2907–2915 (2006).

Kul, O., “Aşırı Plastik Deformasyonun Saf Titanyum ve Al-12si Alaşımının Yapısal, Mekanik ve Aşınma Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Trabzon, (2009).

Lee, S.-M. and Langdon, T.G., “High Strain Rate Superplasticity in a Zn-22%Al Alloy after Equal-Channel Angular Pressing”, *Materials Science Forum*, 357 (3): 321-326 (2001).

Leil, T. A., “Development of New Magnesium Alloys for High Temperature Applications”, Doktora Tezi, *Clausthal University of Technology*, Bethlehem, (2009).

Li, C. K.-Y., Xia, Z. Y. and Sue, H. J., “Simple Shear Plastic Deformation Behavior of Polycarbonate Plate II. Mechanical Property Characterization”, *Polymer*, 41: 6285-6293 (2000).

Li, Y. and Langdon, T. G., “Equal-Channel Angular Pressing of an Al-6061 Metal Matrix Composite”, *Journal of Materials Science*, 35: 1201-1204 (2000).

Liu, W., Cao, F., Chang, L. and Zhang Z., “Effect of Rare Earth Element Ce and La on Corrosion Behavior of AM60 Magnesium Alloy”, *Corrosion Science*, 51: 1334–1343 (2009).

Liu, W. C., Chen, M. B. and Yuan, H., “Evolution of microstructures in severely deformed AA 3104 aluminum alloy by multiple constrained compression”, *Materials Science and Engineering: A*, 528 (16-17): 5405-5410 (2011).

Lowe, T. C. and Zhu, T. Z., “Commercialization of Nanostructured Metals Produced by Severe Plastic Deformation”, *Advanced Engineering Materials*, 5: 373-378, (2003).

Luo, A. A., “Wrought Magnesium Alloys and Manufacturing Processes for Automotive Applications” *SAE Trans.–J. Mater. Manuf.*, 114: 411–421 (2005).

Luo, A., Wu, W., Mishra, R., Jin, L., Sachdev, A. and Ding, W., “Microstructure and mechanical properties of extruded magnesium-aluminum-cerium alloy tubes”, ***Metallurgical and Materials Transactions A***, 41 (10): 2662-2674 (2010).

Luo, A. A., “Materials comparison and potential applications of magnesium in automobiles”, ***Magnesium Technology 2000***, Nashville, 89-99 (2000).

Mabuchi, M., Chino, Y. and Iwasaki, H., “Tensile properties at room temperature to 823 K of Mg-4Y-3RE alloy”, ***Mater. Trans.***, 43: 2063–2068 (2002).

Mercer, W. E. and Hill J. E., “Magnesium Die Cast Alloys for Elevated Temperature Applications”, ***SAE Technical Paper***, 920073, (1992).

Meyers, M. A., Mishra, A. and Benson, D. J., “Mechanical Properties of Nanocrystalline Materials”, ***Progress in Materials Science***, 51: 427-556 (2006).

Mingbo, Y., Tingzhang, G., Caiyuan, Q. and Fusheng, P., “Microstructure, Tensile and Creep Properties of As-Cast Mg-3.8Zn-2.2Ca-Xce (X=0, 0.5, 1 and 2 Wt.%) Magnesium Alloys”, ***Journal of Rare Earths***, 30 (2), 181 (2012).

Ming-bo, Y., Yan-long, M. and Fu-sheng, P., “Effects of Little Ce Addition on As-Cast Microstructure and Creep Properties of Mg-3Sn-2Ca Magnesium Alloy.” ***Trans. Nonferrous Met. Soc. China***, 19: 1087-1092 (2009).

Mishin, O. V., Jensen, D. J. and Hansen, N., “Microstructures and Boundary Populations in Materials Produced by Equal Channel Angular Extrusion”, ***Materials Science and Engineering A***, 342, 320-328 (2003).

Mishra, R. K., Gupta, A. K., Rao, P. R., Sachdev, A. K., Kumar, A. M. and Luo, A. A., “Influence of cerium on the texture and ductility of magnesium extrusions”, ***Scripta Mater.***, 59: 562–565 (2008).

