

DEFORMASYON KAPASİTESİ
YÜKSEK MAGNEZYUM ESASLI ÇOKLU
ALAŞIM SİSTEMLERİ GELİŞTİRME

Yüksek Lisans Tezi

Dilara Eren

Eskişehir, 2017

DEFORMASYON KAPASİTESİ YÜKSEK MAGNEZYUM ESASLI ÇOKLU

ALAŞIM SİSTEMLERİ GELİŞTİRME

Dilara EREN

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Malzeme Bilimi ve Mühendisliği
Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Ali Arslan KAYA

**Eskişehir
Anadolu Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
MAYIS, 2017**

Bu tez çalışması 2504 kodlu TÜBİTAK- İtalya Ulusal Araştırma Konseyi (CNR) İşbirliği Programı tarafından 213M535 numaralı uluslararası proje kapsamında desteklenmiştir.

JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI

Dilara EREN'in "Deformasyon Kapasitesi Yüksek Magnezyum Esaslı Çoklu Alaşım Sistemleri Geliştirme" başlıklı tezi 17/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından değerlendirilerek "Anadolu Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

	Unvanı-Adı Soyadı	İmza
Üye (Tez Danışmanı)	Prof. Dr. Ali Arslan KAYA
Üye	Yrd. Doç. Dr. Emrah DÖLEKÇEKİÇ
Üye	Doç. Dr. Erhan AYAS

Prof. Dr. Nedim Değirmenci
Enstitü Müdürü

ÖZET

DEFORMASYON KAPASİTESİ YÜKSEK MAGNEZYUM ESASLI ÇOKLU ALAŞIM SİSTEMLERİ GELİŞTİRME

Dilara EREN

Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı

Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü

Mayıs, 2017

Danışman: Prof. Dr. Ali Arslan KAYA

1.74 g/cm³ yoğunluğa sahip magnezyumun olan ilgi özellikle enerji tasarrufunun önemli olduğu taşımacılık sektöründe taşıt ağırlığının azaltılması amacıyla gün geçtikçe artmaktadır. SPH kristal yapısı ve sınırlı sayıda kayma sistemine sahip magnezyumun deformasyon kapasitesini arttırmak ve diğer mekanik özelliklerini geliştirmek için çeşitli elementler ilave edilmektedir. Çözünen alaşım elementleri, magnezyumun farklı düzlemlerindeki istif hatası enerjisini (SFE) değiştirir ve değişen istif hatası enerjisiyle magnezyumun normalde aktif olmayan düzlemleri harekete geçer. Bu sayede magnezyumun deformasyon kapasitesinin artması, oluşan partiküller sayesinde mukavemet artışı gerçekleşmesi ve bu partiküller sayesinde magnezyum ve çoğu alaşımında giderilemeyen deformasyon yönlenmesinin (tekstür) giderilmesi amaçlanmaktadır. Yapılan çalışmada, magnezyumun deformasyon kapasitesindeki artışın incelenmesi amacıyla literatürde yer alan bilgilere dayanarak Zn, Ce, Y, Sn elementlerinin kullanıldığı alaşım sistemleri oluşturulmuştur. Argonca zengin atmosfer ortamında üretilen alaşımların metalografik incelemesi ve mekanik testleri ardından, deformasyon kapasitesinin en yüksek olduğu alaşım sistemleri Mg-2Zn-2Y ve Mg-2Zn-2Ce olarak belirlenmiştir. Bu iki alaşıma yapılan yüksek sıcaklık serbest şişme (gas-forming) testlerinden elde edilen sonuçlara göre yüksek sıcaklıklarda deformasyon kapasitesi en yüksek alaşım sistemi Mg-2Zn-2Ce dir. Bu alaşımlara ilaveten, daha küçük ergitmelerden elde edilen numunelerle incelenen ve mekanik özellikleri açısından dikkate değer bulunan Mg-2Sn-2Y, Mg-2Y-2Zn-1Sn bileşimleri mevcuttur.

Anahtar Sözcükler: Magnezyum alaşımları, Yüksek deformasyon, Çekme testi, Serbest şişme testi

ABSTRACT

DEVELOPING MAGNESIUM-BASED MULTI-COMPONENT ALLOYS WITH HIGH DEFORMATION CAPACITY

Dilara EREN

Department of Materials Science and Engineering

Anadolu University, Graduate School of Science

May, 2017

Supervisor: Prof. Dr. Ali Arslan KAYA

The interest in the use of magnesium which has 1.74 g / cm^3 density, is increasing day by day in order to reduce vehicle weight in the transport sector, where energy saving is extremely important. Various elements are added to improve the deformation capacity and other mechanical properties of magnesium with HCP crystal structure and limited number of slip systems. The dissolving alloy elements in magnesium change the stacking fault energy (SFE) in different planes of magnesium, and manipulate the inactive planes of magnesium normally not active. Thus, it is aimed to increase the deformation capacity of magnesium, to increase the strength due to the particles formed in the magnesium and by the help of these particles to remove the texture which cannot be removed in the magnesium and most of its alloys. In order to investigate the increase in the deformation capacity of magnesium, alloy systems were formed by using Zn, Ce, Y, Sn elements based on the information in the literature. After the metallographic investigation and mechanical tests of the alloys produced in the controlled atmosphere, the alloy systems with the highest deformation capacity were identified as Mg-2Zn-2Y and Mg-2Zn-2Ce. According to the results obtained from high-temperature free inflation tests (gas-forming) of these two alloys, the system has the highest deformation capacity is Mg-2Zn-2Ce alloy system. In addition to these alloys, there are compositions of Mg-2Sn-2Y, Mg-2Y-2Zn-1Sn investigated as samples obtained from smaller casted amounts and are remarkable in terms of their mechanical properties.

Keywords: Magnesium alloys, High deformation, Tensile test, Free inflation test

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, takıldığım her noktada bilgi birikimine başvurduğum, gerekli tüm yardımı ve tavsiyeleriyle bana destek olan, sunduğu imkan sayesinde yurtdışına çıkmama ve orada eşi bulunmayacak insanlarla tanışmama vesile olan çok değerli Sayın Hocam Prof. Dr. Ali Arslan Kaya'ya tüm katkılarından dolayı teşekkür ederim.

Yüksek lisans eğitimim boyunca bilgi ve yardımlarıyla bana destek olan ekip arkadaşlarım Alican Ataman ve Yiğit Türe'ye çok teşekkür ederim.

İtalya'da bulunduğum süre boyunca proje kapsamında her türlü laboratuvar imkanından faydalanmamı sağlayan, bilgi ve yardımlarıyla bana destek olan Prof. Palumbo ve Smati Grubu'nun tüm üyelerine Donato, Lino, Domenico, ve Antonio'ya teşekkürü borç bilirim. Ayrıca ailem ve sevdiklerimden uzakta olduğum bu zor dönemde, tüm yardımseverlikleriyle yanımda olan başta Koki ve Dario olmak üzere, bana kendi ülkemdeymişim gibi hissettiren Valentina, Rosella, Antonia, Gianfree, Vito, Claudio, Vito the Blonde ve orada edindiğim tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Tüm hayatım boyunca maddi ve manevi olarak her zaman yanımda olan, beni aldığım tüm kararlarımda destekleyen, kendimi hep değerli hissetmemi sağlayan sevgili aileme; moral ve motivasyon desteği için Tolunay Aytöre'ye, Merve Koç'a ve onu tanıdığım ilk andan bugüne kadar karşıma çıkan imkanlarla ilgili alacağım kararlarda beni cesaretlendiren, hayatımın akışının değişmesini sağlayan, her zaman yanımda olan Murat Ekşi'ye tüm yardımları ve özverisi için sonsuz teşekkür ederim.

Bu tez çalışması 2504 kodlu TÜBİTAK- İtalya Ulusal Araştırma Konseyi (CNR) İşbirliği Programı tarafından 213M535 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. TÜBİTAK ve CNR (İtalya)'a, ve ayrıca bu tez çalışmasında katkısı olan 0286.STZ.2013-2 numaralı SANTEZ projesi desteği için, Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı ve proje ortağı ASSAN-HANİL A.Ş.'ye teşekkür ederim.

Dilara Eren

12.07.2017

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Bu tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın hazırlık, veri toplama, analiz ve bilgilerin sunumu olmak üzere tüm aşamalarında bilimsel etik ilke ve kurallara uygun davrandığımı; bu çalışma kapsamında elde edilemeyen tüm veri ve bilgiler için kaynak gösterdiğimi ve bu kaynaklara kaynakçada yer verdiğimi; bu çalışmanın Anadolu Üniversitesi tarafından kullanılan “bilimsel intihal tespit programı”yla tarandığını ve hiçbir şekilde “intihal içermediğini” beyan ederim. Herhangi bir zamanda, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tüm ahlaki ve hukuki sonuçlara razı olduğumu bildiririm.

Dilara EREN

İÇİNDEKİLER

BAŞLIK SAYFASI	i
JÜRİ VE ENSTİTÜ ONAYI.....	ii
ÖZET	iii
TEŞEKKÜR	v
ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	vi
TABLolar DİZİNİ.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	x
GÖRSELLER DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
1. GİRİŞ.....	1
1.1. Magnezyum	1
1.2. Magnezyumun Özellikleri	1
1.3. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları	3
1.4. Magnezyumun Kristal Yapısı ve Deformasyon Davranışı.....	4
1.4.1. Kayma Sistemleri.....	5
1.4.2. Magnezyumda İkizlenme.....	7
1.5. Magnezyum Alaşımları	9
2. DENEYSEL YÖNTEM.....	18
2.1. Deneylerde Kullanılan Alaşımların Temini ve Hazırlanması.....	18
2.2. Soğuk Kalıba Alma ve Numune Hazırlama	19
2.3. Numunelerin Optik Mikroskop ve SEM ile İncelemesi.....	20
2.4. XRD Analizi	20
2.5. Sertlik Testi	21
2.6. Çekme Testi.....	21
2.7. Serbest Şişme Testi.....	24
3. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	26

3.1. Hazırlanan Alaşımların Mikroyapıları.....	26
3.2. Sertlik ve Çekme Testleri	33
3.3. Serbest Şişme Testi.....	38
4.SONUÇ	42
KAYNAKÇA.....	44
ÖZGEÇMİŞ	50

TABLolar DİZİNİ

Sayfa

Tablo 1. 1.	Magnezyumun özellikleri	1
Tablo 1. 2.	Farklı üretim yöntemleriyle elde edilmiş saf magnezyumun mekanik özellikleri.....	2
Tablo 1. 3.	Magnezyuma ilave edilen alaşım elementlerinin ASTM sisteminde tanımlanması	10
Tablo 1. 4.	Mg-Zn-Y-Zr alaşım sistemi için hazırlanan dört farklı alaşımın kompozisyonları	13
Tablo 2. 1.	Ergitmeleri Çin’de yaptırılan alaşım kompozisyonları.....	18
Tablo 2. 2.	Laboratuvar koşullarında elde edilen alaşımın kompozisyonu ve ana alaşımlardan kullanılan miktarlar.....	18
Tablo 2. 3.	Dağlama işlemi için kullanılan solüsyonun içeriği.....	20
Tablo 3. 1.	Alaşımlara ait tane boyutları.....	26
Tablo 3. 2.	Mg-2Zn-2Ce alaşımı içindeki intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi	28
Tablo 3. 3.	Mg-2Zn-2Y alaşımı içindeki intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi	29
Tablo 3. 4.	Mg-2Sn-2Y alaşımı içindeki intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi	30
Tablo 3. 5.	Mg-2Y-2Zn-1Sn alaşımı içindeki küçük ve köşeli şekle sahip intermetalik fazın bileşimini gösteren EDS analizi	31
Tablo 3. 6.	Mg-2Y-2Zn-1Sn alaşımı içindeki uzamış şekle sahip intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi.....	31
Tablo 3. 7.	Alaşımların HB sertlik değerleri.....	33
Tablo 3. 8.	Oda sıcaklığında uygulanan çekme testi sonuçları	34
Tablo 3. 9.	Mg-2Zn-2Ce alaşımına uygulanan serbest şişme testlerinin parametre tablosu ve bu parametrelere ait kubbe yüksekliği sonuçları	40

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1. 1.	Magnezyum, alüminyum ve demirin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması	3
Şekil 1. 2.	Magnezyum kristal yapısı SPH'ye ait kayma düzlemleri ve yönlerinin gösterimi.....	4
Şekil 1. 3.	Bazal, prizmatik ve piramidal kayma sistemleri	6
Şekil 1. 4.	Deformasyon sistemlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişen kritik kayma gerilmesi (CRSS) grafiği	7
Şekil 1. 5.	Uzama ve kısalma ikizlenmelerinin gösterimi	8
Şekil 1. 6.	Farklı Zn/Y oranına ait alaşımların çekme testi sonuçları	14
Şekil 1. 7.	Zn/Y oranı sabit tutularak hazırlanmış Zn ve Y element miktarları farklı alaşımların çekme testi sonuçları	15
Şekil 1. 8.	Mg-2Zn alaşımına %0.4 oranında Ce, Gd, Y ve Nd elementleri ilave edilmiş alaşımların sertlik ve tane boyutu değerleri	16
Şekil 2. 1.	Çekme numunelerinin boyutları	21
Şekil 3. 1.	Mg-2Zn-2Ce alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS alan analizi	27
Şekil 3. 2.	Mg-2Zn-2Y alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS alan analizi	28
Şekil 3. 3.	Mg-2Sn-2Y alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS alan analizi	29
Şekil 3. 4.	Mg-2Y-2Zn-1Sn alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS analizi	30
Şekil 3. 5.	Alaşımların oda sıcaklığındaki akma dayanımı ve UTS değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi	34
Şekil 3. 6.	Alaşımların 200°C'de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı ve kopmada % uzama değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi	35
Şekil 3. 7.	Alaşımların 200°C'de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi	35
Şekil 3. 8.	Alaşımların 400°C'de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı ve kopmada % uzama değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi	36

- Şekil 3. 9.** Alaşımın 400°C’de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi 36
- Şekil 3. 10.** Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarının iki farklı çekme hızı kullanılarak 200°C’de ve 400°C’de yapılmış çekme testlerinden elde edilen akma dayanımı sonuçlarının sütun grafiği ile gösterimi 37
- Şekil 3. 11.** Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarının iki farklı çekme hızı kullanılarak 200°C’de ve 400°C’de yapılmış çekme testlerinden elde edilen UTS sonuçlarının sütun grafiği ile gösterimi 37
- Şekil 3. 12.** Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarının iki farklı deformasyon hızıyla 200°C’de ve 400°C’de yapılan çekme testlerinden elde edilen kopmada % uzama değerlerinin sütun grafiği ile gösterimi 38
- Şekil 3. 13.** Mg-2Zn-2Ce alaşımına uygulanan serbest şişme testlerine ait kopma meydana gelene kadar geçen sürelerinin sütun grafiği ile gösterimi 41

GÖRSELLER DİZİNİ

Sayfa

- Görsel 1. 1.** Döküm yapıdaki Mg-Zn-Y-Zr alaşımlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri: (a) alaşım 1, (b) alaşım 2, (c) alaşım 3, (d) alaşım 4 13
- Görsel 2. 1.** Ergitme için kullanılan fırın 19
- Görsel 2. 2.** Çekme testi için kullanılan INSTRON 4485 ve Aramis sistemi 22
- Görsel 2. 3.** Aramis sistemi için hazırlanmış numune örneği 23
- Görsel 2. 4.** Yüksek sıcaklıkta uygulanan çekme testleri için termokuplların numune üzerine kaynaklanması 23
- Görsel 2. 5.** (a)Sistem ve ekipmanların gösterimi. (1) Kubbe yüksekliğini ölçmeyi sağlayan transducer, (2) pozisyonu gösteren transducer'ın çelik çubuğu, (3) test cihazının yük kafaları, (4) yük hücresi , (5) elektrik fanı, (6) silindirik fırın, (7) serbest şişme kalıbı, (8) numune, (9) gaz girişli numune tutucu, (10) gaz girişi; (b) kalıp içi gösterim, (c) serbest şişme testi ardından numunenin görünümü 24
- Görsel 2. 6.** Serbest şişme testi fırınının içi ve numunenin deformasyonunun gerçekleştiği kalıp 25
- Görsel 3. 1** Alaşımların ışık mikroskobu görüntüleri..... 32
- Görsel 3. 2.** Mg-2Zn-2Y alaşımına ait serbest şişme testi numuneleri görüntüleri a) 400°C sıcaklıkta 10bar-15 bar basınç ile şekillenmiş numune, b) 400°C sıcaklıkta 16 bar basınç ile şekillenmiş numune, c) 450°C derece sıcaklıkta 16 bar basınç ile şekillenmiş numune 39
- Görsel 3. 3.** Mg-2Zn-2Ce alaşımının 450 °C 16 bar basınçta yapılan serbest şişme testi numunesi görüntüsü..... 39
- Görsel 3. 4.** Mg-2Zn-2Ce alaşımının 450 °C 16 bar basınçta yapılan serbest şişme testi numunesi görüntüsü..... 39
- Görsel 3. 5.** Mg-2Zn-2Ce alaşımına yapılan serbest şişme testi deneyi numunelerinde görülen portakallanma (orange peel effect) ve porozite görüntüleri..... 41

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SPH: Hekzagonal sıkı paket

SFE: Stacking fault energy (istif hatası enerjisi)

CRSS: Critical resolved shear stress (kritik kayma gerilmesi)

TEM: Transmission electron microscope (geçirimli elektron mikroskobu)

ASTM: American Society for Testing and Materials

E: Elastic modulus (elastik modülü)

XRD: X-ray diffractometer (X ışınları difraktometresi)

EDM: Electric discharge machining (kivılcımla malzeme işleme)

EDS: Energy dispersive spectroscopy (enerji dağılımı spektrometresi)

HB: Hardness Brinell

SEM: Scanning electron microscope (taramalı elektron mikroskobu)

UTS: Ultimate tensile strength (maksimum çekme dayanımı)

σ_y : Yield Strength (akma mukavemeti)

1. GİRİŞ

1.1. Magnezyum

En hafif yapısal alaşımlara sahip olması sebebiyle, gelişimi ve kullanımını açısından çok yüksek bir potansiyeli olduğu sıklıkla belirtilen [1]-[3] magnezyumun tarihi Joseph Black'in kireçten magnezyum oksidi ayrıştırdığı 1755 yılına kadar uzanmaktadır. 1808 yılında Sir Humphrey Davy tarafından yeni bir element olarak tanımlanan magnezyum toprak alkali metali [4] kütlece dünyada en çok bulunan dokuzuncu, sadece yer kabuğu düşünüldüğünde sekizinci elementtir. Deniz suyu dikkate alındığında ise en çok bulunan üçüncü element olma özelliğine sahiptir [5]. Magnezyumun hem yerküre hem de suküreden elde edilebilmesi, magnezyuma eşsiz bir yapısal element olma özelliği kazandırır [6].

