

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE YAŞLANDIRMA
PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

**2015
YÜKSEK LİSANS TEZİ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ**

Alper İNCESU

**MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE
YAŞLANDIRMA PARAMETRELERİNİN ETKİSİ**

Alper İNCESU

**Karabük Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK
Ocak 2015**

Alper İNCESU tarafından hazırlanan "MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE YAŞLANDIRMA PARAMETRELERİNİN ETKİSİ" başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylım.

Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

Tez Danışmanı, Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

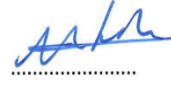


Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir. 14/01/2015


Unvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

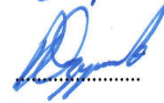
Başkan : Prof. Dr. İsmail ATILGAN (KBÜ)



Üye : Prof. Dr. Ali GÜNGÖR (KBÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



...../...../2015

KBÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu, bu tez ile, Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Mustafa BOZ

Fen Bilimleri 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.”

Alper İNCESU

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE YAŞLANDIRMA PARAMETRELERİNİN ETKİSİ

Alper İNCESU

Karabük Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

Ocak 2015, 80 sayfa

Bu çalışmada, farklı ısıtma koşullarının AZ63 magnezyum alaşımının mikroyapı, mikro sertlik, akma mukavemeti, çekme mukavemeti, uzama ve faz dağılımları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Ticari olarak üretilmiş olan AZ63 magnezyum alaşımına 400 °C'de 16 saat çözeltiye alındıktan sonra bir grup numune havada, diğer bir grup ise suda soğutulmuştur. Farklı ortamlarda soğutulan numuneler 3 farklı sıcaklık (160 °C, 190 °C ve 220 °C) ve 5 farklı sürede (1, 3, 6, 9 ve 12 saat) yapay yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işleminden sonra numuneler çekme testi, mikro sertlik ölçümleri, XRD, SEM ve EDX analizleri ile karakterize edilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda Mg₁₇Al₁₂ fazının çözeltiye alma ısıtma işlemi esnasında matris içinde neredeyse tamamen çözüldüğü anlaşılmıştır. Yaşlandırma sıcaklığı ve süresine bağlı olarak Mg₁₇Al₁₂ fazının tane sınırları ve tane içlerinde homojen olarak çökelmeye başladığı ve büyüdüğü görülmüştür. Değerlendirmelerin neticesinde çözeltiye almadan sonra hava veya suda soğutup 9 saat 190 °C'de yaşlandırılmış olan

numunelerde malzemenin döküm haline benzer sertlik ve uzama değerleriyle birlikte akma mukavemetinde yaklaşık %15'lik bir artış sağlanmıştır.

Anahtar Kelimeler : AZ63 magnezyum alaşımı, ısıtım işlemi, mikroyapı, yaşlandırma, mekanik özellikler.

Bilim Kodu : 915.1.092

ABSTRACT

M. Sc. Thesis

EFFECT OF AGING PARAMETERS ON MECHANICAL PROPERTIES OF MAGNESIUM ALLOYS

Alper İNCESU

Karabük University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Metallurgical and Materials Engineering Department

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Ali GÜNGÖR

January 2015, 80 pages

In this study, influence of different heat treatment conditions on microstructure, micro hardness, yield strength, ultimate tensile strength, elongation and phase distribution of AZ63 magnesium alloy were discussed. Commercially produced AZ63 magnesium alloy solution heat treated at 400 °C for 16 h. One group of specimen was air cooled, one group of specimen was water quenched. These specimens that were cooled by different medias were artificially aged at 3 different temperatures (160 °C, 190 °C, 220 °C) and for 5 different durations (1 h, 3 h, 6 h, 9 h, and 12 h). All specimens were characterized by tensile and micro hardness tests, SEM, EDX and XRD analyses, respectively. It was observed that after the solution treatment intermetallic phase of $Mg_{17}Al_{12}$ was dissolved almost totally in the matrix. During the aging $Mg_{17}Al_{12}$ phase precipitated in the grains and also on the grain boundaries homogeneously depends on the aging temperatures and times. As a result, it was determined that the specimens either air or water cooled and then aged at 190

⁰C for 9 h had similar hardness and elongation values but approximately 15% higher yield strength than the as cast AZ63 alloy.

Key Words : AZ63 magnesium alloy, heat treatment, microstructure, aging, mechanical properties.