Miura, H., Yu, G. and Yang, X., “Multi-directional forging of AZ61Mg alloy under decreasing temperature conditions and improvement of its mechanical properties” ***Mater. Sci. Eng. A***, 528: 6981- 6992 (2011).

Miura, H., Maruoka, T., Yang, X. and Jonas, J. J., “Microstructure and mechanical properties of multi-directionally forged Mg–Al–Zn alloy” ***Elsevier sciverse sciencedirect***, 49-51 (2012).

Monteiro, W. A., Buso, S. J. and Da Silva, L. V., “Application of magnesium alloys in transport”, ***InTech***, 6-9 (2012).

Mordike, B. L. and Ebert, T., “Magnesium properties-applications-potential”, ***Materials Science&Engineering A***, 302: 37-45 (2001).

Munoz-Morris, M. A., Oca, C. G., Gonzalez-Doncel, G. and Morris, D.G., “Microstructural Evolution of Dilute Al-Mg Alloys During Processing by Equal Channel Angular Pressing and during Subsequent Annealing”, ***Materials Science and Engineering A***, 375-377, 853-856 (2004).

“MÜGE Projesi – Magnezyum Döküm Teknolojisi”, Milli Savunma Bak., <https://www.millisavunma.com/muge-projesi-magnezyum-dokum-teknolojisi>, (2024).

Naser, T. S. B., Bobor, K. and Krállics, G., “Tensile behavior of multiple forged 6082 Al alloy”, *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 58 (2): 113-117. (2014).

Nayeb-Hashemi, A. A., “Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys”, *ASM International: Metals Park*, OH, USA, (1998).

Neishi, K., Horita, Z. and Langdon, T. G., “Grain Refinement of Pure Nickel Using Equal-Channel Angular Pressing”, *Materials Science and Engineering A*, 325: 54-58. (2002).

Neishi, K., Uchida, T., Yamauchi, A., Nakamura, K., Horita, Z. and Langdon, T. G., “Low-Temperature Superplasticity in a Cu-Zn-Sn Alloy Processed by Severe Plastic Deformation”, *Materials Science and Engineering A*, 307: 23-28. (2001).

Polmear I., Honeycombe, J. and Hancock, R.V.K., “Magnesium alloys, Light alloys”, *Metallurgy and Materials Science Series*, New York, 169-210 (1989).

Purcek, G., Atlan, B. S., Miskioglu, I. and Ooi, P. H., “Processing of Eutectic Zn-5%Al Alloy by Equal-Channel Angular Pressing”, *Journal of Materials Processing Technology*, 148: 279-287 (2004).

Robertson, J., Im, J. T., Karaman, I., Hartwig, K. T. and Anderson, I. E., “Consolidation of Amorphous Copper Based Powder by Equal Channel Angular Extrusion”, *Journal of Non-Crystalline Solids*, 317: 144-151 (2003).

Rogal L., Kania A., Berent K., Janus K. and Litynnska-Dobrzyn L., “Microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–RE–Zr alloy after thixoforming”, *Journal of Materials Research and Technology*, 8(1):1121–1131 (2019).

Rokhlin, L. L., "Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals: Structure and Properties", *CRC Press*, 260: (2003).

Rokhlin, L. L., “Magnesium Alloys Containing Rare Earth Metals: Structure and Properties”, <https://books.google.com.tr/books>, (2024).

Rokhlin, L. L., “Structure and properties of alloys of the Mg-RE system”, *Met. Sci. Heat Treat.*, 48: 487–490 (2006).

Rokhlin, L., Dobatkina, T., Nikitina, N., and Tarytina, I., “Calcium-alloyed magnesium alloys”, *Metal Science and Heat Treatment*, 51 (3): 164-169 (2009).

Rosochowski, A., “Processing Metals by Severe Plastic Deformation”, *Solid State Phenomena*, 101-102, 13-22 (2005).

Sabirov, I., Murashkin, M. Y. and Valiev, R. Z., “Nanostructured aluminium alloys produced by severe plastic deformation: New horizons in development”, *Materials Science and Engineering: A*, 560: 1-24 (2013).