1.2. Magnezyumun Özellikleri

Toprak alkali metal grubunda yer alan magnezyum, periyodik tablonun 3. periyod elementlerinden biridir. Magnezyumun bazı özellikleri aşağıda Tablo 1. 1'de belirtilmiştir;

Tablo 1. 1. Magnezyumun özellikleri [7,8]

Simgesi	Mg
Atom numarası	12
Atom ağırlığı	24.305 g/mol
Atomik yarıçapı	0.320 nm
Atomik hacmi	14.0 cm ³ /mol (atom ağırlığı/yoğunluk)
Elektron dağılımı	1s ² , 2s ² , 2p ⁶ , 3s ²
İyon değeri	+2
Kristal yapısı	Hegzagonal Sıkı Paket
Yoğunluğu	<ul style="list-style-type: none">• 1.738 g/cm³ (oda sıcaklığında)• 1.584 g/cm³ (ergime sıcaklığında)
Ergime noktası	650°C
Kaynama noktası	1090°C

Magnezyum, birim hacimce alüminyumdan %36, demirden ise %78 daha hafif olması sebebiyle pek çok sektör açısından son derece dikkat çekici bir yapısal metaldir. En zengin metal kaynaklardan birine sahip olan magnezyum, tüm yapısal malzemeler arasında en yüksek mukavemet/ağırlık oranına sahiptir [9]. Magnezyumun üstün özellikleri aşağıda sıralandığı gibidir:

- Metalik yapısal malzemeler içinde en düşük yoğunluğa sahip olması,
- Yüksek spesifik dayanıma sahip olması,
- Yüksek hızlarda işlenebilir olması,
- Kolay üretilebilir olması ve geri kazanımı mümkün olması[9],
- Sönümleme kabiliyetinin yüksek olması [11]

Kullanımını etkileyebilecek olumsuz yönleri ise:

- Soğuk şekillendirilebilirliğinin ve tokluğunun düşük olması,
- Sürünme direncinin düşük olması,
- Deformasyonla yönlenme eğilimi,
- Korozyon direncinin düşük olmasıdır [9].

Tablo 1. 2’de farklı yöntemler ile elde edilmiş saf magnezyum metalinin mekanik özellikleri özetlemektedir. Döküm halinde magnezyum çok düşük değerlere sahipken, haddeleme, ekstrüzyon veya tavlama sonrası özelliklerinde döküm haline kıyasla önemli iyileşmeler olduğu görülebilmektedir.

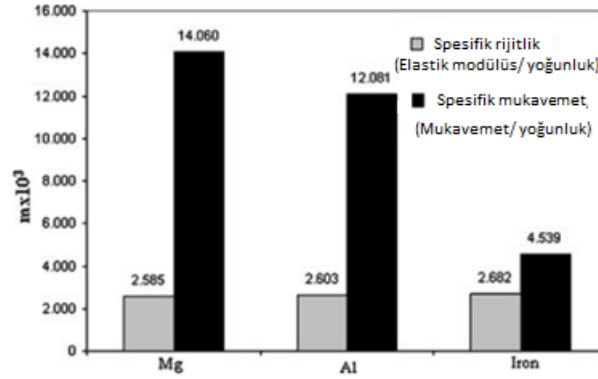
Tablo 1. 2. *Farklı üretim yöntemleriyle elde edilmiş saf magnezyumun mekanik özellikleri[12]*

	Çekme mukavemeti MPa	Çekmede akma mukavemeti MPa	Basmada akma mukavemeti MPa	% Uzama	Brinell sertlik 500 kp/10mm
Kum döküm (kalınlığı 13mm)	90	21	21	2-6	30
Ekstrüzyon (kalınlığı 13 mm)	165-205	69-105	34-55	5-8	35
Sıcak haddelenmiş plaka	180-220	115-140	105-115	2-10	45-47
Tavllanmış plaka	160-195	90-105	69-83	3-15	40-41

1.3. Magnezyum Alaşımlarının Kullanım Alanları

Magnezyum alaşımları düşük özkütlesi, yüksek özgül mukavemeti ve yüksek sönümlenme kapasitesi sayesinde, ağırlık tasarrufunun son derece gerekli olduğu otomotiv ve havacılık sektöründe önemli bir kullanım alanına sahiptir [13]. Alüminyum, mangan, nadir toprak elementleri, toryum, çinko, zirkonyum ve daha bir çok elementlerle alaşımlandırılan magnezyumun mukavemet/ağırlık oranı bu elementler sayesinde önemli miktarda artmakta ve elde edilen alaşımlar ağırlık tasarrufunun önemli olduğu uygulamalar için önemli bir potansiyel göstermektedir. Bu üstün özelliğiyle magnezyum alaşımları, sadece çelik, dökme demir ve bakır bazlı alaşımların yerine değil, alüminyum alaşımlarının yerine de kullanılmaktadır [14],[15].

Şekil 1.1’de magnezyum, alüminyum ve demirin spesifik mukavemet ve rijitlik özelliklerinin karşılaştırılması sütun grafikleriyle gösterilmiştir. Alüminyum ve demirin spesifik rijitlik değerleri magnezyumdan sırasıyla sadece %0.69 ve %3.752 oranlarında yüksekken, magnezyumun spesifik mukavemet değeri alüminyumdan %14.075, demirden %67.716 daha yüksektir[16].



Şekil 1. 1. Magnezyum, alüminyum ve demirin yapısal özelliklerinin karşılaştırılması [16]

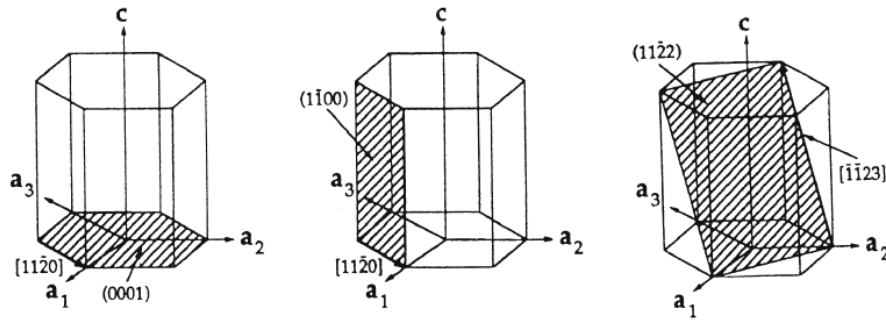
Özellikle son zamanlarda otomotiv sektöründe çevre dostu, güvenli ve ucuz otomobillerin üretimine yönelik çalışmalar sürdürülmektedir [14]. Araçlarda ağırlık tasarrufu yalnızca yakıt tüketimini azaltmakla kalmaz, aynı zamanda sera gazı salınımını da azaltır. Yakıt tasarrufu sağlanması ve CO₂ salınımının azaltılması için ağırlığın düşürülmesinin en etkili seçenek olduğu birçok kaynakta belirtilmektedir [17],[18]. Bu açıdan düşünüldüğünde de magnezyumla ilgili yapılan çalışmalar son derece önemli ve kıymetlidir.

Magnezyum alaşımlarının hafifliği sadece taşımacılık sektörü yani otomotiv ve havacılık sektörleri için değil, hafifliğin çok önemli olduğu elektronik sektörü için de önemli bir konudur. Elektronik eşyalarda kullanımı açısından düşük özkütlesine ek olarak, magnezyum ısıyı biriktirmez ve plastıklere göre yüz kat daha iyi ısı yayılımı (heat dispersion) sağlar. Ayrıca herhangi bir metale göre daha iyi titreşim sönümlene kabiliyetine sahiptir. Kolay işlenebilme özelliğine sahip olması ve çevresel etkiler göz önüne alındığında geri dönüştürülebilir olması tercih edilme sebepleri arasında gösterilebilir. Tüm bu nedenlerle dijital kamera, telefon, bilgisayar ve radar detektörü gibi elektronik cihazlarda kullanılan magnezyum alaşımları, cihazların hafif, ince ve daha rahat taşınabilir olmasını sağlar [6].

Bunlara ek olarak magnezyum alaşımlarının spor aletleri ve malzemelerinde kullanımı da söz konusudur. Bu alanda kullanılan malzemelerin hafifliği, mukavemeti, titreşim sönümlene özelliği performansı son derece etkilemektedir. Bu sebeple, bisiklet iskeletlerinde, golf sopalarında, tenis raketlerinde, beyzbol sopalarında ve benzer birçok uygulamada magnezyum alaşımlarından yararlanır [8].

1.4. Magnezyumun Kristal Yapısı ve Deformasyon Davranışı

Saf magnezyumun oda sıcaklığındaki latis parametreleri $a = 0.32092\text{nm}$ ve $c = 0.52105\text{nm}$ ' dir ve c/a oranı 1.6236 olduğu için ideal değer olan 1.633 değerine çok yakındır. Magnezyumun kristal yapısının (SPH' nin), başlıca kayma düzlemleri ve yönlerinin gösterimi Şekil 1. 2' de yer almaktadır [8].



Şekil 1. 2. *Magnezyum kristal yapısı SPH'ye ait kayma düzlemleri ve yönlerinin gösterimi*

Geleneksel magnezyum alaşımlarının düşük sıcaklıklarda klasik metotlarla şekillendirilme özellikleri iyi değildir [9]. Magnezyumun bu zayıf şekillendirilme

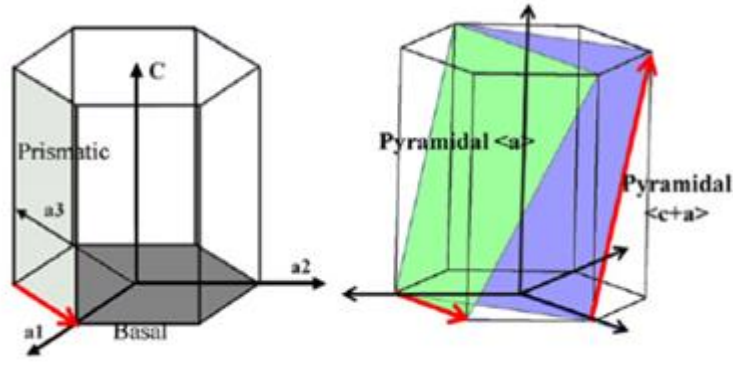
özelliğinin sebebi kristal yapısı gereği yalnızca bir tane sıkı paket düzlemine (bazal düzleme) sahip olmasıyla açıklanır. Von Mises kriterine göre metallerin kayma (slip) hareketiyle şekillendirilebilmeleri yani tane sınırları boyunca kopmadan dislokasyonları taşıyabilmeleri için en az beş tane bağımsız kayma sistemine sahip olmaları gerekir. Bu şartı sağlamamasına rağmen magnezyumun oda sıcaklığında bile bir miktar plastisite göstermesi deformasyon ikizlenmesinin aktifleşmesiyle açıklanır [19].

Hegzagonal kristal yapısına sahip olan malzemelere uygulanacak sıcaklık ve gerilmeler son derece önemlidir. Çünkü bu malzemelerin deformasyon sistemleri uygulanan sıcaklık ve gerilme seviyelerine bağlı olarak sıralı olarak (ardışık) hareketlenen deformasyon mekanizmalarıdır. Bu durum sadece SPH çok kristalli malzemelerin sünekliğini etkilemekle kalmaz, aynı zamanda dinamik yeniden kristallenmeyi de etkiler [20],[21].

Metal malzemeler, uygulanan mekanik gerilmeler sonucunda kayma, ikizlenme, faz değişimi gibi yapısal değişikliklerle uğrayabilir [22]. Magnezyum ve alaşımlarında görülen en yaygın plastik deformasyon mekanizmaları kayma, deformasyon ikizlenmesi ve tane sınırları kaymasıdır [6]. Magnezyumun deformasyonunun nasıl gerçekleştiğini anlamak için hegzagonal sıkı paket yapısında görülen kayma ve deformasyon ikizlenmesi alt başlıklar halinde ele alınmalıdır.

1.4.1. Kayma Sistemleri

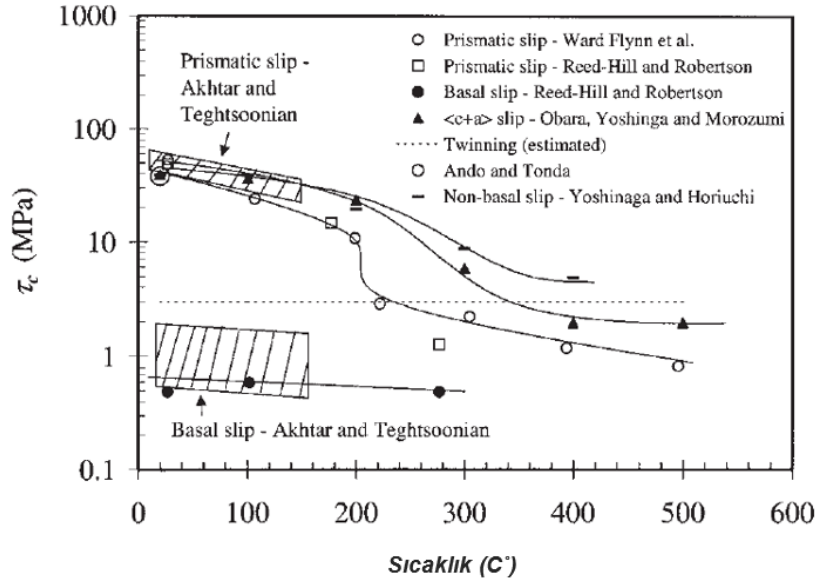
Magnezyumun temel üç kayma sistemi şunlardır: bazal (0001) $\langle 11\bar{2}0 \rangle$, prizmatik $\{ 10\bar{1}0 \}$ $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ ve piramidal $\{ 10\bar{1}1 \}$ $\langle 11\bar{2}0 \rangle$. Bu kayma sistemleri Şekil 1. 3'te Burgers vektörleri $\langle a \rangle$ ve $\langle a+c \rangle$ ile birlikte gösterilmektedir. Daha önceden de bahsedildiği üzere malzemedeki çatlak oluşmadan deformasyon gerçekleşebilmesi için metallerin en az beş bağımsız kayma sistemine sahip olması gerekir. Fakat magnezyumun en yaygın iki kayma sistemi olan bazal ve prizmatik sistemlerle bu sayı yalnızca dörde ulaşır ve yetersiz kalır. Üstelik bu sistemler oda sıcaklığında aktif değildir. Ancak 225°C'nin üzerindeki sıcaklıklarda $\langle a \rangle$ Burgers vektörüyle birlikte piramidal kayma sistemlerinden gelen dört bağımsız kayma sistemi de hareketlenir. Bazal ve prizmatik sistemleri arasındaki çapraz kaymayla $\langle a+c \rangle$ Burgers vektörü ile kayma sistemleri de hareketlendiğinde, bu durum beş bağımsız kayma sistemini sağlar ve von Mises kriterine uygun hale gelir [24],[25].



Şekil 1. 3. Bazal, prizmatik ve piramidal kayma sistemleri [23]

Bazal $\langle a \rangle$ kayma sisteminin en kolay hareketlenen kayma sistemidir ve uzama ikizlenmesi sistemi ile neredeyse eş zamanlı olarak hareketlenir [26]. Piramidal ve prizmatik kayma sistemlerinin de hareketlenmeleri ancak gerilme açısından bu sistemlerin CRSS (Critical resolved shear stress/kritik kayma gerilmesi) değerlerine veya yüksek sıcaklıklara çıkıldığında mümkündür [27]-[29]. Dört bağımsız kayma sistemi sağlayan bu üç kayma sistemi sayesinde hem a yönünde hem de $\langle a+c \rangle$ sistemi ile c yönünde deformasyona olanak sağlanır [25],[31],[31]. Alternatif olarak, CRSS değeri çok düşük olan uzama ikizlenmesi (tensile twinning) c eksenini yönünde kısıtlı da olsa deformasyonu sağlamaktadır ve zaten oda sıcaklığından itibaren aktiftir [25].

Sıcaklık ve gerekli gerilme seviyesi açısından sıralı bir deformasyon mekanizmasına sahip olan magnezyum metali ve alaşımlarının, deformasyon sistemlerine ait sıcaklığa bağlı olarak değişen CRSS değerleri Şekil 1. 4'te özetlenmektedir. Sıcaklığın 350°C 'den düşük olduğu bölgelerde $\langle a+c \rangle$ Burgers vektörüne sahip olan piramidal kayma sisteminin CRSS değeri oldukça yüksektir. Prizmatik ve piramidal kaymalara ait değerler oda sıcaklığında ikizlenmenin CRSS değerinden daha yüksekken, 225°C 'nin üstünde bazal olmayan bu sistemlerin CRSS değerlerinde ciddi bir düşüş gerçekleşir ve ikizlenmeden daha aktif hale geçerler [32].



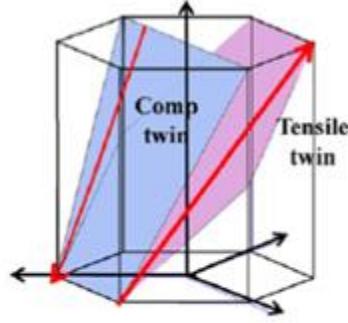
Şekil 1. 4. Deformasyon sistemlerinin sıcaklığa bağlı olarak değişen kritik kayma gerilmesi (CRSS) grafiği [32]

1.4.2. Magnezyumda İkizlenme

Magnezyum metali ve alaşımlarının en çok bilinen iki ikizlenme çeşidi vardır. Bunlardan ilki $\{10\bar{1}2\} \langle 10\bar{1}\bar{1} \rangle$ uzama ikizlenmesi (tensile twinning), ikincisi ise $\{10\bar{1}\bar{1}\} \langle 1012 \rangle$ kısalma ikizlenmesidir (compression twinning) [33]. Bu şekilde adlandırılmalarının sebebi c eksenini boyunca sırasıyla uzama ve kısalma meydana getirmeleridir [25]. Uzama ve kısalma ikizlenmeleri Burgers vektörleriyle birlikte

Şekil 1. 5.'te gösterilmektedir. Magnezyumdaki çekme ve basma asimetrisi de ikizlenmeden kaynaklanmaktadır [34]. Her iki ikizlenme türü de benzer kayma deformasyonları oluştururlar (yaklaşık olarak uzama ikizlenmesi için 0.1289, kısalma ikizlenmesi için 0.1377) ancak kristal sistemin farklı açılarla bükülmesine sebep olurlar. Uzama ikizlenmesi tanenin yaklaşık olarak 86° dönmesine sebep olurken, kısalma ikizlenmesi tanenin yaklaşık olarak 56° dönmesine sebep olur. İkizlenme bölgesi kalınlıklarının ikizlenme gerilmelerinden etkilendiği düşünülmektedir [35]. Uzama ve kısalma ikizlenmeleri son derece yakın kayma deformasyonu değerlerine sahip olsalar da, magnezyum alaşımlarında görülen uzama ikizlenmeleri genellikle kalın, çok miktarda ve kolay gözlemlenebilirken [36],[37], kısalma ikizlenmeleri çok ince (genellikle 1μ 'dan ince), az miktarda ve tespit edilmesi güçtür [38],[39]. Ayrıca belirtmek gerekir ki, uzama

ikizlenmeleri genellikle kısılma ikizlenme plakaları içinde de yeniden ikizlenme (double twinning) $\{10\bar{1}1\} \langle 10\bar{1}2 \rangle$ şeklinde görülebilmektedir [31],[36]. İkizlenme sıcaklık ve deformasyon hızı gibi dış parametrelere, ayrıca tane büyüklüğü ve istif hatası enerjisi gibi iç parametrelere bağlıdır [22].