Science Code : 915.1.092

TEŞEKKÜR

Bu tez alıőmasının planlanmasında, araőtırılmasında, yürütülmesinde ve oluşumunda ilgisini ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalıőmamı bilimsel temeller ışığında őekillendiren tez danıőmanım Prof. Dr. Ali GÜNGÖR'e sonsuz teőekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalıőmalardaki yardımlarından dolayı Arő. Gör. Yüksel AKINAY ve Arő. Gör. Fatih AYDIN'a da teşekkür ederim.

Sevgili aileme ve müstakbel eőime maddi manevi hiçbir yardımı benden esirgemedен yanımda oldukları için tüm kalbimle teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	4
MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI	4
2.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ.....	4
2.1.1. Magnezyum Alaşımlarının Uygulama Alanları.....	8
2.1.1.1. Otomotiv Uygulamaları	8
2.1.1.2. Uzay ve Havacılık Uygulamaları.....	9
2.1.1.3. Tıbbi Uygulamalar	11
2.1.1.4. Spor Malzemeleri Uygulamaları.....	12
2.1.1.5. Elektronik Uygulamaları.....	13
2.1.1.6. Diğer Uygulamalar.....	13
2.1.2. Magnezyum Alaşımlarının Kodlama Sistemi.....	14
2.2. ALAŞIM ELEMETLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ	16
2.2.1. Alüminyum.....	17
2.2.2. Berilyum	18
2.2.3. Kalsiyum.....	18
2.2.4. Bakır	18

	<u>Sayfa</u>
2.2.5. Nikel ve Demir	18
2.2.6. Lityum.....	18
2.2.7. Mangan	19
2.2.8. Nadir Toprak Elementleri	19
2.2.9. Silisyum	19
2.2.10. Gümüş.....	20
2.2.11. Toryum	20
2.2.12. Çinko.....	20
2.2.13. Zirkonyum	20
2.2.14. Kalay.....	21
2.2.15. İtiryum	21
2.2.16. Stronsiyum.....	21
2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ	21
2.3.1. Kum Kalıba Döküm.....	21
2.3.2. Kokil Döküm	23
2.3.3. Yüksek Basıncılı Döküm	24
2.3.4. Yarı Katı Metal Döküm	25
2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER.....	26
2.4.1. Tavlama	26
2.4.2. Gerilim Giderme	27
2.4.3. Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma.....	27
2.4.3.1. Mg-Al-Zn Alaşımalarında Çökelti Olayı.....	29
2.4.3.2. Çökeltilerin Kristalografisi	29
2.5. MAGNEZYUM ALÜMİNYUM ÇİNKO (Mg-Al-Zn) ALAŞIM SİSTEMİ	30
BÖLÜM 3	32
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	32
3.1. MALZEME	32
3.2. ISIL İŞLEM.....	33
3.3. TEST VE ANALİZ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	37
3.4. SEM İNCELEMELERİ.....	38
3.5. XRD ANALİZİ	39

	<u>Sayfa</u>
3.6. SERTLİK TESTİ.....	39
3.7. ÇEKME TESTİ.....	40
BÖLÜM 4.	41
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	41
4.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ.....	41
4.1.1. Çözeltiyeye Alma Isıl İşlemin Sonrası Oluşan Mikro Yapıların İncelenmesi.....	41
4.1.2. Suda Soğutulup 160 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi.....	42
4.1.3. Suda Soğutulup 190 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi.....	44
4.1.4. Suda Soğutulup 220 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi.....	45
4.1.5. Havada Soğutulup 160 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi.....	46
4.1.6. Havada Soğutulup 190 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi.....	48
4.1.7. Havada Soğutulup 220 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi.....	49
4.2. XRD ANALİZ SONUÇLARI.....	50
4.2.1. Çözeltiyeye Alma Isıl İşlemi Sonrası XRD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi.....	50
4.2.2. Suda Soğutulmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi.....	52
4.2.3. Havada Soğutulmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi.....	53
4.3. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI.....	54
4.3.1. Çözeltiyeye Alma İşleminde Sonraki Sertlik Değişimlerinin Karşılaştırılması.....	54
4.3.2. Suda Soğutulmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Sertlik Değişimlerinin Karşılaştırılması.....	55
4.3.3. Havada Soğutulmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Sertlik Değişimlerinin Karşılaştırılması.....	56
4.4. ÇEKME TESTİ SONUÇLARI.....	57
4.4.1. Çözeltiyeye Alma İşleminde Sonraki Mekanik Özellik Değişimlerinin Karşılaştırılması.....	57