Sanling, F., Quanan, L., Xiaotian, J., Qing, Z., Zhi, C. and Wenjian, L., “Review on research and development of heat-resistant Magnesium alloy”, ***Proceedings of 2012 International Conference on Mechanical Engineering and Material Science***, Shanghai-China, (2012).

Sanusi, K. O., Makinde, O. D. and Oliver, G. J., “Equal channel angular pressing technique for the formation of ultra-fine grained structures”, ***South African Journal of Science***, 108 (9/10): SAYFA (2012).

Sarıkaya, S., Kural, S., “Ekstrüzyon Tipi Dövme Prosesinde Konik Kalıp Açısının Deformasyona Etkisi”, M.C.B.Ü. ***Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi***, 1 (30), (2020).

Sastry, S.M.L. and Mahapatra, R.N., “Grain Refinement of Intermetallics by Severe Plastic Deformation”, ***Materials Science and Engineering A***, 329-331, 872-877 (2001)

Seitz, J. M., Eifler, R., Stahl, J., Kietzmann, M. and Bach, W., “Characterization of MgNd₂ alloy for potential applications in bioresorbable implantable devices”, ***Acta Biomaterialia***, 8 (10): 3852-3864 (2012).

Sergueeva, A. V., Stolyarov, V. V., Valiev, R. Z. and Mukherjee, A. K., “Advanced Mechanical Properties of Pure Titanium with Ultrafine Grained Structure”, ***Scripta Materialia***, 45: 747-752 (2001).

Sharath, P. C., Udupa, K. R. and Kumar, G. V. P., “Effect of Multi Directional Forging on the Microstructure and Mechanical Properties of Zn-24 wt% Al-2 wt% Cu Alloy”, ***Transactions of the Indian Institute of Metals***, 70 (1): 89-96 (2016).

Shin, D. H., Park, J. J., Chang, S. Y., Lee, Y. K. and Park, K.T., “Ultrafine Grained Low Carbon Steels Fabricated by Equal Channel Angular Pressing: Microstructures and Tensile Properties”, ***ISIJ International***, 42: 1490-1496 (2002).

Shin, D. H., Park, K. T. and Kim, Y. S., “Formation of Fine Cementite Precipitates in an Ultra-Fine Grained Low Carbon Steel”, ***Scripta Materialia***, 48: 469-473 (2003).

Shun, C.W., Marco, J. S., Nong G. C. X., Langdon, T. G., “Grain structure and texture development during ECAP of two heat-treatable Al based alloys”, ***Materials Science***, 10: 249- 255 (2005).

Sirong, Y., Xianjun C., Zhiqiu H. and Yaohui L., “Microstructure and mechanical properties of friction stir welding of AZ31B magnesium alloy added with cerium”, ***Journal of Rare Earths***, 28 (2): 316 (2010).

Stanford, N., Atwell, D. and Barnett, M. R., “The effect of Gd on the recrystallisation, texture and deformation behaviour of magnesium-based alloys”, ***Acta Mater.***, 58: 6773–6783 (2010).

Stanford, N., Atwell, D., Beer, A., Davies, C. and Barnett, M. R., “Effect of microalloying with rare-earth elements on the texture of extruded magnesium-based alloys”, ***Scripta Mater.***, 59: 772–775 (2008a).

Subaşı, Y., “Farklı Alaşım Elementi İlaveli We43 Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Ekstrüzyon Sonrası Mikroyapı, Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi”, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, (2020).

Suresh, M., Sharma, A., More, A. M., Kalsar, R., Bisht, A., Nayan, N. and Suwas, S., “Effect of equal channel angular pressing (ECAP) on the evolution of texture, microstructure and mechanical properties in the Al-Cu- Li alloy AA2195”, **Journal of Alloys and Compounds**, 785: 972-983, (2019).

Şahiner, M., Akgök, Y. Z., Arslan, M. and Ergin, M. H., “Dünyada and Türkiye’de Nadir Toprak Elementleri”, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, <https://www.mta.gov.tr>, (2017) .