Şekil 1. 5. Uzama ve kısılma ikizlenmelerinin gösterimi [23]

$\{10\bar{1}2\}$ uzama ikizlenmesinin mikroyapı üzerindeki etkisi i-) kaymayı aktive ederek tanenin yaklaşık olarak 86° dönmese sebep olmak [41] ii-) ikizlenen bölge ile içinde oturduğu taneyi bölerek tane küçültme etkisi yaratmaktır [29]. Hem tane boyutunun hem de tane yönünün değişmesinin magnezyum alaşımlarının mekanik davranışları ve şekillendirilmesi üzerinde çok önemli olduğu bilinmektedir [42],[43]. Magnezyum tek kristaline c-ekseni yönünde uygulanan çekme deneyleri sonuçlarına göre düşük sıcaklıklarda $\{10\bar{1}2\}$ uzama ikizlenmesinin ana deformasyon mekanizması olduğu söylenmekte ve uzama ikizlenmesinin sıcaklık ve gerinmenin yükselmesiyle arttığı belirtilmektedir. $\{10\bar{1}1\}$ kısılma ikizlenmesinin de çekme deformasyonu sırasında yapıda görüldüğü, fakat sıcaklığın artmasıyla birlikte kısılma ikizlenmesinin azaldığı ve 500°K 'den sonra gözlemlenmediği söylenmektedir. Uzama ikizlenmesi 500°K 'den sonra sıcaklığın artmasıyla bazal olmayan kayma sistemleri aktifleştiği için azalmaktadır [44].

Magnezyum alaşımları için çok önemli bir deformasyon şekli olduğu bilinen $\{10\bar{1}2\}$ uzama ikizlenmesi [45],[46] diğer metallerde olduğu gibi magnezyumda da mukavemet arttıran katı çözümlü sertleşmesi, yaşlandırma, tane incilmesi ve dislokasyon sertleşmesi [8],[47] gibi yöntemlere ek olarak tane küçülme etkisi yaratır ve pre-twinning ile tekstür sertleşmesi sağlayabilir. Pre-twinning dövme magnezyum alaşımlarında $\{10\bar{1}2\}$ uzama ikizlenmesinin oda sıcaklığında ve uygun yönde ön deformasyon ($<5\%$) oluşturulmasıyla sağlanır [41],[45].

1.5. Magnezyum Alaşımları

Magnezyum alaşımları mühendislik uygulamalarında genellikle magnezyumun alüminyum, çinko, mangan, , zirkonyum, toryum, gümüş, nadir toprak elementleri gibi metaller ile alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Magnezyum alaşımlarının isimlendirilmesi ASTM sisteminde standartlaştırılmıştır. Her alaşım harf ve rakamlardan oluşan dört adet tanımlama bölümüyle ifade edilmektedir. Birinci bölümde alaşımdaki ana alaşım elementlerini gösteren iki harf yer almaktadır. İkinci bölümde her bir ana alaşım elementinin yüzde ağırlık değerini veren iki rakam bulunmaktadır. Üçüncü bölüm, alaşımın kendi içinde tanımlanmasıdır. Dördüncü bölümde alaşıma uygulanmış ısıl işlem gösterilmektedir. Tablo 1. 3'te alaşım elementlerinin hangi harfler ile tanımlandığı gösterilmektedir [7],[8].

Tablo 1. 3. *Magnezyuma ilave edilen alaşım elementlerinin ASTM sisteminde tanımlanması [7],[8]*

Kısaltma Harfi		Alaşım Elementi	Kısaltma Harfi	Alaşım Elementi
A		Alüminyum	M	Manganez
B		Bizmut	N	Nikel
C		Bakır	P	Kurşun
D		Kadmiyum	Q	Gümüş
E		Nadir elementler	R	Krom
F		Demir	S	Silisyum
H		Toryum	T	Kalay
J		Stronsiyum	W	Yitrium
K		Zirkonyum	Y	Antimuan
L		Lityum	Z	Çinko

Magnezyumun hafiflik özelliğine ek olarak, başka özellikleriyle de rakipleri arasında ön plana çıkabilmesi ve bu özelliklerinin geliştirilebilmesi amacıyla son zamanlarda magnezyuma birçok element ilave edilerek yeni alaşımlar denenmekte ve bunlarla ilgili pek çok çalışma yapılmaktadır. Magnezyuma ilave edilen alaşım elementleri sayesinde, magnezyumun oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklardaki işlenebilirliği artmaktadır. Alaşımlandırma düşük sıcaklıklarda tane içindeki kayma ve ikizlenme davranışını arttırarak, yüksek sıcaklıklarda ise tane sınırı kayma mekanizmasını tetikleyerek magnezyumun şekillendirilebilirliğini artmaktadır [48]. Ticari amaçlı kullanılan çoğu magnezyum alaşımını AZ91 (Mg-9Al-1Zn), WE54 (Mg-5Y-4RE), WE43 (Mg-4Y-3RE), QE22 (Mg-2Ag-2RE), ZE41(Mg-4Zn-1RE) ve ZC63 (Mg-6Zn-3Cu) vb. alaşımlar, yaşlandırılabilir alaşımlar olup maliyetleri özellikle nadir toprak elementleri içeren bileşimler için yüksektir. Bu nedenle havacılık sektörü tarafından tercih edilen fakat otomotiv sektöründe kullanımları pek mümkün olmayan alaşımlardır [6]. Mg-Zn alaşımları çökelti sertleşmesi ile mukavemetlendirilebilir alaşımlar arasında geliştirilen ilk alaşımlardandır. Çinkonun katı çözelti etkisiyle magnezyumun oda sıcaklığındaki mukavemetini arttırdığı belirtilmektedir [49]. Çinkonun magnezyum içindeki çözünürlüğü Mg-Zn denge diyagramında 341 °C'de %6.2, 204 °C'de ise%

2.8'dir. Magnezyum alaşımlarının akma mukavemetini arttırdığı bilinen çinkonun alaşıma %2'nin üzerinde ilave edilmesi özellikle çözeltiye alma işlemi yapılmış alaşımlarda kopma uzamasını düşürmekte ve çatlaklara sebep olmaktadır [[50]]. Çinkonun magnezyum içindeki katı çözünürlüğünün sıcaklıkla belirgin miktarda düştüğü ve aşırı doymuş katı çözeltilisinin önemli bir yaşlanma ile sertleşme etkisi sağladığı belirtilmektedir [50].

Yüksek sıcaklık uygulamalarında kullanılması amacıyla geliştirilen, yüksek mukavemetli magnezyum alaşımları arasında yer alan, nadir toprak elementleri içeren magnezyum alaşımlarına olan ilgi son zamanlarda giderek artmaktadır. Söylenildiği gibi yüksek sıcaklık uygulamaları için uygun olan bu alaşımlar SPH kristal yapısından kaynaklanan düşük süneklik özelliğinden dolayı çoğu magnezyum alaşımı gibi döküm yöntemleriyle şekillendirilmektedir. Magnezyum alaşımlarına ilave edilen nadir toprak elementlerinin, magnezyum alaşımlarının tane küçülmesinde, oda sıcaklığı ve yüksek sıcaklardaki mekanik davranışlarının geliştirilmesinde ve döküm karakteristiğinin geliştirilmesinde etkili yollardan biri olduğu bilinmektedir. Bu elementlerin arasında alaşımlara kazandırdığı özellikler açısından Y elementi özel bir yere sahiptir [52]. Yapılan çalışmalarda Mg-Zn alaşımlarına ilave edilen Y elementinin alaşım içerisinde pek çok ikincil faz oluşturduğu belirtilmektedir ve bu fazlar ilave edildikleri alaşımların mekanik özelliklerinin geliştirilmesinde son derece etkilidir [53]. Mg-Zn-Y alaşımı içinde ikincil faz olarak oluşan I-fazının magnezyumun yüksek sıcaklıktaki mekanik özelliklerini geliştirmesinin yanında düşük sıcaklıklardaki mekanik özelliklerini de geliştirdiği görülmüştür [54]. Kristal yapıdaki eksenlerin oranını (c/a) düşürerek magnezyumun sünekliğini arttırdığı bilinen Li ile aynı etkiyi sağlayan Y elementinin de <c+a> kayma türünü aktive ettiği ve magnezyumun sünekliğinin artırılmasına yardımcı olduğu yapılan çalışmalarda tespit edilmiştir [55].

Literatürde Y ilavesinin magnezyum alaşımları üzerine etkisinin incelendiği pek çok çalışma mevcuttur. Y elementinin Mg-Al-Zn alaşımına etkisinin incelendiği bir çalışmada kütlece %2'ye kadar Y ilave edilmesinin hem döküm hem de ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş AZ91D alaşımının çekme mukavemetini, akma dayanımını ve uzamasını arttırdığı belirtilmektedir [56].

Ekstrüzyonla üretilmiş Mg-Zn-Y-Zr alaşımını üzerine yapılan çalışmalarda yaklaşık olarak (ağırlıkça)%1 Y bulunması durumunda yapıda ikincil faz olarak I-fazının oluştuğu ve alaşımın bu şekliyle en yüksek mukavemet değerine sahip olduğu fakat sünekliğin de mukavemetin tersi yönünde en düşük değerde olduğu gözlemlenmiştir. Kütlece yaklaşık %2 ve %3 arasında değişen Y elementi içeren Mg-Zn-Y-Zr alaşımlarında I-fazı ve kübik W-fazının birlikte bulunduğu, Y'nin artmasıyla mukavemetin azaldığı fakat deformasyon kapasitesinin de arttığı belirtilmektedir. I-fazının yapı içerisinde tane küçültücü etki yaratarak mukavemeti artırma konusunda W-fazından üstün bir özelliğe sahip olduğu çalışmadan çıkarılan sonuçlar arasında yer almaktadır [57].

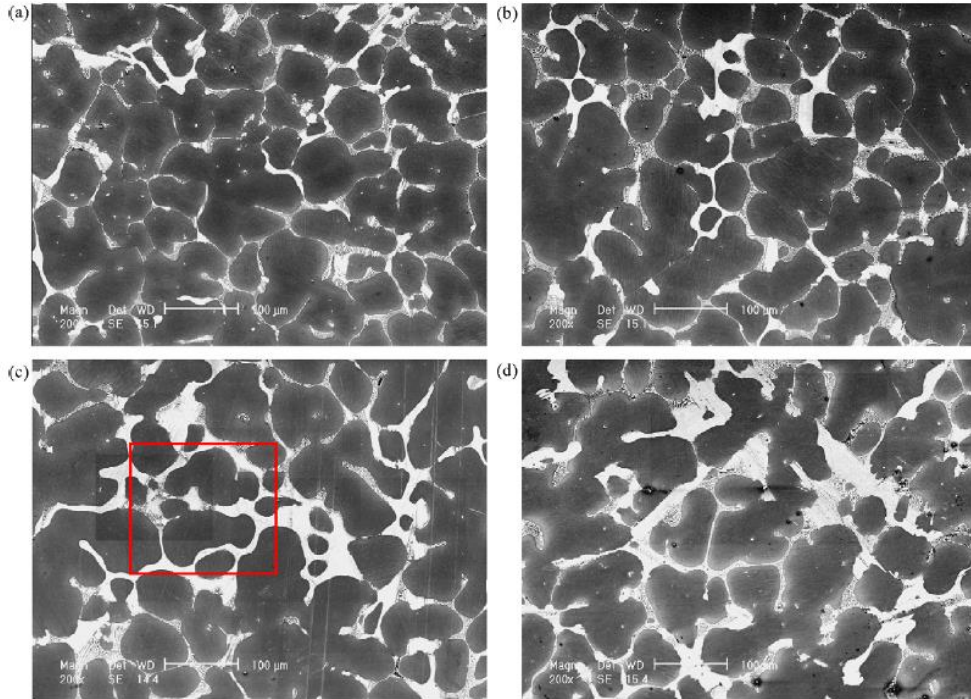
Y ilavesinin Mg-6Zn-1Mn alaşımının mikro yapı ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğinin araştırıldığı başka bir çalışmada Y ilave edilmemiş ve (ağırlıkça)%0.7-6 aralığında Y ilavesi yapılmış beş farklı alaşım grubuyla, alaşımların döküm ve ekstrüzyon sonrası mekanik özellikleri ve mikro yapı özellikleri değerlendirilmiştir. Farklı kütle oranlardaki Y/Zn ilavesiyle Mg₇Zn₃, I-fazı (Mg₃YZn₆), W-fazı (Mg₃Y₂Zn₃) ve X-fazı (Mg₁₂YZn) miktarlarının değiştiği belirtilirken, Y elementinin Mg-6Zn-1Mn alaşımının mekanik özelliklerini değiştirmede önemli bir etkisi olduğu çıkarılan sonuçlar arasındadır. Farklı oranlarda Y ilave edilen alaşımlar arasında en iyi mekanik özelliklere sahip olan Mg-6Zn-1Mn-6Y alaşımının 389 MPa gerilme mukavemeti, %6.4 uzama ve 345 MPa akma dayanımına sahip olduğu belirtilmiştir. Y ilavesiyle yapıda meydana gelen tane küçülmesi ve oluşan Mg-Zn-Y üçlü fazlarının etkisiyle, ince Mn partiküllerinin dispersiyon sertleşmesine katkı sağlaması yüksek mukavemetin sebebi olarak belirtilmiştir.[58].

W- fazının, döküm yapısına sahip Mg-Zn-Y-Zr alaşımı üzerindeki etkisinin incelendiği bir diğer çalışmada ise Zn/Y oranı yaklaşık olarak 0.97 civarında tutulacak şekilde Zn ve Y elementleri alaşımlara eklenmiş ve bu şekilde dört alaşım üzerinde çalışmalar yapılmıştır. α-Mg ve kübik W-fazının bulunduğu yapıda Zn ve Y miktarı arttıkça W-fazı piklerinin şiddetinin de arttığı söylenmektedir. Tablo 1. 4'te kimyasal kompozisyonları verilen dört alaşıma ait Görsel 1. 1.'deki mikroyapı görüntülerinden fark edileceği gibi Zn ve Y miktarı arttıkça tane sınırlarında bulunan W-fazının da arttığı belirtilmektedir. W-fazının artmasıyla uzama miktarının azaldığı belirtilirken, W-fazının (hacimce)%17.5' i aştıktan sonra, bu fazın tane sınırlarında daha kaba taneli ağ yapısına sebep olduğu, ve bu kırılğan fazın mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilediği, yani

mekanik özellikleri geliştirecek yönde tane küçültücü bir etki yaratmadığı öne sürülmüştür [59].

Tablo 1. 4 *Mg-Zn-Y-Zr alaşım sistemi için hazırlanan dört farklı alaşımın kompozisyonları [59]*

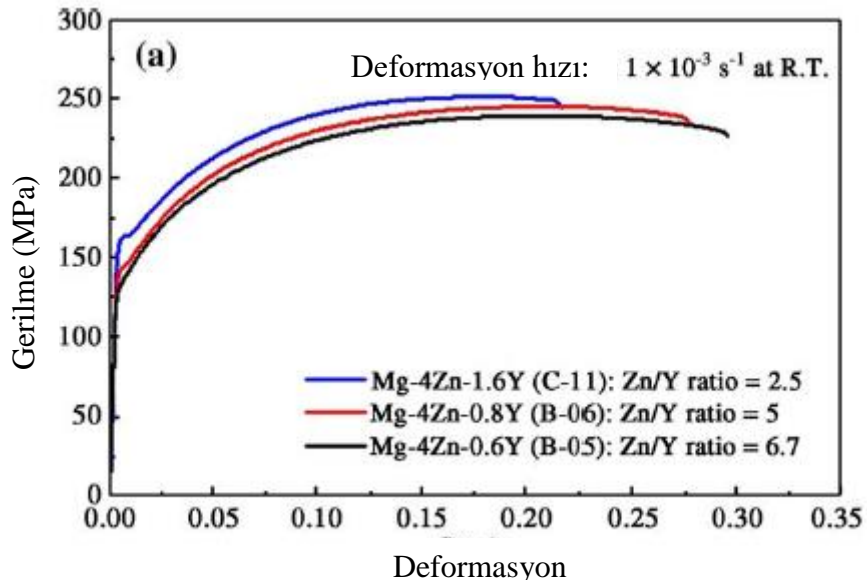
Alaşım	Kimyasal Kompozisyon (wt%)			
	Zn	Y	Zr	Zn/Y
Alaşım 1	3.24	3.34	0.67	0.97
Alaşım 2	3.93	4.14	0.69	0.95
Alaşım 3	4.87	5.03	0.73	0.97
Alaşım 4	5.95	6.08	0.64	0.98



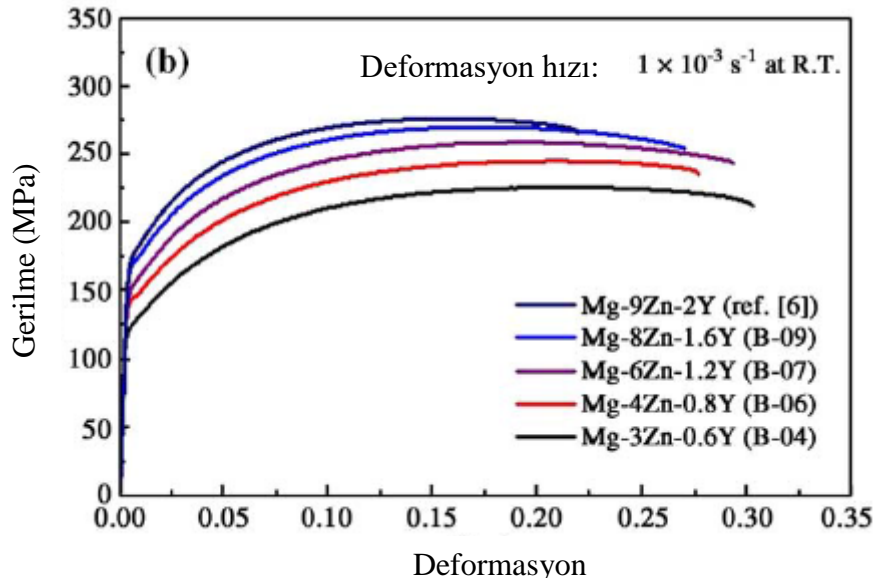
Görsel 1. 1. *Döküm yapıdaki Mg-Zn-Y-Zr alaşımlarının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri: (a) alaşım 1, (b) alaşım 2, (c) alaşım 3, (d) alaşım 4*

Zn ve Y elementlerinin oranının Mg-Zn-Y alaşımını mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerine etkilerinin incelendiği başka bir çalışmada da iki elementin ağırlıkça

oranları toplamları %10'nun altında tutulmuştur. Yapılan çalışmalardan elde edilen bilgilere göre katılma sırasında öncelikle α -Mg oluşmakta, ikili evre Mg_7Zn_3 ya da üçlü evre I-fazı veya W-fazının çekirdeklenmesi bunu takip etmektedir. Dendritler arasında bulunan ikinci fazın oluşumunun Zn/Y alaşımına bağlı olduğu belirtilmekle birlikte döküm yapıları içindeki Zn/Y oranı yaklaşık olarak %10 ise α -Mg+ Mg_7Zn_3 fazlarının; %5-7 arasında olduğunda α -Mg+I-fazlarının; %1.5-2 arasında olduğunda ise α -Mg+W-fazı+I-fazlarının yapı içerisinde görüldüğü söylenmektedir. Şekil 1. 6'de farklı Zn/Y oranlarına ait alaşımların çekme testi sonuçları gösterilmiştir. Şekil 1. 7'de ise Zn/Y oranı sabit tutularak Zn ve Y elementlerinin miktarları değiştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar doğrultusunda şekillerden de görülebileceği üzere artan I-fazı ile akma mukavemetinin, çekme dayanımının arttığı görülmekte ve bu alaşımlardaki süneklik miktarının da son derece yüksek olduğu belirtilmektedir. Alaşımların süneklikleri birbirleriyle kıyaslandığı zaman ise I-fazının artmasıyla birlikte yapı içerisinde daha fazla metaller arası bileşik partikülü bulunduğu için sünekliğin azaldığı söylenmekte, alaşımların %25 gibi yüksek uzama sergilemelerinin sebebi ise α -Mg ve I-fazı arasındaki düşük yüzey enerjisi ile açıklanmaktadır. Bu şekilde dislokasyonların sert partikülleri kesemeyerek etraflarında 'loop' oluşturarak biriktikleri öne sürülmektedir [60].