	<u>Sayfa</u>
4.4.2. Suda Soğutma Sonrası Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mekanik Özellikleri	59
4.4.3. Havada Soğutma Sonrası Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mekanik Özellikleri	63
4.4.4. Çözeltiye Alma Isıl İşleminden Sonra Havada ve Suda Soğutmanın Aynı Sıcaklıkta Yapay Yaşlandırılmış Numunelerdeki Mekanik Özelliklere Etkisi	67
4.4.4.1. Akma Mukavemetine Etkisinin Karşılaştırılması	67
4.4.4.2. Çekme Mukavemetine Etkisinin Karşılaştırılması	69
4.4.4.3. Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzamaya Etkisinin Karşılaştırılması	71
BÖLÜM 5.	74
SONUÇLAR VE ÖNERİLER	74
KAYNAKLAR	76
ÖZGEÇMİŞ	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 1.1. Otomobil parçalarında magnezyumun çelik ve alüminyuma karşı sağladığı ağırlık kazançları	2
Şekil 2.1. Magnezyum kullanım alanları ve yıllara göre kullanım miktarındaki değişimler.....	5
Şekil 2.2. Magnezyumun sıkı paket hegzagonal kristal yapısı	6
Şekil 2.3. Magnezyum alaşımlarının kullanıldığı otomobil parçalarına örnekler.....	9
Şekil 2.4. Titan 1 Füzesi.....	10
Şekil 2.5. Magnezyum alaşımlarının spor alanlarındaki uygulamalarına örnekler..	12
Şekil 2.6. Magnezyum alaşımlarının kullanıldığı bazı elektronik cihazlar.....	13
Şekil 2.7. Bazı elementlerin magnezyum içindeki maksimum katı çözünürlükleri.	17
Şekil 2.8. Kum kalıbm şematik gösterimi.....	22
Şekil 2.9. Kokil dökümün şematik gösterimi.....	23
Şekil 2.10. Yüksek basınçlı dökümün şematik gösterimi	24
Şekil 2.11. Yarı katı metal döküm yönteminin şematik gösterimi.....	25
Şekil 2.12. Mg-Al-Zn alaşımlarına uygulanan ısıtılma Gerilim-Gerinim grafiği üzerindeki etkileri	28
Şekil 2.13. AZ91 magnezyum alaşımına ait SEM görüntüsü	30
Şekil 2.14. Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramının Mg zengin kesiti.....	31
Şekil 3.1. Hazırlanmış olan AZ63 magnezyum çubuklara örnek.....	32
Şekil 3.2. Al-Mg ikili faz diyagramı. Kırmızı çizgi çözeltiye alma sıcaklığını, mavi, yeşil ve sarı çizgiler ise sırası ile 160 °C, 190 °C ve 220 °C'deki yapay yaşlandırma sıcaklıklarını göstermektedir.....	33
Şekil 3.3. Çözeltiye alma ısıtılma işlemi başmaklarının şematik gösterimi.....	34
Şekil 3.4. Yapay yaşlandırma ısıtılma işlemi başmaklarının şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.5. Rampa kontrollü Magmatherm MT1220 (1200 °C, 5 Litre) yüksek sıcaklık laboratuvar fırını.....	35
Şekil 3.6. Zımpara ve parlatma işlemlerinin yapıldığı düzenek	37
Şekil 3.7. Çekme testi numunesi ve ölçüleri	38