Tekumalla, S., Seetharaman, S., Almajid, A. and Gupta, M., “Mechanical Properties of Magnesium-Rare Earth Alloy Systems: A Review”, **Metals**, 5: 1-39 (2014).

Tong L. B., Zhang Q.X., Jiang Z.H., Zhang J.B., Meng J., Cheng L.R. and Zhang H.J., “Microstructures, mechanical properties and corrosion resistances of extruded Mg–Zn–Ca–xCe/La alloys”, **Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials**, 62: 57-70 (2016).

Tsai, T. L., Sun, P. L., Kao, P. W. and Chang, C. P., “Microstructure and Tensile Properties of a Commercial 5052 Aluminum Alloy Processed by Equal Channel Angular Extrusion”, **Materials Science and Engineering A**, 342: 144-151 (2003).

Türe, Y., “Seryumlu Magnezyum Alaşımları Geliştirme ve Bunların Karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Eskişehir Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Eskişehir, (2016).

Valiev, R. Z. and Langdon, T. G., “Principles of Equal-Channel Angular Pressing as a Processing Tool for Grain Refinement”, **Progress in Materials Science**, 51: 881- 981 (2006).

Valiev, R. Z., “Ultrafine-Grained Materials Prepared by Severe Plastic Deformation”, **Scripta Materialia**, 21: 369-554 (1996).

Valiev, R.Z., Islamgaliev, R.K. and Alexandrov, I.V., “Bulk Nanostructured Materials from Severe Plastic Deformation”, **Progress in Materials Science**, 45:103-189 (2000).

Valiev, R. Z., Krasilnikov, N. A. and Tsenev, N. K., Plastic Deformation of Alloys with Submicron-Grained Structure, **Materials Science and Engineering A**, 137: 35-40 (1991).

Venkateswarlu, K., Rameshbabu, N., Sreekanth, D., Bose, A. C., Muthupandi V. and Subramanian, S., “Fabrication and characterization of micro-arc oxidized fluoride containing titania films on Cp Ti”, **Ceram Int**, 39 (1), 801–812 (2013).

Wei, J., Jiang, S., Chen, Z. and Liu, C., “Increasing strength and ductility of a Mg–9Al alloy by dynamic precipitation assisted grain refinement during multi- directional forging”, **Materials Science and Engineering A**, 780: 139192 (2020).

Xing, J., Soda, H., Yang, X., Miura, H., Sakai, T., “Ultra-Fine Grain Development in an AZ31 Magnesium Alloy during Multi-Directional Forging under Decreasing Temperature Conditions”, ***Mater. Trans.***, 46: 1646 (2005).

Yan, J., Sun, Y., Xue, F., Xue, S. and Tao, W., “Microstructure and mechanical properties in cast magnesium–neodymium binary alloys”, ***Mater. Sci. Eng. A***, 476: 366–371 (2008).

Yang, M., Pan, F., Cheng, L. and Shen, J., “Effects of Cerium on as-cast Microstructure and Mechanical Properties of Mg–3Sn–2Ca Magnesium Alloy”, ***Materials Science and Engineering A***, 512: 132–138 (2009).

Yang, M., Pan, F., Liang, X., Shen, J. and Qin, C., “Effects of Minor Zr and Sr on as-cast Microstructure and Mechanical Properties of Mg–3Ce–1.2Mn–1Zn (wt%) Magnesium Alloy”, ***J Mater Sci.***, 46: 3216–3224 (2011).

Yuan, W., Li, B., Chen, D., Zhu, D., Han, Y. and Zheng, Y., “Formation Mechanism, Corrosion Behavior, and Cytocompatibility of Microarc Oxidation Coating on Absorbable High-Purity Zinc”, ***ACS Biomater Sci Eng***, 5 (2), 487–497 (2019).

Zhang, B., Nagasekhar, A. V., Tao, X., Ouyang, Y., Cáceres, C. H. and Easton, M., “Strengthening by the percolating intergranular otektik in an hpdc Mg–Ce alloy”, ***Mater. Sci. Eng. A***, 599: 204–211 (2014).