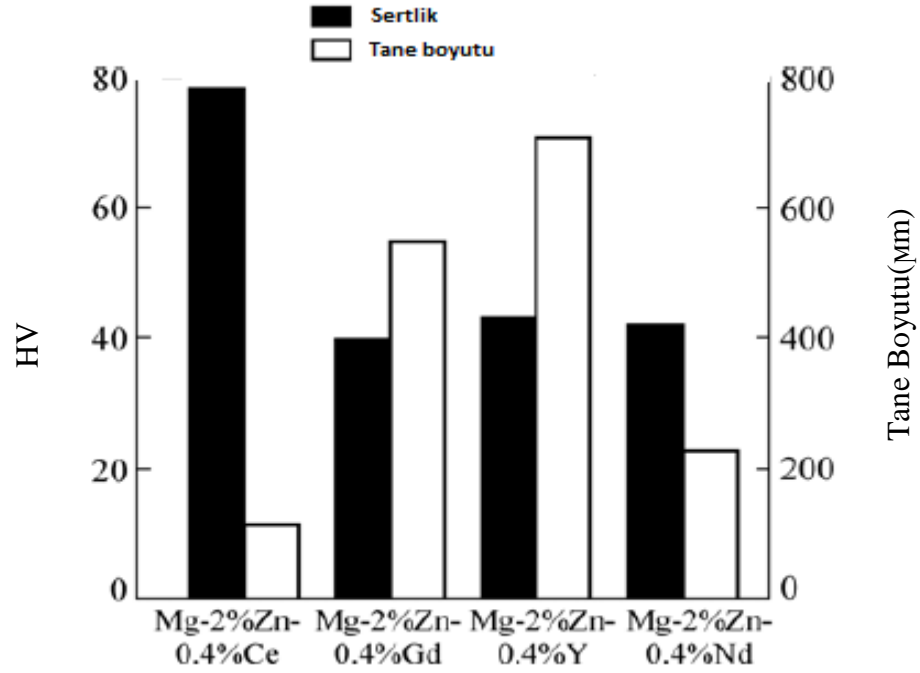
Şekil 1. 6. Farklı Zn/Y oranına ait alaşımların çekme testi sonuçları



Şekil 1. 7. Zn/Y oranı sabit tutularak hazırlanmış Zn ve Y element miktarları farklı alaşımların çekme testi sonuçları

Üzerine çeşitli çalışmaların gerçekleştirildiği bir diğer toprak alkali elementi seryumun diğer toprak alkali metallere kıyasla daha ucuz olduğu belirtilirken tane küçültme etkisiyle tekstürü iyileştirme konusunda önemli bir potansiyele sahip olduğu ve sünekliği arttırdığı literatürde belirtilmiştir [61],[62].

Mg-2Zn alaşımına %0.4 oranında Ce, Gd, Y ve Nd elementleri ilave edilerek hazırlanan alaşımların, döküm ve ekstrüzyon hallerinin incelendiği başka bir çalışmadan çıkarılan sonuçlara göre, eklenen Ce, Gd, Y ve Nd elementlerinin her birinin magnezyum içindeki katı çözünlükleri farklı olduğu için mikro yapı içinde oluşturduğu çökelti fazlarının yapısı, şekli ve miktarları da farklı oranlarda mukavemet artışı sağlayacak şekilde tane küçülme etkisi yaratmaktadır. Şekil 1. 8’de görüldüğü gibi tane boyutları ve sertlik değerleri verilen alaşımlar içinde en küçük tane yapısına sahip alaşımın Nd ve Ce ilaveli alaşımlar olduğu belirtilirken en yüksek sertlik değerini ise Ce ilaveli alaşımın verdiği sonucu çıkarılmıştır. Ekstrüzyonla üretilmiş yapılara ait mukavemet ve uzama değerleri kıyaslanan alaşımlardan ise Ce elentine sahip alaşımın Nd ve Y elementi içeren alaşımlara göre yüksek mukavemete sahip olduğu fakat uzama miktarı açısından daha düşük değerlere ulaştığı verilen bilgiler arasındadır [63].



Şekil 1. 8. Mg-2Zn alaşımına %0.4 oranında Ce, Gd, Y ve Nd elementleri ilave edilmiş alaşımların sertlik ve tane boyutu değerleri

%0.1, 0.3, 0.5 Ce ilave edilerek seryum elementinin Mg-1.5Zn-0.2Zr alaşımı üzerindeki etkisinin incelendiği başka bir çalışmada, seryum ilave edilen alaşımlarda Mg₁₂Ce fazı görülmüş ve tane sınırlarında oluştuğu belirtilmiştir. Tane küçültücü etkisi bulunduğu belirtilen seryumun tane boyutunu düşürmede yaptığı en iyi katkının %0.3 Ce eklenen alaşımda görüldüğü çalışmada yer alan bilgiler arasındadır [64].

Aynı çalışmada kullanılan bir diğer element ise kalaydır. Bu elementin magnezyumun latis parametresini ve istif hatası enerjisini etkilediği belirtilmektedir [65]. Sn ilavesi ile yapıda oluşan yüksek ergime sıcaklığına sahip Mg₂Sn intermetalik bileşiğinin, yüksek sıcaklıktaki metalik özellikleri geliştirdiği düşünülmektedir. Mg-4Zn alaşımına ilave edilen Sn elementinin haddelenmiş ve tavlannış Mg-4Zn alaşımının mukavemetini arttırdığı fakat ilave edildiği döküm ve haddeleme-tavlama işlemi görmüş Mg-4Zn alaşımındaki akma mukavemetinin son derece düşük kaldığı belirtilmektedir [66].

Mg-4Zn alaşımının mikroyapı ve mekanik zelliklerinin Pb ve Sn elementleri ilave edilerek değerlendirildiği bir diğer çalışmada Mg-4Zn-Pb, Mg-4Zn-Sn, Mg-4Zn-3Sn alaşımlarının özellikleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre Sn elementinin yapıda önemli bir tane küçültme etkisi yarattığı, kuşunun ise yaşlanma kinetiğini

yavaşlatarak yaşlanma ile sertleşme davranışını olumlu yönde etkilediği belirtilmiştir. Yaşlandırma grafiğinde maksimum akma mukavemeti 87 MPa olan Mg-4Zn alaşımının akma mukavemetinin değeri, Sn ilavesi ile 129 MPa'le çıkarken, Pb ilavesiyle 84 MPa'a düştüğü sonucu çıkarılmıştır. Yapılan TEM çalışmasında Pb ilavesinin yapıda çubuk şeklinde olan β'_1 ve levha şeklinde olan β'_2 çökeltilerini oluşturduğu belirtilmiştir. Bu çökelti partiküllerinin Pb ilave edilmiş alaşımda Mg-4Zn'ye göre daha büyük ve daha az yoğunlukta olduğu belirtilirken, Sn içeren alaşımlarda çökelti partiküllerinin daha küçük olduğu ve %3 Sn ilavesi ile yapıda ergime sıcaklığı yüksek Mg₂Sn partiküllerinin olduğu rapor edilmiştir [67].

2. DENEYSEL YÖNTEM

2.1. DeneYlerde Kullanılan Alaşımın Temini ve Hazırlanması

Magnezyumun deformasyon kapasitesinin artırılması amacıyla literatür araştırmasından elde edilen bilgiler çevresinde belirlenen kompozisyonlardaki ana alaşımlar, Çin'deki bir firmaya sipariş edilerek yaklaşık olarak 4kg'lık parçalar halinde temin edilmiştir. Çin'den gelen ana alaşım kompozisyonları Tablo 2. 1'de gösterilmektedir. Bu alaşımları master alaşım olarak kullanarak, Türkiye'de Anadolu Üniversitesi laboratuvar koşullarında hazırlanan alaşım için kullanılan ana alaşım miktarları Tablo 2. 2'de yer almaktadır.

Tablo 2. 1. Ergitmeleri Çin'de yaptırılan alaşım kompozisyonları

Mg-2Sn-2Y		Mg-2Zn-2Y		Mg-2Zn-2Ce	
Sn	1,97%	Zn	1,91%	Zn	1,91%
Y	2,09%	Y	2,08%	Ce	2,02%
Mg	95,94%	Mg	96,01%	Mg	96,07%

Tablo 2. 2 Laboratuvar koşullarında elde edilen alaşımın kompozisyonu ve ana alaşımlardan kullanılan miktarlar.

Alaşım Kompozisyonu	Master Alaşım Miktarları
Mg-2Y-2Zn-1Sn	Mg-2Zn-2Y (778 gr)
	Mg-2Sn-2Y (771 gr)

Ana alaşımlardan belirli miktarlarda kesilen parçalar 21×21×5 boyutlarındaki dikdörtgenler prizması şeklindeki çelik potalar içine yerleştirilmiş ve Görsel 2. 1'de gösterilen koruyucu gaz bağlantısı ve akışı sağlayabilen SCFEB 10M 30/60 marka fırın kullanılarak ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ergitme öncesi 200 °C'de kurutma amaçlı ön ısıtma uygulanmıştır. Daha sonra 790°C'ye ısıtılmış fırının içerisine yerleştirilen pota bu sıcaklıkta 20 dakika bekletilmiş ardından fırın kapatılarak ergimiş metal fırın içerisinde soğumaya bırakılmıştır. İşlem süresi boyunca yüksek saflıkta ortama 1.4 bar

basıncındaki argon gazı verilmiştir. Fırın sıcaklığı 550°C'ye düştükten sonra argon gazı kesilerek, numunenin oda sıcaklığında soğuması sağlanmıştır.



Görsel 2. 1 Ergitme için kullanılan fırın

2.2. Soğuk Kalıba Alma ve Numune Hazırlama

Metalografi numunelerinin hazırlanması için alaşımların uygun bölgelerinden uygun boyutlarda kesilen parçalar öncelikle soğuk kalıba alınmıştır. Soğuk kalıba almak için kalıp içerisine yerleştirilen numunenin üstüne dökülen karışımın reçetesi: 20ml polimer, 1ml sertleştirici, 1ml hızlandırıcıdır. Bir karıştırma kabı içine koyulan sıvı polimer üzerine 1ml sertleştirici eklenmiş ve hava kabarcıkları oluşmasını engelleyecek şekilde yavaşça bir dakika boyunca karıştırılmıştır. Ardından hızlandırıcı ilave edilerek bir dakika daha karıştırılan polimerik karışım kalıp içerisine yerleştirilen numune üzerine dökülmüş ve tamamen katılaşması için yaklaşık olarak 30dk kalıp içinde bekletilmiştir.

Soğuk kalıba alma işlemi ardından kalıptan çıkarılan numunelere yüzey parlatma işlemi yapılmıştır. Zımparalama için 800, 1200, 2000, 2400 sınıfı zımpara kağıtları kullanılmıştır. Zımparalama işlemleri sırasında numunelerin oksitlenmesini önlemek için metanol kullanılmış, ardından numunelere hava tutularak kurutma yapılmıştır.

Zımparalama işleminden sonra parlatma işlemine geçilmiştir. Bunun için Struers Tegra Pol-25 markalı parlatma cihazı kullanılmıştır. İlk olarak, 3µm'lik lübrikanın kullanıldığı DUCK 2-3 dakika uygulanmış ve ardından metanol ile numune yüzeyi

temizlenerek hava tutulmuştur. Sonrasında 3 dakika NAP ve koloidal silika kullanılarak 1dakika CHEM uygulanmıştır. İki işlem arasında numuneler yine metanol ile temizlenmiş, ardından hava ile kurutulmuştur. Parlatma işlemi tamamlanan numuneler inceleme yapılacak zamana kadar vakumlu desikatörde tutulmuştur.

Alaşımın tane yapılarını incelemek amacıyla hazırlanan dağlama solüsyonu için Tablo 2. 3'te gösterildiği gibi pikrik asit, asetik asit, etanol ve saf su kullanılmıştır. Hazırlanan dağlama solüsyonu içine daldırılan numuneler solüsyon içinde 3 saniye tutulduktan sonra, yüzeyleri saf su ve etanol kullanılarak temizlenmiştir. Hava tutarak kurutulan numuneler ışık mikroskobu altında incelenmiştir.

Tablo 2. 3 Dağlama işlemi için kullanılan solüsyonun içeriği

Kullanılan malzemeler	Miktar
Pikrik asit	6 g
Asetik asit	5 ml
Etanol	150 ml
Saf su	11ml

2.3. Numunelerin Optik Mikroskop ve SEM ile İncelemesi

Parlatma işleminin ardından numuneler NİKON Eclipse MA100 ışık mikroskobu, ve Phenom marka masaüstü SEM cihazı ile incelenmiştir. Phenom ile alan ve nokta EDS analizleri yapılarak kompozisyon dağılımı kontrol edilmiştir. İnküzyon ve tane yapıları ışık mikroskobu altında incelenmiştir. Ayrıca bazı numunelerin mikroyapılarını incelemek için Supra 50VP elektron mikroskobu kullanılmıştır.

2.4 XRD Analizi

Parlatma işlemi ardından X-ışınları ile düzlemler arası mesafeleri bilinen fazlardan yararlanılarak numunelerdeki fazların tespiti sağlanmaya çalışılmıştır. Bu işlem için

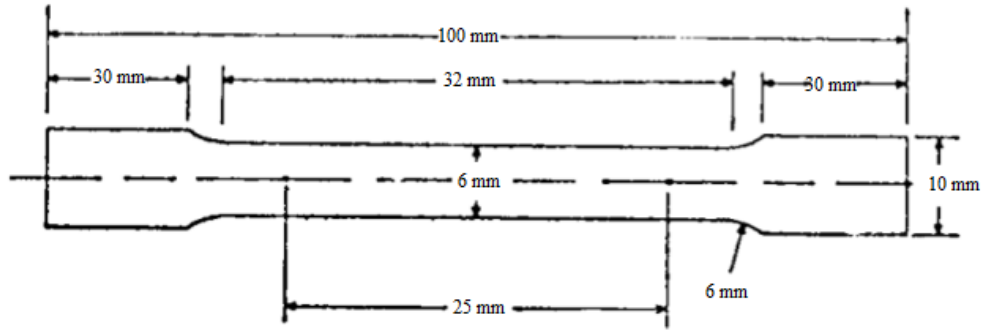
Rigaku marka XRD cihazdan faydalanılmış ve görülmesi beklenen fazlar 10-110 dereceleri arasında tespit edilmeye çalışılmıştır.

2.5. Sertlik Testi

Numunelerin yüzeyinde belirgin bir iz oluşturulabilmesi ve oluşturulan izin ölçülerinin doğru bir şekilde belirlenebilmesi amacıyla numuneler sertlik testi öncesinde soğuk kalıplanmış halde parlatılmıştır. Sertlikler EMCO Test M1C010 sertlik ölçme cihazı ile ölçülmüştür ve ölçüm metodu olarak Brinell ölçüm yöntemi kullanılmıştır. Sonuçlar en az 3 ölçümün ortalaması şeklinde belirtilmiştir.

2.6. Çekme Testi

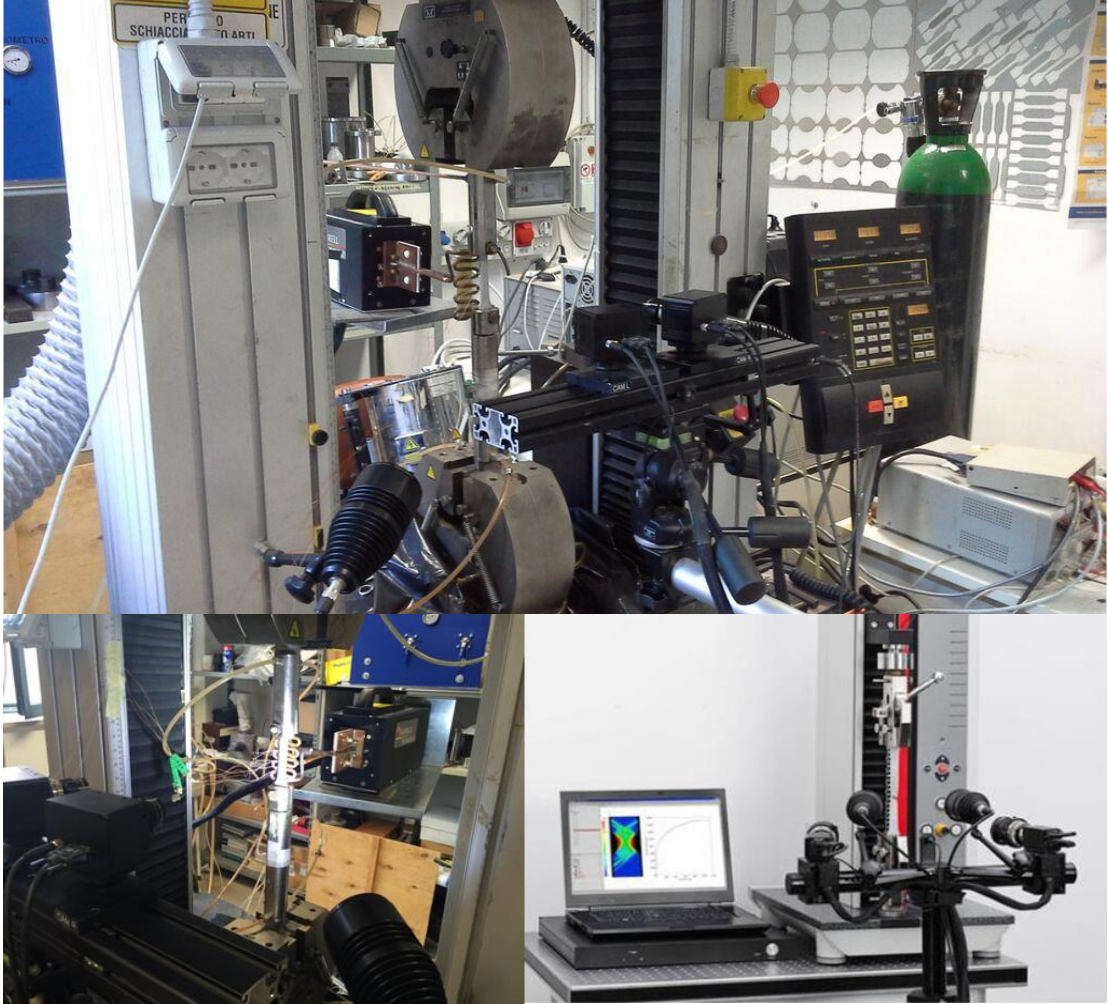
Çekme testi için ölçüleri Şekil 2. 1'de gösterilen ASTM E8 standartındaki numuneler Türkiye'de EDM ile kesilerek hazırlanmıştır. Hazırlanan numunelerin çekme testleri ise İtalya, Politecnico di Bari üniversitesindeki Department of Mechanical Engineering, Mathematics & Management Engineering bölümünde SMATI Grubu laboratuvarlarında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 2. 1. Çekme numunelerinin boyutları

Çekme testleri INSTRON 4485 ve numune yüzeyinden optik okuma yapabilen bir düzeneğe sahip olan ARAMIS sistemiyle gerçekleştirilmiştir. ARAMIS, numune üzerinde önceden oluşturulmuş ve ölçekli bir nokta deseninin görüntülenmesi sayesinde, desendeki mesafelerin değişimini okuyarak, deformasyonun optik olarak belirlenmesini sağlayan bir sistemdir. ARAMIS sisteminin iki kamerası sistem gerekliliklerine (konumlanma açısı, uzaklık, yükseklik) uygun bir şekilde yerleştirildikten sonra, görüntünün aktarılacağı monitör üzerinden gerekli kalibrasyon işlemleri, netliği, piksel boyutları ayarlanır ve kameraların ne kadar zamanda bir görüntü alacağı yani görüntü

frekansı belirlenir. Ardından çekme testi cihazıyla koordineli bir şekilde çalıştırılarak çekme testi gerçekleştirilir. Mekanik özelliklerin belirlenmesi için kullanılan INSTRON 4485 ve Aramis cihazlarının yerleşimi Görsel 2. 2’te gösterildiği gibidir.