Şekil 3.8. Mikro yapı görüntülerinin alındığı SEM cihazı.....	38
Şekil 3.9. Deneysel çalışmalarda kullanılan XRD cihazı	39
Şekil 3.10. Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikro sertlik test cihazı	40
Şekil 3.11. Deneysel çalışmalarda kullanılan çekme test cihazının görüntüsü.....	40
Şekil 4.1. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ile çözeltiye alma ısıl işleminden sonraki mikro yapıları	41
Şekil 4.2. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutulup 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları.....	43
Şekil 4.3. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutulup 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları.....	44
Şekil 4.4. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutulup 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları.....	45
Şekil 4.5. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra havada soğutulup 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları	47
Şekil 4.6. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra havada soğutulup 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları	48
Şekil 4.7. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra havada soğutulup 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları	49
Şekil 4.8. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ile çözeltiye alma ısıl işleminden sonrası havada ve suda soğutulmuş numunelerin karşılaştırmalı XRD analiz sonuçları	51
Şekil 4.9. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulmuş olan numunelerini 160, 190 ve 220 °C’lerde 6’ar saat yapay yaşlandırılmış olan numunelere ait karşılaştırmalı XRD analiz sonuçları	52
Şekil 4.10. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulmuş olan numunelerini 160, 190 ve 220 °C’lerde 6’ar saat yapay yaşlandırılmış olan numunelere ait karşılaştırmalı XRD analiz sonuçları	53
Şekil 4.11. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ile çözeltiye almadan sonra farklı şekillerde soğutulması sonucu elde edilen sertlik değerleri.....	54
Şekil 4.12. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulan, farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde yapay yaşlandırılmış olan numunelerin sertlik değişimleri	55
Şekil 4.13. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulan farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde yapay yaşlandırılmış olan numunelerin sertlik değişimleri.....	56
Şekil 4.14. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ve çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada ve suda soğutulmuş numunelere ait karşılaştırmalı Gerilim-Uzama grafiği.....	58

Şekil 4.15. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutup 160 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.....	59
Şekil 4.16. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulduktan sonra 190 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.....	61
Şekil 4.17. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulduktan sonra 220 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.....	62
Şekil 4.18. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 160 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.....	64
Şekil 4.19. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 190 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.....	65
Şekil 4.20. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 220 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.....	66
Şekil 4.21. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı akma mukavemetinin yaşlandırma süresi bazlı değişim grafiği	68
Şekil 4.22. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı akma mukavemetinin yaşlandırma süresi bazlı değişim grafiği	68
Şekil 4.23. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı akma mukavemetinin yaşlandırma süresi bazlı değişim grafiği	69
Şekil 4.24. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi bazlı değişim grafiği	70
Şekil 4.25. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi bazlı değişim grafiği	70
Şekil 4.26. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı çekme mukavemetinin yaşlandırma süresi bazlı değişim grafiği	71
Şekil 4.27. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı maksimum yük altındaki toplam uzamanın yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.....	72
Şekil 4.28. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı maksimum yük altındaki toplam uzamanın yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği	72

Şekil 4.29. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı maksimum yük altındaki toplam uzamanın yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği 73

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Magnezyumun fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri.....	6
Çizelge 2.2. İnsan kemiği ve bazı implant malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.....	11
Çizelge 2.3. ASTM sistemine göre magnezyum alaşımlarını ifade eden kod sisteminin açıklaması.....	14
Çizelge 2.4. Kullanılan alaşım elementleri ve elementi ifade eden simgeler	15
Çizelge 2.5. Magnezyuma uygulanabilen işlemler ve işlemleri ifade eden simgeler	15
Çizelge 2.6. Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemleri ifade eden simgeler ve açıklamaları	26
Çizelge 2.7. Bazı magnezyum döküm ve dövme alaşımları için tavsiye edilen çözeltiye alma ve yaşlandırma parametreleri.....	28
Çizelge 3.1. Çalışılmış olan AZ63 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi.	32
Çizelge 3.2. Numunelere gördükleri işlemlere göre verilen kodlar ve açıklamaları..	36
Çizelge 3.3. Nital ve asidik pikralin kimyasal bileşimi	38
Çizelge 4.1. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ve çözeltiye alma ısıt işleminin ardından havada ve suda soğutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi	58
Çizelge 4.2. Çözeltiye alma ısıt işleminin ardından suda soğutup 160 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi	60
Çizelge 4.3. Çözeltiye alma ısıt işleminin ardından suda soğutup 190 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi	61
Çizelge 4.4. Çözeltiye alma ısıt işleminin ardından suda soğutup 220 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi	63
Çizelge 4.5. Çözeltiye alma ısıt işleminin ardından havada soğutup 160 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi	64
Çizelge 4.6. Çözeltiye alma ısıt işleminin ardından havada soğutup 190 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi	65
Çizelge 4.7. Çözeltiye alma ısıt işleminin ardından havada soğutup 220 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi	67