Zhang, C. et al., “Effect of Zn concentration on microstructure and corrosion resistance of Mg–Zn alloys microalloyed with Ca and Ce”, ***Anti-Corrosion Methods and Materials***, 68 (2): 130–136 (2021).

Zhang, E. and Yang, L., “Microstructure, mechanical properties and bio-corrosion properties of Mg–Zn–Mn–Ca alloy for biomedical application”, ***Materials Science and Engineering: A***, 497 (1-2):111–118 (2008a).

Zhang, Q., Li, Q. A., Zhang, X. Y. and Zhou, W., “Research Progress of Heat Resistant Mg–Gd System Magnesium Alloy”, ***Foundry***, 60 (11), 1080–1083 (2011).

Zhang, W., “Corrosion behaviour of AJ62x and AZ91D magnesium alloys in chlorine media”, ***M. Sc. Thesis, Laval University***, Quebec, Canada, (2005).

Zhang, X., Wang, Z., Yuan, G., Xue, Y., “Improvement of mechanical properties and corrosion resistance of biodegradable Mg–Nd–Zn–Zr alloys by double extrusion”, ***Mater Sci Eng B.***, 177 (13): 1113–1119 (2012).

Zhang, Z. and Couture, A., “An investigation of the properties of Mg–Zn–Al alloys”, ***Scripta Materialia***, 39/ 1: 45–53 (1998).

Zhang, Z., “Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications”, Doctor of These, ***Faculte Des Sciences Et De Genie Universite***, Quebec-Canada, 2-75 (2000).

Zhilyaev, A. P., Nurislamova, G. V., Baro, M. D., Valiev, R. Z. and Langdon, T. G., “Thermal Stability and Microstructural Evolution in Ultrafine-Grained Nickel after

Equal-Channel Angular Pressing (ECAP)”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33: 1865-1868 (2002).

Zhu, Q. F., Li, L., Ban, C. Y., Zhao, Z. H., Zuo, Y. B. and Cui, J. Z., “Structure uniformity and limits of grain refinement of high purity aluminum during multi-directional forging process at room temperature”, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24 (5) 1301-1306 (2014).

Zhu, Q. F., Wang, J., Li, L., Ban, C. Y., Zhao, Z. H. and Cui, J. Z., “Effect of Forging Temperature on Deformability and Structure Evolution of High Purity Aluminium during Multi-Directional Forging Process”, *Materials Science Forum*, 877: 371-379, (2017).



ÖZGEÇMİŞ

Özcan BÜYÜKGENÇ; ilk ve orta öğrenimini Karabük'te tamamladı. 1994 yılında "Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesini kazandı ve 1998 yılında bu üniversiteden mezun oldu. 1999 yılı Kasım ayında Milli Eğitim Bakanlığınca Kars iline sınıf öğretmeni olarak atandı ve burada 4 yıl kadar öğretmenlik ve okul yöneticilikleri yaptı. 2003-2008 yılları arasında Karaman İl Milli eğitim Müdürlüğü emrinde sınıf öğretmeni, Avrupa Birliği İl Koordinatörü ve İl Milli Eğitim Şube Müdürü olarak Görev yaptı. 2008 Yılı Aralık ayında Karabük Üniversitesine Sağlık Kültür ve Spor Daire Başkanı olarak atandı ve burada ki yedi yıldan fazla süren görevinden sonra Kütüphane ve Dokümantasyon Daire Başkanlığına atandı ve burada da dört yıl süren görev yaptı ardından Öğrenci işleri Daire Başkanlığına atandı ve bura da da dört yıl görev yaptı. Bura da ki görevinden sonra tekrar Sağlık Kültür ve Spor Daire Başkanlığı görevine atandı ve halen bu görevi devam etmektedir. 2008 yılında "Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi ABD' da Yüksek Lisans eğitimine başladı ve 2011 yılında mezun oldu. 2009 Yılında Karabük Üniversitesi Lisans Üstü Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Doktora eğitimine başladı ve Aralık 2024 yılında mezun oldu.