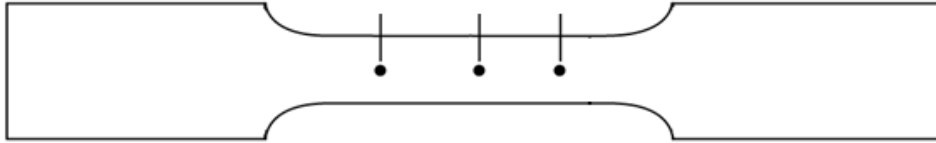
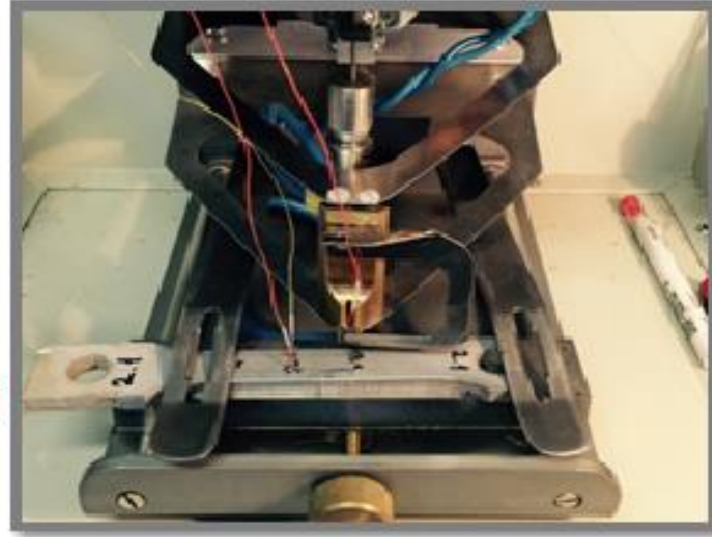
Görsel 2. 2. Çekme testi için kullanılan INSTRON 4485 ve Aramis sistemi.

Numuneler Görsel 2. 3’te görülebileceği gibi öncelikle özel beyaz bir sprej boya ile boyanır ve üzerine homojen benekli bir desen oluşturacak şekilde siyah sprej boya uygulanır. Bu şekilde sistem referans olarak alınan ilk görüntü ile deformasyon sırasındaki görüntüleri kıyaslayarak deformasyonun ve gerinmenin yatay ve dikey eksenlerde lokal olarak da belirlenebilmesini sağlar.



Görsel 2. 3. *Aramis sistemi için hazırlanmış numune örneği*

Yüksek sıcaklıkta yapılan çekme testlerinde ısıtıcı sistem olarak AMBRELL EASYHEAT LI modeli cihaz kullanılmıştır ve sıcaklığın kontrol edilmesi amacıyla numuneye üç adet termokupl, Görsel 2. 4'te gösterildiği gibi, biri merkezde diğer ikisi merkezdeki termokupla 1.5cm uzaklıkta olacak şekilde punto kaynağıyla kaynaklanmıştır. Termokupl ölçümleri çekme testi süresince LABVIEW yazılım sistemiyle denetlenmiş ve sıcaklık gradyanları çizilerek sıcaklığın çekme numuneleri üzerinde homojen olarak dağıldığından emin olunması sağlanmıştır.

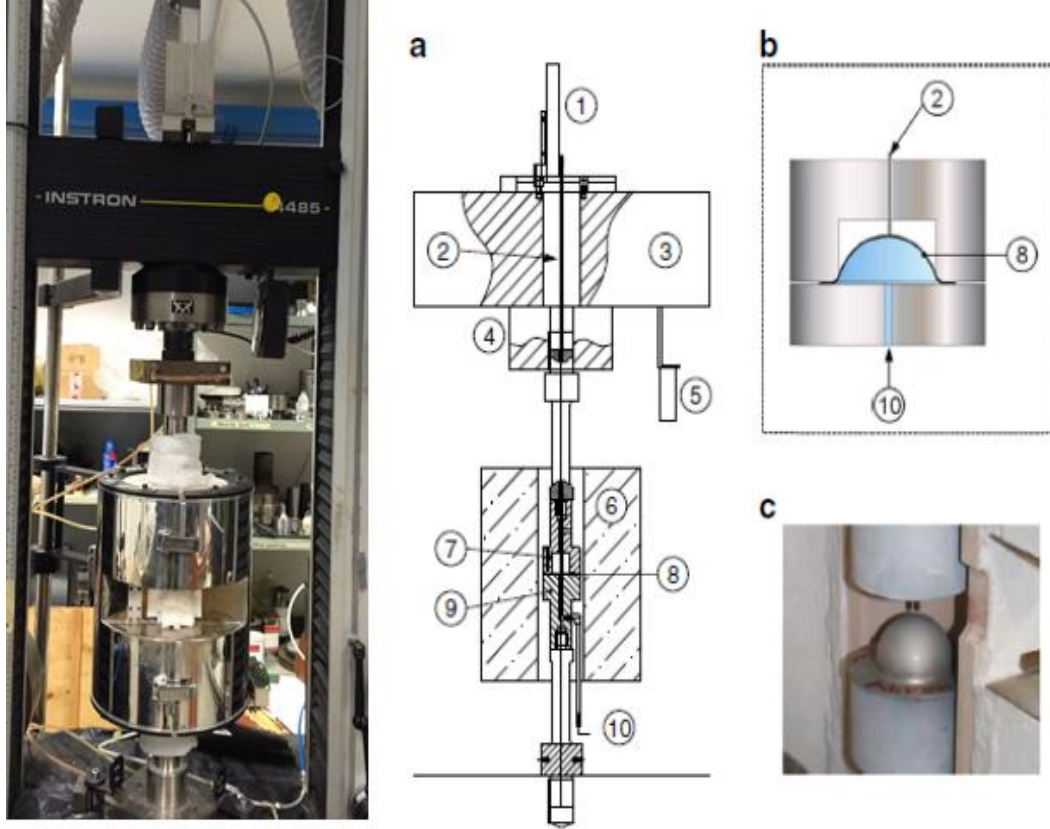


Görsel 2. 4. *Yüksek sıcaklıkta uygulanan çekme testleri için termokuplların numune üzerine kaynaklanması*

Çekme testleri oda sıcaklığına ek olarak, magnezyumun sıcaklıkla değişen sıralı bir deformasyon mekanizmasına sahip olmasından dolayı 250°C ve 400°C'de test edilmiştir.

2.7. Serbest Şişme Testi

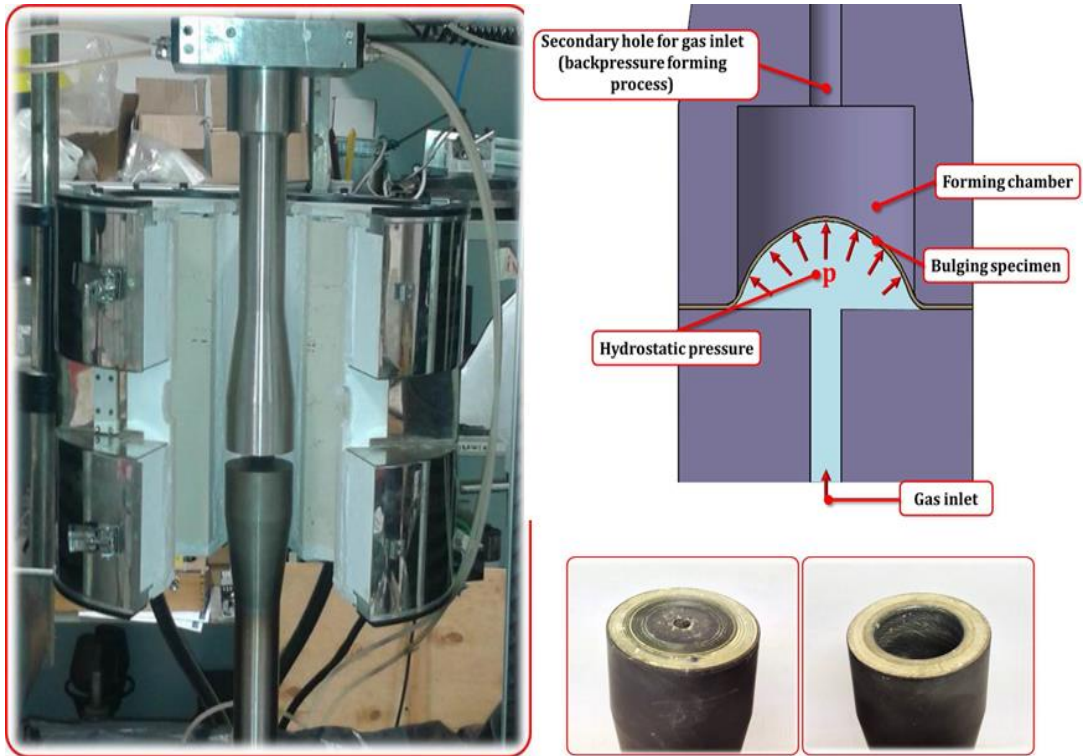
Serbest şişme testi İtalya, Politecnico di Bari üniversitesindeki Department of Mechanical Engineering, Mathematics & Management Engineering bölümü laboratuvarlarında INSTRON 4485 cihazına monte edilmiş silindirik fırın sistemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Serbest şişme testi ekipmanları ve bölümleri Görsel 2. 5’da gösterildiği gibidir.



Görsel 2. 5. (a) Sistem ve ekipmanların gösterimi. (1) Kubbe yüksekliğini ölçmeyi sağlayan transducer, (2) pozisyonu gösteren transducer'ın çelik çubuğu, (3) test cihazının yük kafaları, (4) yük hücresi, (5) elektrik fanı, (6) silindirik fırın, (7) serbest şişme kalıbı, (8) numune, (9) gaz girişli numune tutucu, (10) gaz girişi; (b) kalıp içi gösterim, (c) serbest şişme testi ardından numunenin görünümü

Numuneler döküm halindeki parçaların öncelikle 80mm çapa sahip silindir blok şeklinde EDM ile kesilmesi ve ardından silindir bloğun su jeti ile 2mm kalınlığındaki parçalara ayrılmasıyla elde edilmiştir. Numunelerin kalıba yapışmasını önlemek için bor nitrür kullanılmıştır. Görsel 2. 6’de gösterildiği gibi Serbest şişme testi 3mm gaz girişiyle 45mm kalıp boşluğuna sahip kalıpta, numunenin serbest bir şekilde şişerek deformasyona uğramasına imkan sağlar. Numunenin tam ortasına gelecek şekilde konumlandırılmış

transdüser sayesinde kubbe yüksekliği, monitöre yansıtılan kubbe yüksekliği-zaman grafiğinden test boyunca gözlemlenebilir. Numunede yırtılma veya delinme meydana gelmesiyle birlikte gaz basıncı düşer ve test durdurularak deney tamamlanmış olur. Deneyin ideal olarak tam kubbe noktasının üstünde yırtılma ile sonuçlanması gerekir. Çünkü bu bölge malzemenin en çok deformasyona uğradığı bölgedir. Yapılan çalışmada sıcaklık ve basınç parametreleri değiştirilerek, bu parametrelerin malzemenin deformasyonu üzerindeki etkileri incelenmiştir.



Görsel 2. 6. Serbest şişme testi fırınının içi ve numunenin deformasyonunun gerçekleştiği kalıp

3.BULGULAR VE TARTIŞMA

3.1. Hazırlanan Alaşımların Mikroyapıları

Döküm yapısında olması ve katılma ardından 5-6 saatlik homojenizasyon tavlama yapılmaması sebebiyle elde edilen alaşımlar kaba dendritik bir mikroyapıya sahiptir. Tane boyutlarının iri olması sebebiyle ASTM yöntemlerinin uygulanamadığı tane boyutu analizi, ışık mikroskobu altında 20 adet dendrit içi serbest matris boyutu ortalamasının alınmasıyla gerçekleştirilmiştir. Bu değerler, alaşımların tane boyutu ortalamaları olarak Tablo 3. 1’de verilmiştir. Laboratuvar çalışmamızda yaptığımız ergitmelerin ana alaşımları olan Mg-2Zn-2Y ve Mg-2Sn-2Y alaşımlarının en iri tane boyutuna sahip olduğu gözlemlenirken, bu iki alaşım sisteminden elde edilen Mg-2Y-2Zn-1Sn’nin ve Mg-2Zn-2Ce’nin 200 µm değeri ile daha küçük tane boyuna sahip olduğu görülmüştür. Laboratuvar çalışmalarından elde edilen alaşımların daha fazla element çeşidi içermesi ve yapı içinde oluşan ergime sıcaklığı yüksek olduğu düşünülen intermetalik fazların özellikle homojenizasyon sırasında yarattığı tane büyümesini engelleyici etkisi sayesinde daha küçük tane yapısına sahip olduğu düşünülmektedir.

Tablo 3. 1. *Alaşımlara ait tane boyutları*

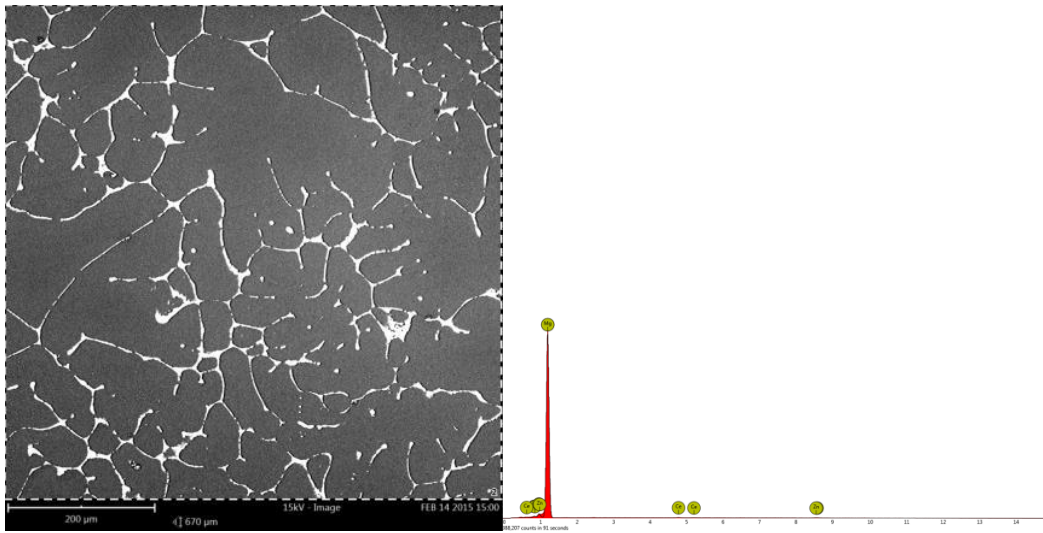
Alaşım Nominal Bileşimleri	Tane Boyutu (µm)
Mg-2Zn-2Ce	~200
Mg-2Zn-2Y	~350
Mg-2Sn-2Y	~350
Mg-2Y-2Zn-1Sn	~200

İlgilenilen bu alaşımlarla ilgili mikroyapı sonuçlarının detaylı bir şekilde yorumlanabilmesi için önceden oluşturulmuş faz diyagramları yoktur. Bu sistemlerde oluşan metallar arası bileşiklerin X-ışınları ile bulunması düzlemler arasındaki mesafeleri bilinmeyen fazlar olduğu için, uzun süreli ve çok gayret gerektiren kristalografi çalışmaları gerektirmektedir. Tezin konusu elde edilen alaşımlardaki mekanik özelliklerin, özellikle de deformasyon kapasitesinin yüksekliğinin, tespit ve araştırmasıyla alakalı olduğu için bu tarz bir çalışmaya gidilmemiştir ve alaşımların

mikroyapı görüntülerinin yorumları literatürde yer alan bilgiler ve genel malzeme bilimi kuralları ışığında yapılmaya çalışılmıştır.

Alaşımın nominal bileşimlerinin ve içerdikleri fazların bileşimlerinin tespit edilmesi için yapılan SEM çalışmalarının alan ve nokta EDS analizleri aşağıdaki gibidir:

Mg-2Zn-2Ce alaşımının nominal bileşimini veren EDS alan analizi Şekil 3. 1’de gösterilmektedir. Tane sınırlarında yer alan metaller arası fazın nominal bileşimi ise Tablo 3. 2’de gösterildiği gibidir. Tane sınırlarında oluştuğu gözlemlenen intermetalik fazın literatürde yer alan bilgiler ışığında Mg_2Ce olduğu söylenebilir.



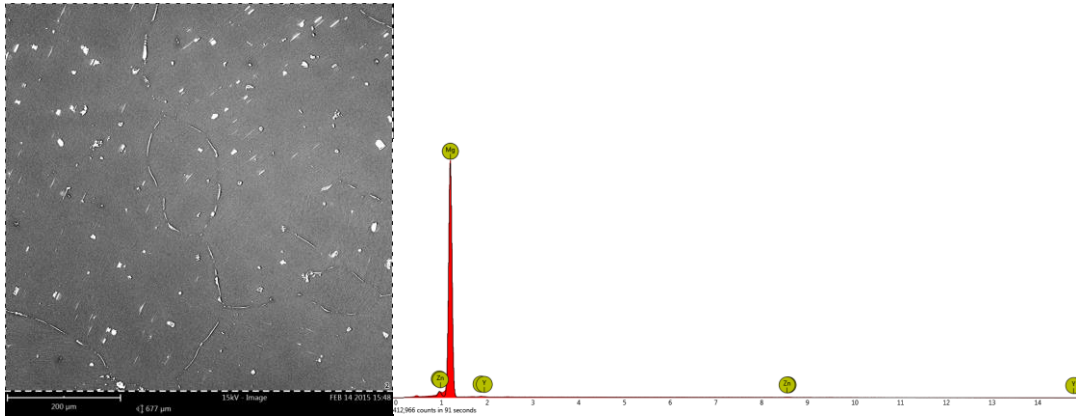
Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	96.7	0.2
58	Ce	Cerium	1.6	6.1
30	Zn	Zinc	1.7	9.8

Şekil 3. 1. Mg-2Zn-2Ce alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS alan analizi

Tablo 3. 2. *Mg-2Zn-2Ce alaşımı içindeki intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi*

Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	75,7	0.4
58	Ce	Cerium	16.6	1.7
30	Zn	Zinc	7.7	4.3

Mg-2Zn-2Y alaşımına ait nominal bileşimin yer aldđı EDS alan analizi Şekil 3. 2’de gsterildiği gibidir. İntermetalik partiküllere ait nominal bileşimin gsterildiği EDS nokta analizi sonuçları ise Tablo 3. 3’te yer almaktadır. Yapıda tane sınırlarında uzanan az miktarda intermetalik fazın yanı sıra tane içerisinde dağılım gsteren intermetalik fazlar da dikkat çekmektedir. Literatürde yer alan bilgilere gore bu fazlar W-fazı ve I-fazı olabilir [59]. W-fazının ağsı yapıya sahip olduğu ve tane sınırlarında yer aldđı bilinmektedir [60].



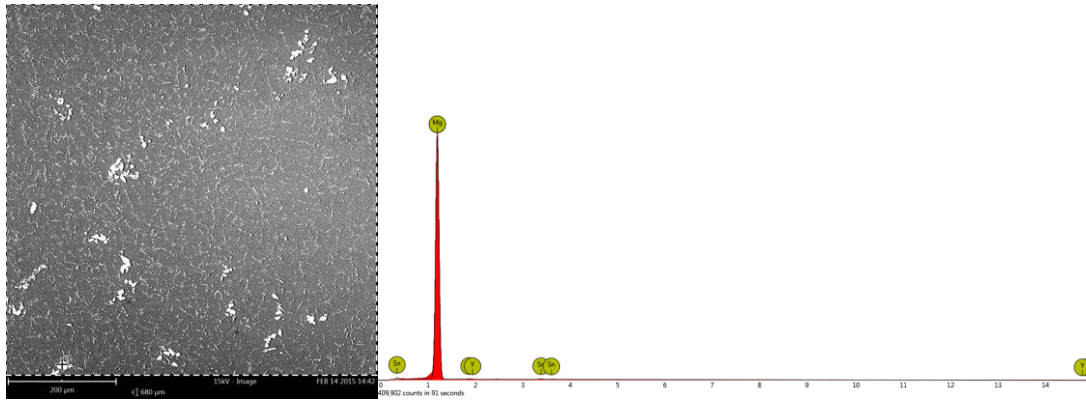
Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	96.4	0.2
39	Y	Yttrium	1.5	5.3
30	Zn	Zinc	2.1	8.2

Şekil 3. 2 . *Mg-2Zn-2Y alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS alan analizi*

Tablo 3. 3. *Mg-2Zn-2Y alaşımı içindeki intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi*

Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	78.6	0.4
39	Y	Yttrium	14.3	1.6
30	Zn	Zinc	7.2	4.7

Mg-2Sn-2Y alaşımının nominal bileşimini veren EDS alan analizi Şekil 3. 3'te yer almaktadır. Tane sınırlarında bulunan metallerrarası fazın nominal bileşimi ise Tablo 3. 4'te gösterildiği gibidir. Oluşan intermetalik bileşiğin yapısında Mg, Sn ve Y elementleri bulunmaktadır.



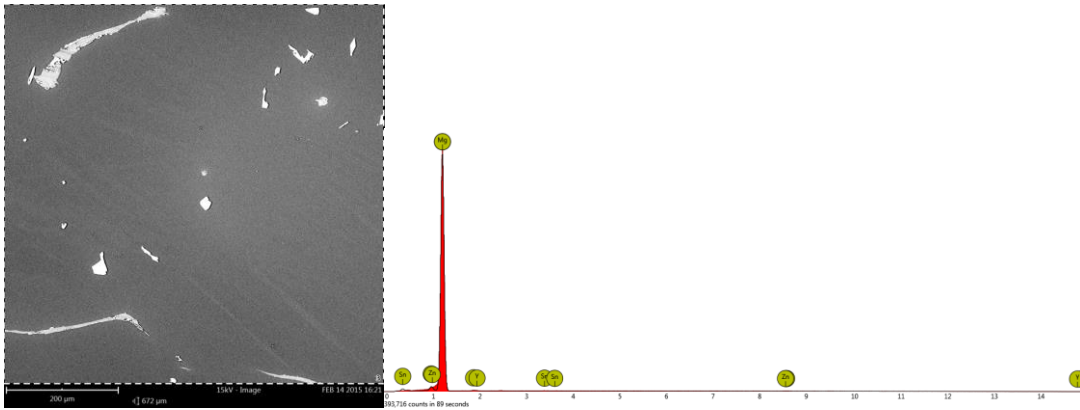
Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	97.8	0.2
50	Sn	Tin	1.1	7.1
39	Y	Yttrium	1.1	7.4

Şekil 3. 3. *Mg-2Sn-2Y alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS alan analizi*

Tablo 3. 4. *Mg-2Sn-2Y alaşımı içindeki intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi*

Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	47.8	0.6
39	Y	Yttrium	24.9	1.1
50	Sn	Tin	27.3	1.2

Mg-2Y-2Zn-1Sn alaşımına ait nominal bileşimin yer aldığı EDS alan analizi Şekil 3. 4'te gsterildiği gibidir. Alaşımı içindeki küçük ve köşeli Şekle sahip intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi Tablo 3. 5'te yer almaktadır. Metaller arası bu faz Mg, Y ve Sn elementlerini içerirken Tablo 3. 6'da nominal bileşimi verilen tane sınırlarında uzamış Şekilde bulunduğu düşünölen intermetalik faz Mg, Y ve Zn elementlerinden oluşmaktadır.



Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	96.7	0.2
39	Y	Yttrium	1.3	5.9
50	Sn	Tin	0.7	9.5
30	Zn	Zinc	1.3	11.9

Şekil 3. 4. *Mg-2Y-2Zn-1Sn alaşımının genel nominal bileşimini veren EDS analizi*

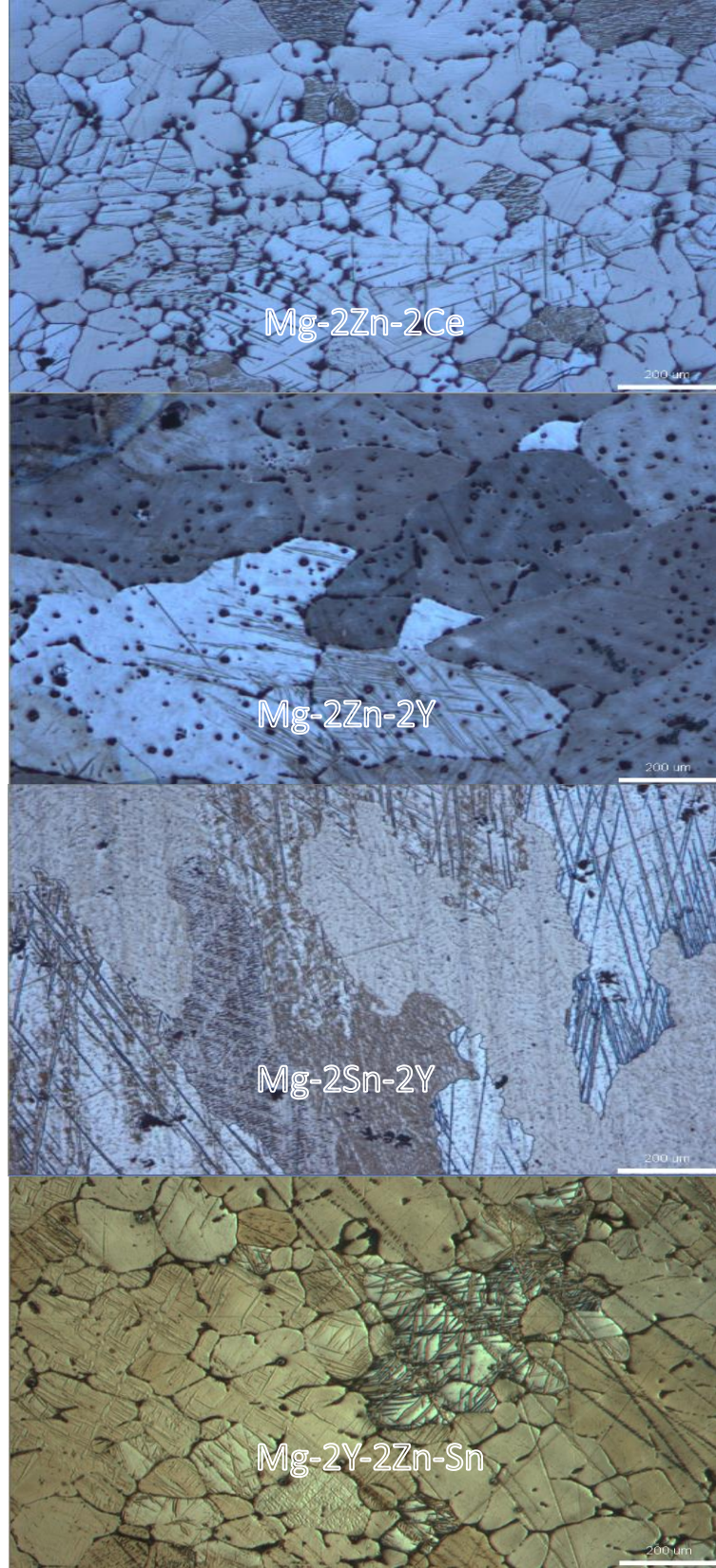
Tablo 3. 5. *Mg-2Y-2Zn-1Sn alaşımı içindeki küçük ve köşeli Şekle sahip intermetalik fazın bileşimini gsteren EDS analizi*

Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	82.2	0.4
39	Y	Yttrium	10.2	2.0
30	Zn	Zinc	7.7	4.2

Tablo 3. 6. *Mg-2Y-2Zn-1Sn alaşımı içindeki uzamış Şekle sahip intermetalik fazın bileşimini veren EDS nokta analizi*

Element Numarası	Element Sembolü	Element adı	Konsantrasyon	Hata
12	Mg	Magnesium	82.2	0.4
39	Y	Yttrium	10.2	2.0
30	Zn	Zinc	7.7	4.2

Görsel 3. 1’de elde edilen alaşımların ışık mikroskobu altındaki görüntüleri yer almaktadır. İlk olarak dikkat çeken husus yapıların içinde yer alan oksit inklüzyonlardır. Mikrosertlik ölçümleri için problem teşkil etmese de mekanik özellikleri olumsuz yönde etkileyecek ve alaşımların sahip olduğu potansiyelin altında değerler vermesine sebep olacak oksit inklüzyonları Çin’den sipariş edilen alaşımlarda ve daha fazla olmak kaydı ile laboratuvar ortamında hazırlanan alaşımın içinde görülebilmektedir. Magnezyum ergitme banyolarında inklüzyonlar diğer metallerdeki durumun tersine sıvıdan daha ağır oldukları için ergimiş metalde batmakta ve sıvı içinde konveksiyon hareketi yapmaktadır. Kısıtlı imkanlarla gerçekteştirilen çalışmada filtrasyon gibi pahalı yöntemler uygulanamadığı için çok sayıda inklüzyonlar katılaşan sıvı içerisinde hapsolmuştur. İkinci dikkat çeken nokta mikroyapılarda görülen tav ikizlenmeleridir. Alaşımların hepsinde tav ikizlerinin miktarı azımsanamayacak kadar çoktur. Tane sınırlarında yer alan intermetalik fazlar ise özellikle Mg-2Zn-2Ce alaşımında açıkça görülebilmektedir.



Görsel 3. 1 Alaşımların ışık mikroskobu görüntüleri

3.2. Sertlik ve Çekme Testleri

Bu bölümde alaşımların grafiklerdeki gösterimlerinde kolaylık sağlaması açısından alaşımlar aşağıda gösterildiği şekilde kısaltmalarla ifade edilmiştir:

- Mg-2Zn-2Ce: (ZC)
- Mg-2Zn-2Y: (ZY)
- Mg-2Y-2Sn: (YS)
- Mg-2Y-2Zn-Sn: (ZYS)

Tablo 3. 7'ye bakıldığında Brinell sertlik değerleri verilen alaşımlar içinden en yüksek sertliğe sahip olan alaşımın ana alaşımlardan biri olan Mg-2Zn-2Y alaşımı olduğu görülmektedir. Diğer iki ana alaşım ise laboratuvar koşullarında hazırlanan alaşımdan daha düşük sertlik değerleri vermiştir.

Tablo 3. 7. Alaşımların HB sertlik değerleri

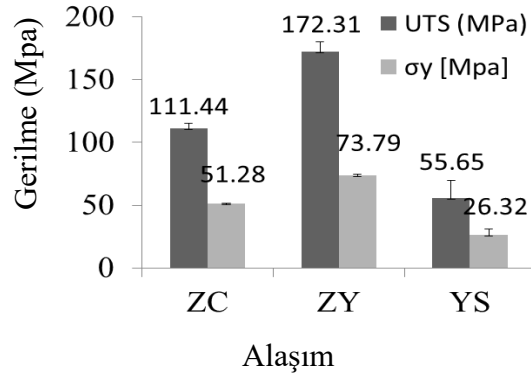
Alaşım	Ortalama HB
ZC	38.56
ZY	53.42
YS	32.20
ZYS	40.15

Çin'den sipariş edilen alaşımlara oda sıcaklığında çekme testleri uygulanabilmiştir. Fakat laboratuvar koşullarında hazırlanan alaşımın yapısındaki oksit inklüzyonların miktarının çok fazla olması sebebiyle bu alaşım oda sıcaklığında dikkate değer sonuçlar vermemiştir. Bu sebeple bu alaşımın yalnızca yüksek sıcaklıklarda (200°C ve 400°C) yapılan çekme testleri sonuçları mevcuttur. Alaşımlar yüksek sıcaklıklarda test edilerek hem sıcaklık etkisiyle hareketlenen farklı deformasyon sistemlerinin etkisi görülmek istenmiş, hem de yapıdaki inklüzyonların sıcaklık sayesinde sonuçlar üzerine etkisi azaltılmaya çalışılmıştır. Mg-2Zn-2Ce, Mg-2Zn-2Y, Mg-2Sn-2Y alaşımlarına oda sıcaklığında uygulanan çekme testlerinin akma dayanımı, UTS ve UTS'de uzama değerleri Tablo 3. 8'de verilmiştir. Akma dayanımı ve UTS değerleri karşılaştırılması ise

Şekil 3. 5'deki sütun grafiğinden açıkça görülebilir. Verilere göre oda sıcaklığında en yüksek akma mukavemeti ve UTS değerine sahip alaşım sertlik testinde de en iyi sonucu veren Mg-2Zn-2Y alaşımıdır. Sertlik testinde olduğu gibi en düşük mekanik özellikleri ise Mg-2Y-2Sn alaşımı göstermiştir. Mg-2Zn-2Y alaşımının oda sıcaklığındaki UTS'de % uzama miktarının Mg-2Zn-2Ce alaşımından daha yüksek olduğu elde edilen veriler arasındadır.

Tablo 3. 8. Oda sıcaklığında uygulanan çekme testi sonuçları

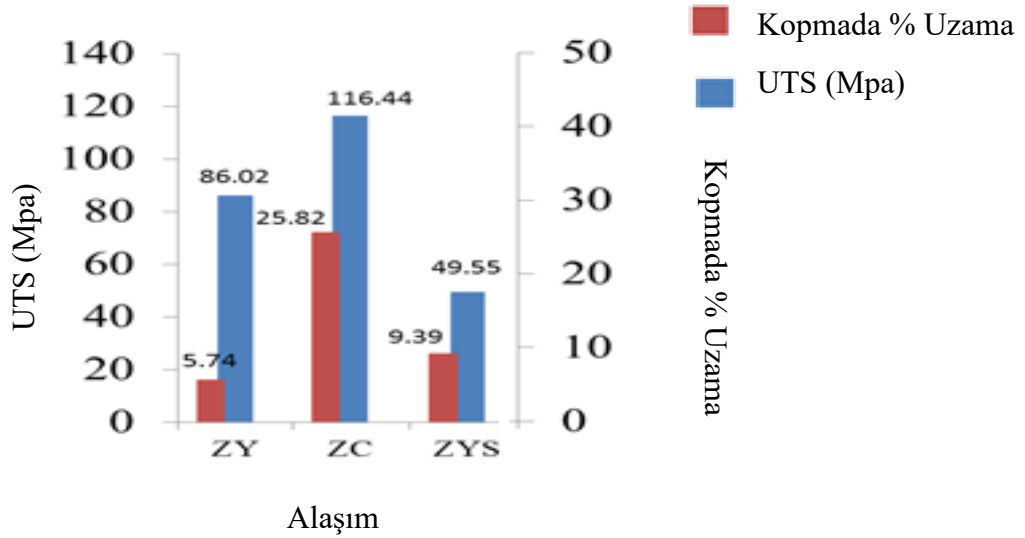
Alaşım	σ_y (Mpa)	UTS (Mpa)	UTS'de %Uzama
ZC	51.28	111.44	17.6
ZY	73.79	172.31	27.3
YS	26.32	55.65	8.6



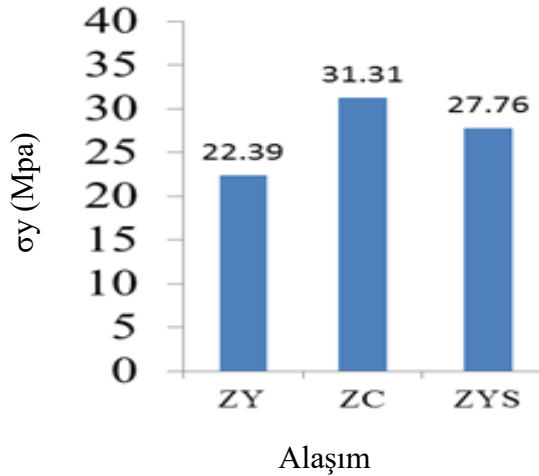
Şekil 3. 5. Alaşımın oda sıcaklığındaki akma dayanımı ve UTS değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi

Alaşımın 200°C'de yapılan çekme testlerinden elde edilen sonuçlar Şekil 3. 6 ve Şekil 3. 7'da sütun grafiklerinde karşılaştırmalı olarak gösterilmiştir. Bu aşamada uygulanan testlere o ana kadar en düşük değerleri göstermiş Mg-2Y-2Sn alaşımı dahil edilmemiştir. Laboratuvar koşullarında hazırlanan alaşımın test sonuçları akma dayanımı açısından ana alaşımından yüksek değer gösterirken, UTS değerleri ve kopmada % uzama miktarlarına bakıldığında Mg-2Zn-2Ce alaşımının oda sıcaklığında en yüksek kopma uzamasına sahip Mg-2Zn-2Y alaşımından daha yüksek veriler ortaya koyduğu

görülmektedir. Sıcaklığın magnezyumdaki deformasyon mekanizmalarını etkilediği literatürde sıklıkla belirtilmiştir. Mg-2Zn-2Ce alaşımının sergilediği bu durum da Ce elementinin yüksek sıcaklıklarda magnezyumun bazal olmayan mekanizmalarını harekete geçirerek deformasyon kapasitesini arttırdığı şeklinde yorumlanabilir. Ayrıca bu sıcaklıkta diğer alaşımlara kıyasla daha yüksek UTS değerine sahiptir.

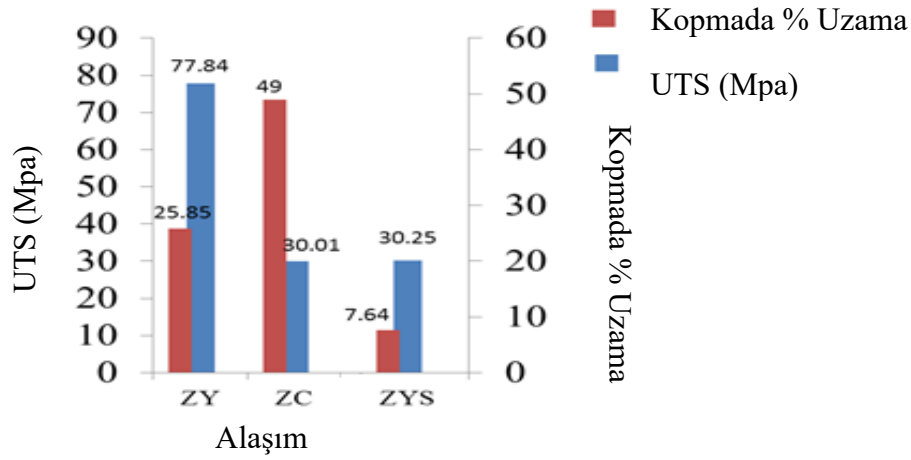


Şekil 3. 6. Alaşımların 200°C’de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı ve kopmada % uzama değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi

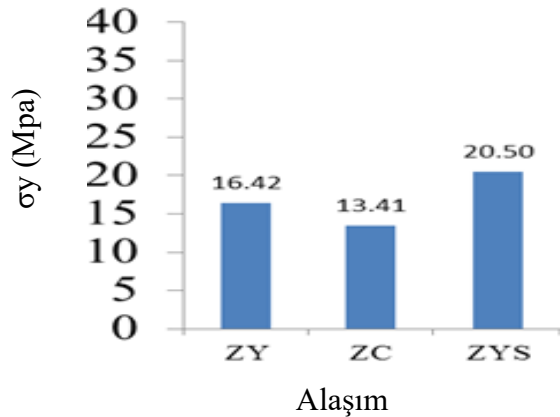


Şekil 3. 7. Alaşımların 200°C’de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi

Şekil 3. 8 ve Şekil 3. 9'de gösterilen 400°C sıcaklıkta yapılan çekme testleri sonuçlarına göre Mg-2Zn-2Ce alaşımının 200°C'de yapılan testlerde olduğu gibi kopmada % uzamada en yüksek uzama değerine ulaştığı görülmektedir. Laboratuvar koşullarında hazırlanan alaşım uzama açısından iyi sonuçlar sergilemese de akma dayanımı ana alaşımlardan yüksektir. Bu deneylerde dikkat çekebilecek diğer bir nokta ise Mg-2Zn-2Y alaşımının diğer alaşımlardan çok daha yüksek bir UTS değerine sahip olmasıdır.

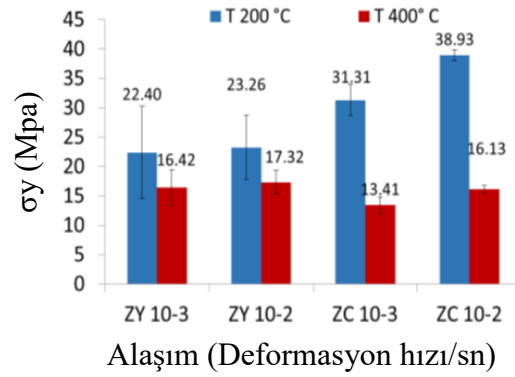


Şekil 3. 8. Alaşımların 400°C'de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı ve kopmada % uzama değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi

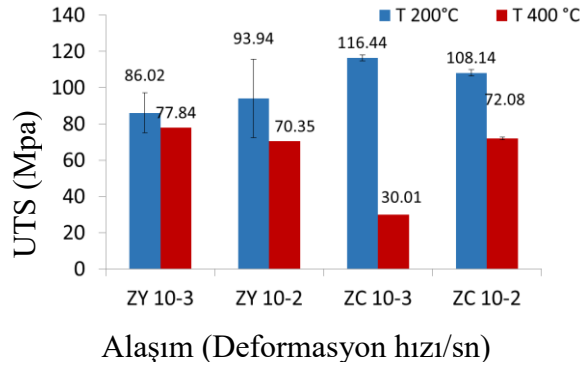


Şekil 3. 9. Alaşımların 400°C'de yapılan çekme testinden elde edilen akma dayanımı değerlerinin sütun grafiğiyle gösterimi

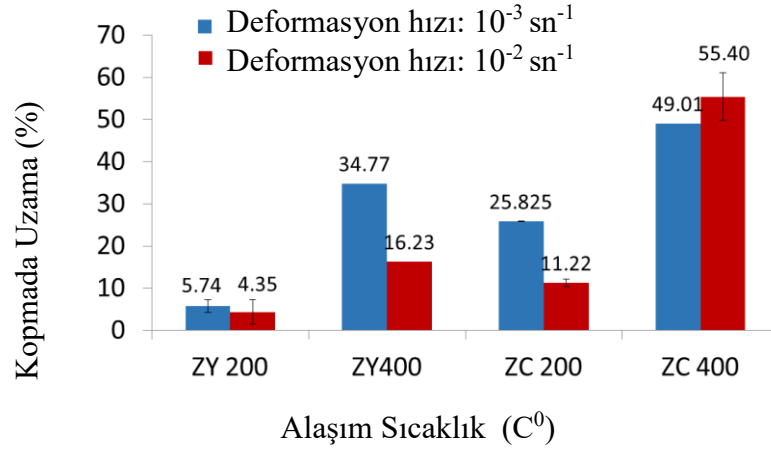
İncelenen alaşımlar içerisinde en iyi mekanik özellikleri sergileyen Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarına 200°C ve 400°C sıcaklıklarda deformasyon hızı 10^{-3} s^{-1} ile yapılan çekme testlerine ek olarak, deformasyon hızı 10^{-2} s^{-1} olan çekme testleri uygulanmıştır. Elde edilen sonuçların daha rahat kıyaslanabilmesi için veriler Şekil 3. 10, Şekil 3. 11 ve Şekil 3. 12 sütun grafikleriyle gösterilmiştir. Diğer testlerde de olduğu gibi Mg-2Zn-2Y alaşımının UTS değerleri Mg-2Zn-2Ce alaşımının değerlerinde yüksekken uzama ve akma dayanımları kıyaslandığında Mg-2Zn-2Ce alaşımını daha iyi sonuçlara sahiptir. Özellikle deformasyon kapasitesi yüksek magnezyum alaşımları geliştirmesinin hedeflendiği bu çalışmada, Mg-2Zn-2Y ve Mg-2Zn-2Ce alaşımları bu noktaya diğer alaşımlardan daha üstün özellikler sergiledikleri ve içerdikleri inklüzyonlar açısından kıyaslandıklarında diğer alaşımlardan daha iyi durumda oldukları için serbest şişme testinde bu alaşımların çalışmalarına yer verilmiştir.



Şekil 3. 10. Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarının iki farklı çekme hızı kullanılarak 200°C'de ve 400°C'de yapılmış çekme testlerinden elde edilen akma dayanımı sonuçlarının sütun grafiği ile gösterimi



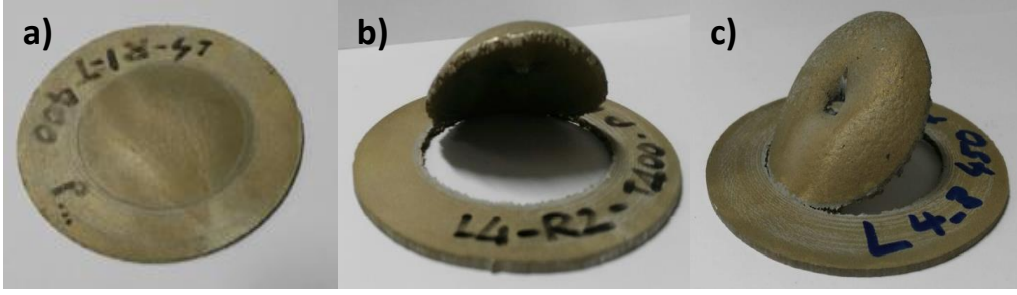
Şekil 3. 11. Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarının iki farklı çekme hızı kullanılarak 200°C'de ve 400°C'de yapılmış çekme testlerinden elde edilen UTS sonuçlarının sütun grafiği ile gösterimi



Şekil 3. 12. *Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarının iki farklı deformasyon hızıyla 200°C'de ve 400°C'de yapılan çekme testlerinden elde edilen kopmada % uzama değerlerinin sütun grafiği ile gösterimi*

3.3. Serbest Şişme Testi

Çekme testlerinden elde edilen sonuçlara göre deformasyon kapasiteleri diğer alaşımlara göre daha yüksek olduğu düşünülen Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarına serbest şişme testleri uygulanmıştır. Yapılan testlerden elde edilen Mg-2Zn-2Y alaşımına ait serbest şişme testi uygulanmış numune görüntüleri ve bu numunelere ait sonuçlar Görsel 3. 2'de yer almaktadır. 400°C'de gerçekleştirilen ilk testte basınç olarak 10bar kullanılmıştır fakat çok uzun süre beklenmesine rağmen numunede beklenen deformasyon ve kopma gerçekleşmediği için basınç 15bara yükseltilmiştir. Bu şekilde de bir sonuç alınamadığı için test yarıda kesilmiştir. Şekilde yer alan a numunesi bu testten elde edilen numunenin görüntüsüdür. Ardından aynı sıcaklıkta 16bar basınçla tekrarlanan testte numune kalıp başlangıç noktalarında ayrılmıştır. Sıcaklık artırılarak 450°C'de 16bar basınçla yapılan denemede numune aynı şekilde kopma göstermiş ve Mg-2Zn-2Y alaşımının serbest şişme testlerine devam edilmemiş bunun yerine yüksek sıcaklıklarda daha yüksek uzama değerlerine sahip Mg-2Zn-2Ce alaşımının testlerine geçilmiştir.



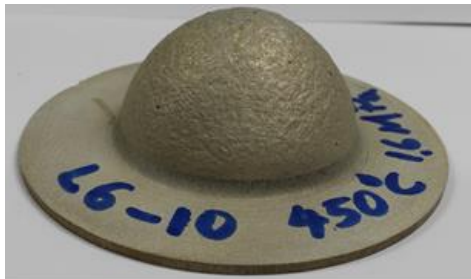
Görsel 3. 2. Mg-2Zn-2Y alaşımına ait serbest şişme testi numuneleri görüntüleri a) 400 °C sıcaklıkta 10bar-15 bar basınç ile şekillenmiş numune, b) 400 °C sıcaklıkta 16 bar basınç ile şekillenmiş numune, c) 450 °C derece sıcaklıkta 16 bar basınç ile şekillenmiş numune

Mg-2Zn-2Y alaşımına uygulanan serbest şişme testleriyle aynı sıcaklık ve basınç değerlerine karşılık gelen Mg-2Zn-2Ce alaşımının testlerine ait görüntüler elde edilen verileriyle birlikte Görsel 3. 3 ve Görsel 3. 4'te gösterilmiştir. Şekillerden ve verilerden anlaşılacağı üzere Mg-2Zn-2Ce alaşımı Mg-2Zn-2Y alaşımına kıyasla çok daha iyi deformasyon kapasitesine sahiptir.



T=400 °C
P=16 bar
Yük=25 kN
Kubbe yüksekliği = 19mm
Zaman:2450s

Görsel 3. 3. Mg-2Zn-2Ce alaşımının 450 °C 16 bar basınçta yapılan serbest şişme testi numunesi görüntüsü



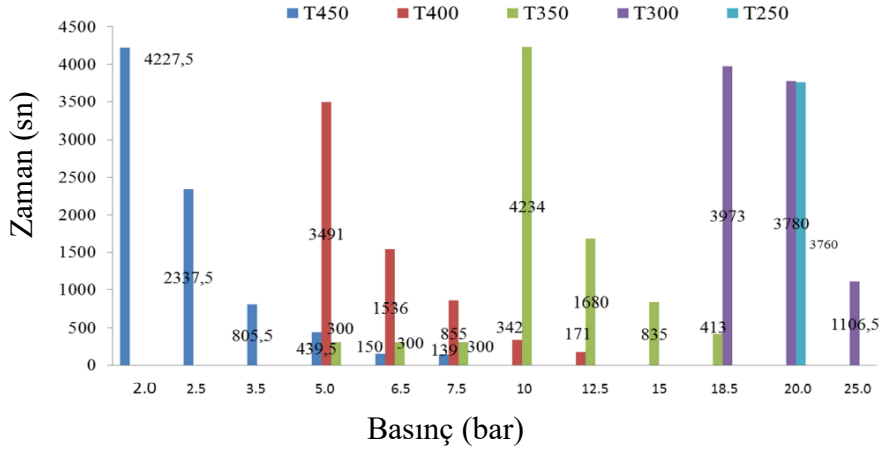
T=450 °C
p=16 bar
Yük= 20kN
Kubbe yüksekliği =24,00mm

Görsel 3. 4. Mg-2Zn-2Ce alaşımının 450 °C 16 bar basınçta yapılan serbest şişme testi numunesi görüntüsü

Yapılan testler sırasında Mg-2Zn-2Ce alaşımı içindeki inklüzyonlar ve döküm boşlukları Mg-2Zn-2Ce alaşımın potansiyel deformasyon kabiliyetinin daha altında değerler vermesine sebep olsa da, elde edilen bu veriler ışığında Mg-2Zn-2Ce alaşımına farklı sıcaklık ve basınç parametreleriyle yapılacak bir test tablosu oluşturulmuştur ve sırasıyla testler uygulanmıştır. Parametre tablosu testlerden elde edilen kubbe yüksekliği sonuçlarıyla birlikte Tablo 3. 9’da yer almaktadır. Kopma meydana gelene kadar geçen süreler ise Şekil 3. 13’te gösterilmiştir. Verilerden de görüldüğü üzere yüksek sıcaklık ve düşük basınçlarda kubbe yüksekliği en yüksek değerlerine ulaşmıştır. Buradaki en önemli noktalardan biri de üretim performansı düşünülecek olursa benzer kubbe yüksekliklerine ulaşmada geçen süredir. Bu açıdan bakıldığında 450°C sıcaklıkta yapılan deneylerde numunelerin kubbe yüksekliği değerlerinin en iyi seviyelere çıktığı görülmektedir. Bu sıcaklıkta numunelerin benzer kubbe yüksekliklerine sahip olmalarına rağmen geçen süreler incelendiğinde basıncın önemi görülmektedir. 3.5bar basınçta 805.5sn sürede 20.17mm kubbe yüksekliği elde edilirken, 2bar basınçta 20.95mm yüksekliğe 4227.5sn sürede ulaşılmıştır.

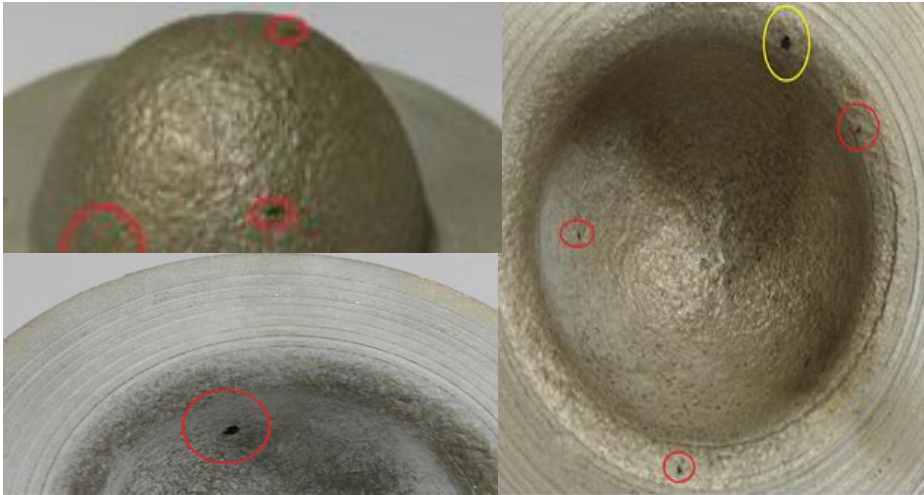
Tablo 3. 9. Mg-2Zn-2Ce alaşımına uygulanan serbest şişme testlerinin parametre tablosu ve bu parametrelere ait kubbe yüksekliği sonuçları

	p[bar]												
	25	20	18,5	15	12,5	10	7,5	6,5	5	3,5	2,5	2	
T[°C]													
250	9,42	6,09	6,24										
	10,46												
300	10,56	11,06	12,18										
	10,57		11,27										
350			11,78	12,49	12,56	12,85							
			13	11,25	12,17								
400					14,37	13,9	17,28	17,86	16,96				
					14,29	14,09	16,77	18,78	18,18				
450							18,9	16,54	20,09	19,42	19,97	20,91	
							17,17		19,37	20,17	20,25	20,95	



Şekil 3. 13. *Mg-2Zn-2Ce alaşımına uygulanan serbest şişme testlerine ait kopma meydana gelene kadar geçen sürelerinin sütun grafiği ile gösterimi*

Mg-2Zn-2Ce alaşımına yapılan serbest şişme testi numunelerinde özellikle yüksek sıcaklıklarda tane büyümesinden dolayı, literatürde portakallanma (orange peel effect) olarak adlandırılan görüntüler ortaya çıkmıştır. Bu yüzey görüntüsü tane irileşmesi nedeniyle ortaya çıkar. Buna ait görüntü örnekleri Görsel 3. 5'te gösterilmektedir. Numunelerin döküm yapısında olmaları sebebiyle yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen bu testlerde böyle bir yapının görülmesi normal bir durum olarak karşılanabilir. Şekilde yer alan diğer görüntüler ise döküm yapısındaki porozitelere aittir ve yuvarlak içine alınarak gösterilmiştir.



Görsel 3. 5. *Mg-2Zn-2Ce alaşımına yapılan serbest şişme testi deneyi numunelerinde görülen portakallanma (orange peel effect) ve porozite görüntüleri*

4.SONUÇ

Gerçekleştirilen çalışmada magnezyuma farklı kombinasyonlarla ilave edilen Zn, Ce, Y, Sn elementlerinin magnezyumun deformasyon kapasitesindeki etkileri incelenmiştir. 4 alaşım sistemiyle gerçekleştirilen çalışmada öncelikle sertlik testi ve çekme testi yapılmış, bu testlerden en iyi sonuçları veren Mg-2Zn-2Ce, Mg-2Zn-2Y alaşımlarına farklı sıcaklık ve deformasyon hızlarıyla ekstra çekme testleri uygulanarak alaşımların deformasyon davranışıyla ilgili bilgi elde edilmeye çalışılmıştır. Öncesinde yapılan ışık mikroskobu ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri göstermiştir ki sıcaklık dayanımının yüksek olduğu düşünülen ve tane sınırlarında oluşan çökelti partikülleri homojenizasyon sırasında tane büyümesine engel olarak tane küçültücü etki yaratmıştır. İlave edilen elementlerin matris içerisindeki çözünürlüklerinin değişimi yapıdaki çökelti partiküllerinin miktarını etkilemektedir. Söz konusu alaşımların tane yapılarına genel olarak bakıldığında zaman hepsinin kaba tane yapısına sahip ve dentritik yapıda olduğu görülmektedir. Alaşımların döküm yoluyla elde edildiği ve uzun süreli homojenizasyona maruz bırakıldığı düşünüldüğünde bu durum beklenen bir sonuçtur. Ergitme şartlarından kaynaklanan inklüzyonlar sebebiyle, alaşımların sahip oldukları potansiyelden çok daha düşük mekanik özellikler sergilendiklerini söylemek yanlış olmayacaktır. Yapılan çeşitli mekanik testler göstermiştir ki çok miktarda inklüzyon içerdiği için alaşımlar mekanik testler açısından çok iyi değerlere sahip olmasalar da sertlik değerleri açısından mukavemetleri saf magnezyumla kıyaslandığında iyi değerlere sahiptir.

Oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda yapılan çekme testleri sonuçları ışığında deformasyon kapasitesi açısından en iyi sonuçlara sahip olan Mg-2Zn-2Ce ve Mg-2Zn-2Y alaşımlarının deformasyon davranışı yüksek sıcaklıklarda, 400°C ve 450°C’de, yapılan serbest şişme testleriyle incelenmiştir. Mg-2Zn-2Y alaşımı serbest şişme testlerinde beklenildiği yönde yüksek kapasitede bir deformasyon davranışı göstermemiş ve şişme testi sırasında kalıp girişlerinden kopmalar meydana gelmiştir. Yüksek sıcaklık çekme testlerinde uzama açısından en yüksek sonuçları veren, mikroyapı özellikleri incelendiğinde tane sınırlarında en fazla çökelti partikülü bulduran ve diğer metallere kıyasla küçük tane yapısına sahip Mg-2Zn-2Ce alaşımı, yüksek sıcaklıklarda yapılan serbest şişme testlerinde, testleri olumsuz yönde etkileyecek inklüzyon içeriğine sahip olmasına rağmen son derece iyi bir deformasyon davranışı sergilemiştir. Dolayısıyla seryumlu alaşımların deformasyon kapasitesinin iyileşmesinde önemli bir potansiyele sahip olduğu vurgulanmalıdır.

Deformasyon kapasitesi yüksek çoklu alaşım sistemleri oluşturulması için kullanılan diğer element Sn elementidir. Bu elementle ilgili literatürde magnezyumun latis parametresini ve istif hatası enerjisini etkilediği belirtilirken [65], piramidal kayma sisteminin hareketlenmesini sağlayarak magnezyumun deformasyon kapasitesini artırdığı rapor edilmiştir [68],[69]. Yapılan çalışmada bu etkiyi sağlamak amacıyla Sn ilave edilen alaşımlarda ise beklenen etki elde edilememiştir. Fakat yapılan metalografik incelemelerde bu elementin bulunduğu alaşımlarda çok sayıda tav ikizlenmesi görülmüştür ve literatürde istif hatası enerjisinin düşmesiyle ikizlenmenin daha kolay gerçekleştiği [6] bilgisine dayanarak, çalışmanın bu sonucu doğruladığını belirtmek mümkündür.

KAYNAKÇA

- [1] Yang, Y., Wang, F., Tan, C., Wu, Y., Cai H. (2008). Plastic deformation mechanisms of AZ31 magnesium alloy under high strain rate compression. Transactions of Nonferrous Metals Society of China,18(5),1043-1046.
- [2] Hou, L., Wei, Y., Liu B., Xu, B. (2008). Microstructure evolution of AZ91D induced by high energy shot peening. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18(5),1053-1057.
- [3] Yang, L., Mori K. ve Tsuji, H. (2008). Deformation behaviors of magnesium alloy AZ31 sheet in cold deep drawing. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 18(1), 86-91.
- [4] Krebs, R. E. (2006).The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide(Second Edition). ABD:GreenWood Publishing group.
- [5] Mathaudhu, S. N., Luo, A. A., Neelameggham, N. R., Nyberg, E. A., Sillekens, W. H. (2014). Essential Readings In magnesium Technology. ABD: John Wiley & Sons.
- [6] Pekguleryuz , M. O., Kainer, K. U. ve Kaya, A. A. (2013). Fundamentals Of Magnesium Alloy Metallurgy. ABD:Woodhead Publishing.
- [7] Kainer, K. U. (2003). Magnesium Alloys and Technologies. Almanya:Wiley VCH
- [8] Friedrich, H. E. ve Mordike, B. L. (2006). Magnesium Technology Metallurgy, Design Data,Applications. Almanya: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [9] Gaines, L., Cuenca, R., Stodolsky, F., Wu, S. (1995). Potential Automotive Uses of Wrought Magnesium Alloys for Passenger Vehicles, Automotive Technology Development. Detroit, Michigan, 1-7.
- [10] Avedesian, M. M. ve Baker, H. (1999). Magnesium and Magnesium Alloys — ASM Speciality Handbook. Ohio :ASM International.
- [11] Zuberov, Z., Estrin, Y., Lamark, T.T., Janecek, M., Hellmig, R.J., Krieger, M. (2006).Effect of equal channel angular pressing on the deformation behaviour of magnesium alloy AZ31 under uniaxial compression. Journal of Materials Processing Technology, 184 (2007), 294–299.
- [12] ASM International. (1990). ASM Metals Handbook,Vol.2 Properties And Selection:Nonferrous Alloys And Special-Purpose Materials.(10th edn). USA:ASM International,Materials Park,OH.
- [13] Kim, B., Kang, B., Park Y., Park, I. (2011). Influence Of Pd Addition On The Creep Behavior Of AZ61 Magnesium Alloy. Materials Science and Engineering A,528(18), 5747–5753.

- [14] Blawert, C., Hort, N. and Kainer, K.U. (2004). Automotive Applications Of Magnesium and Its Alloys. *Trans Indian Inst Met*, 57(4), 397–408.
- [15] Eliezer, D., Aghion, E. and Froes, F.H. (1998). Magnesium Science and Technology. *Adv Mat Performance*, 5 ,201–212.
- [16] Kulekci, M. K. (2008). Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *Int J Adv Manuf Technol*, 39, 851–865.
- [17] Michalek, J.J., Papalambros, P.Y. and Skerlos, S.J. (2004). A Study Of Fuel Efficiency And Emission Policy Impact On Optimal Vehicle Design Decisions. *J Mech Des*, 126 (6), 1062–1070.
- [18] Aghion E., Bronfin B. and Eliezer D. (2001). The role of the magnesium industry in protecting the environment. *Journal of Materials Processing Technology*, 117(3), 381–385
- [19] Yoo, M.H., Morris, J.R., Ho, K.M. Agnew, S.R. (2002). Nonbasal Deformation Modes of HCP Metals and Alloys: Role of Dislocation Source and Mobility. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 33,(3), 813-822.
- [20] Ion, S.E., Humphreys, F.J. and White, S.H. (1982). Dynamic recrystallisation and the development of microstructure during the high temperature deformation of magnesium. *Acta Metallurgica*, 30,1909-1919.
- [21] Galiyev, A., Kaibyshev, R., and Gottstein, G. (2001). Correlation of plastic deformation and dynamic recrystallization in magnesium alloy ZK60. *Acta Materialia*, 49(7), 1199–1207.
- [22] Meyers, M., Vöhringer, O. and Lubarda, V. (2001). The onset of twinning in metals: a constitutive description. *Acta Mater*, 49 (19), 4025-4039.
- [23] Zhanng, J. And Joshi, S. (2012). Phenomenological crystal plasticity modeling and detailed micromechanical investigations of pure magnesium. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 60(5), 945–972 .
- [24] Von Mises and Angew, R. Z. (1928). *Math. Mech*, 6:85.
- [25] Yoo, M. H. (1981). Slip, Twinning, and Fracture in Hexagonal Close-Packed Metals. *Metallurgical Transactions*, vol12A, 409-418.
- [26] Roberts, C.S.(1960). Magnesium and its alloys. New York: Jon Wiley and Sons.
- [27] Kelley, E.W. and Hosford, W.F.J. (1968). Plane-strain compression of magnesium and magnesium alloy crystals. *Trans AIME*, 242 ,5-13.
- [28] Obara, T., Yoshinga, H. And Morozumi, S. (1973). { 11-22 } <-1-123> Slip System In Magnesium. *Acta Metallurgica*, 21, 845.

- [29] Lou, X. Y., Li, M., Boger, R. K., Agnew, S.R., Wagoner, R.H. (2007). . Hardening evolution of AZ31B Mg sheet. *International Journal of Plasticity*, 23 ,44-86.
- [30] Yoshinaga, H., Obara, T. and Morozumi, S. (1973). Twinning deformation in magnesium compressed along the c-axis. *Mater. Sci. Eng.*,12, 255-264.
- [31] Keshavarz, Z. and Barnett, M. R. (2006). EBSD analysis of deformation modes in Mg–3Al–1Zn. *Scripta Materialia*, 55, 915–918.
- [32] Barnetta, M.R. (2002). Taylor model based description of the proof stress of magnesium az31 during hot working. *Metallurgical And Materials Transactions A*, 34, 2003-1799.
- [33] Lentz, M., Risse, M., Schaefer, N., Reimers, W., Beyerlein I.J. (2016). Strength and ductility with {10-11} -{10-12} double twinning in a magnesium alloy. *Nature Communications*, DOI:10.1038/ ncomms11068.
- [34] Graff, S., Brooks, W., and Steglich, D. (2007). “Yielding of magnesium From the Single Crystal to Polycrystalline aggregates. *Int J. Plasticity*, 23,1957-1978.
- [35] Hosford, W.F. (1993). *The mechanics of crystals and textured polycrystals*. New York: Oxford University Press, 29 (4), 532.
- [36] Barnett, M.R. (2007) .Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part I: “Tension” twins. *Materials Science and Engineering A*, 464 (1-2), 1-7 .
- [37] Al-Samman T. and Gottstein G. (2008). Room temperature formability of a magnesium AZ31B alloy: examining the role of texture on the deformation mechanisms. *Materials Science and Engineering A*, 488, 406–14.
- [38] Barnett, M.R. (2007). Twinning and the ductility of magnesium alloys: Part II. “Contraction” twins. *Materials Science and Engineering A*, 464 (1-2), 8-16.
- [39] Hartt, W. H.and Reed-Hill, R. E. (1968). Internal deformation and fracture of second-order 1011–1012 twins in magnesium. *Trans. Metall. Soc. AIME*, 242, 1127-1133.
- [40] Wonsiewicz, B. C., Backofen, W. A., (1967). Plasticity of magnesium crystals. *Transactions of the metallurgical society of AIME* ,239, 1422-1431.
- [41] Hong S.G., Park, SH and Lee, C.S. (2010). Role of {1 0 -1 2} twinning characteristics in the deformation behavior of a polycrystalline magnesium alloy. *Acta Mater*, 58 (18), 5873–85.
- [42] Xin, R., Song, B., Zeng, K., Huang, G., Liu, Q. (2012). Effect of aging precipitation on mechanical anisotropy of an extruded Mg–Y–Nd alloy. *Mater Des*, 34, 384–8.

- [43] Wu, X., Yang, X., Ma, J., Huo, Q., Wang, J., Sun, H. (2013). Enhanced stretch formability and mechanical properties of a magnesium alloy processed by cold forging and subsequent annealing. *Mater Des*, 43,206–12.
- [44] QI, H., GUO, Y., TANG, X., XU, S. (2011). Atomistic simulation of the structural evolution in magnesium single crystal under c-axis tension. *Acta Metallurgica Sinica*, 24(6), 487-494.
- [45] Jiang., L, Jonas, J.J., Luo, A.A., Sachdev, A.K., Godet, S. (2007). Influence of {1 0 -1 2} extension twinning on the flow behavior of AZ31 Mg alloy. *Mater Sci Eng A*.;445–446:302–9.
- [46] Barnett, M.R., Keshavarz, Z., Beer, A.G., Atwell, D. (2004). Influence of grain size on the compressive deformation of wrought Mg–3Al–1Zn. *Acta Mater.* 52(17),5093–103.
- [47] Hosford, W.F. (2005). *Mechanical Behavior of Materials*. New York: Cambridge University Press.
- [48] Kim, W.J., Chung, S. W., Chung, C.S. and Kum, D. (2001). Superplasticity in thin magnesium alloy sheets and deformation mechanism maps for magnesium alloys at elevated temperatures. *Acta Materialia*.49,16, 20,3337–3345.
- [49] Pekguleryuz, M. O. and Baril,E. (2001). Creep Resistant Magnesium Diecasting Alloys Based on Alkaline Earth Elements. *Mater. Trans.* 42(7),1258.
- [50] Kim, Y. S. ve Ha T. K. (2016). Microstructure and Mechanical Properties of Mg-Zn Alloys. *World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*.10(2),177-180.
- [51] Clark, J.B., Zabdyr, L., Moser, Z., Nayeb-Hashemi, A.A., J.B. Clark (Eds.). (1988). *Phase Diagrams of Binary Magnesium Alloys*. ASM International, Metals Park, OH.
- [52] Li R G., Fang, D. Q., An J., Lu, Y., CAO Z. Y. ve Liu Y. B.(2009). Comparative studies on the microstructure evolution and fracture behavior between hot-rolled and as-cast Mg96ZnY3 alloys. *Materials Characterization*,60(6): 470–475.
- [53] Wang J., Gao S., Song, P., Huang, X., Shi Z. and Pan F.(2011). Effects of phase composition on the mechanical properties and damping capacities of as-extruded Mg–Zn–Y–Zr alloys. *Journal of Alloys and Compounds*. 509(34): 8567–8572.
- [54] Bae D.H., a , Kim, S.H. , Kim, D.H.and Kim, W.T. (2002). Deformation behavior of Mg–Zn–Y alloys reinforced by icosahedral quasicrystalline particles. *Acta Materialia*.50, 2343–2356.

- [55] Agnew S.R., Yoo, M.H. and Tome C.N. (2001). Application of texture simulation to understanding mechanical behavior of Mg and solid solution alloys containing Li or Y. *Acta Mater.* 49, 4277–4289.
- [56] Zhao, Z., Chen, Q., Wang, Y. and Shu, D.(2009). Microstructures and mechanical properties of AZ91D alloys with Y addition. *Mater. Sci. Eng. A* 515, 152–161.
- [57] Xu, D.K., Liu, L., Xu, Y.B., Han and E.H. (2007). Effect of microstructure and texture on the mechanical properties of the as-extruded Mg–Zn–Y–Zr alloys. *Mater. Sci. Eng. A* 443, 248–256.
- [58] Qif., Zhang, D., Zhang X., and Pan F. (2014). Effect of Y addition on microstructure and mechanical properties of Mg–Zn–Mn alloy. *Trans. Nonferrous Met. Soc.* 24,1352–1364.
- [59] Xua,D.K., Tang, W.N., Liu, L., Xu, Y.B. and Han, E.H. (2008). Effect of W-phase on the mechanical properties of as-cast Mg–Zn–Y–Zr alloys *Journal of Alloys and Compounds* 461, 248–252.
- [60] Lee, J., Kim D. H., Lim, H. K. and Kim, D. H.(2005). Effects of Zn/Y ratio on microstructure and mechanical properties of Mg-Zn-Y alloys. *Materials Letters.* 59,3801 – 3805.
- [61] Zhang,D., Qi, F., Lan, W., Shi, G., and Zhao,X.(2011). Effects of Ce addition on microstructure and mechanical properties of Mg-6Zn-1Mn alloy. *Trans.NonferrousMet.Soc.China.*21;703–710.
- [62] Hantzsche,K., Bohlen,J., Wendt, J. and Kainer ,K. (2010). Effect of rare earth additions on microstructure and texture development of magnesium alloy sheets.*Scr.Mater.*, 63725–730.
- [63] Le, Q., Zhang, Z., and Shao, Z.(2010). Microstructures and mechanical properties of Mg-2%Zn-0.4%RE alloys. *Trans. Nonferrous. Met. Soc. China;*20,352-356.
- [64] Kai-Yang, Z, Xiao-Dong, P, Wei-Dong, X. (2010). Effects of Ce on Microstructure of Semi-Continuously Cast Mg-1.5Zn-0.2Zr Magnesium Alloy Ingots. *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, 20, s324-330.
- [65] Raynor, G.V. (1942).The Lattice Spacings of the Primary Solid Solutions in Magnesium of the Metals of Group IIIB and of Tin and Lead. *Proc.R.Soc., A*(180)107–121.
- [66] Wei, S., Zhu, T., Hodgson, M. and Gao, W. (2012).Effects of lead addition on the microstructure and mechanical properties of as-cast Mg–4Zn alloys. *Mater.Sci.Eng. A*,550,199–205.
- [67] Wei, S., Zhu, T., Hou, H., Kim, J. H., Kobayashi, E., Sato, T., Hodgson, M., and Gao W. (2014). Effects ofPb/Sn additions on the age-hardening behaviour of Mg–4Zn alloys. *Materials Science&Engineering A*(597)52–61

- [68] Wang, H.Y, Zhang, N., Wang, C., Jiang, Q.C. (2011). First-principles study of the generalized stacking fault energy in Mg–3Al–3Sn alloy. *Scr. Mater.* 65, 723.
- [69] Wang, H.Y., Nan, X.L., Zhang, N., Wang, C., Wang, J.G., Jiang, Q.C. (2012). ‘Strong strain hardening ability in an as-cast Mg–3Al–3Sn alloy’, *Mater. Chem. Phys.* 132, 248–252.