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

- Mg : Magnezyum
Al : Alüminyum
Zn : Çinko
W : Tungsten
Fe : Demir
Mn : Manganez
Si : Silisyum
N : Newton
HV : Hardness Vickers

KISALTMALAR

- SEM : Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
EDS : Electron Diffraction Scanning (Elektron Difraksiyon Taraması)
XRD : X-Ray Diffractometer (X-ışını Difraktometresi)
ASTM : American Society for Testing and Materials (Amerika Malzeme Testleri Birliği)
TS : Türk Standartları
EN : European Norms (Avrupa Normları)
ISO : International Organization for Standardization (Uluslararası Standardizasyon Örgütü)

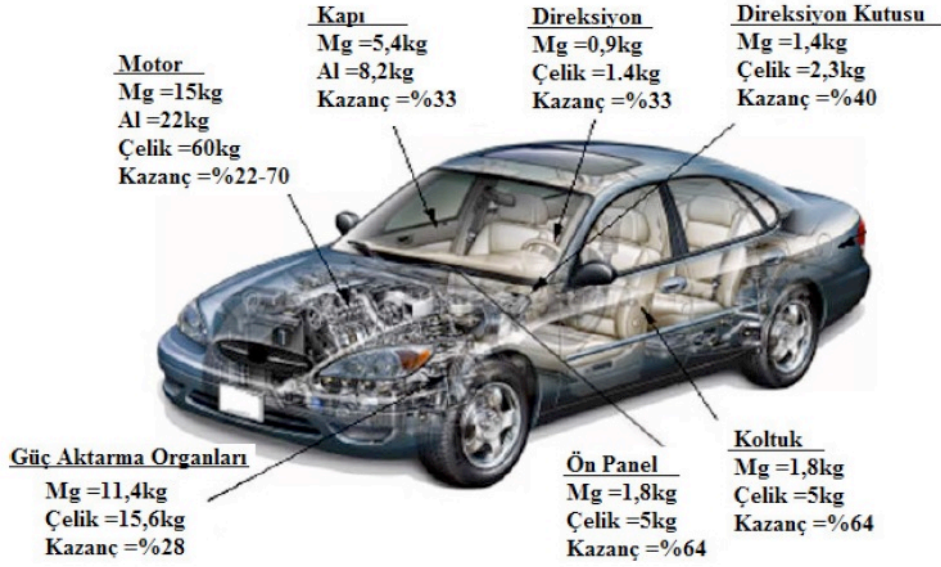
BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünyada meydana gelen sanayi devriminin ardından hızla ilerleyen teknoloji insanların hayatlarını kolaylaştırıp yaşam seviyelerini yükseltirken beraberinde de bazı olumsuzlukları getirmiştir. Özellikle son yüzyılda hızlanan insan nüfusundaki artış ile birlikte tüketim maddelerine duyulan talepte artmıştır. Bu tüketimi karşılayabilmek için de doğayı ve dünyayı koruyacak tedbirler düşünülmeden en hızlı şekilde üretim yapılmıştır. Modernleşmenin bir sonucu olarak ortaya çıkan egzoz gazı ve diğer zararlı gazların salınımı her geçen gün artarak atmosferimizi ve dünyamızı tehdit eder hale gelmiştir. Dünyamızı daha yaşanılabilir bir yer haline getirmek için zararlı atık gaz salınımlarını minimize etmemiz gerekir. Otomobiller zararlı gaz salınımının başlıca kaynakları olduğu için, ağırlıklarını düşürmek suretiyle gaz salınımının azaltılması doğrultusunda dünya çapında yoğun çalışmalar yapılmaktadır [1,2].

Otomobiller başta olmak üzere günlük yaşamda en yaygın olarak kullanılan yapısal metaller; demir ($7,86 \text{ gr/cm}^3$) ve alüminyumdur ($2,7 \text{ gr/cm}^3$). Fakat magnezyum ($1,74 \text{ gr/cm}^3$) en düşük yoğunluğa sahip yapısal metal olarak şu ana kadar yaygın olarak kullanılan demir ve alüminyuma alternatif olarak görülmektedir.

Basit bir hesapla demirden yapılan bir parçanın magnezyumla yapılması sonucu %77, alüminyumdan yapılan bir parçanın magnezyumla yapılması neticesinde %35'lik bir ağırlık kazancı sağlanacağı söylenebilir [1]. Şekil 1.1'de bir otomobil üzerindeki başlıca parçalar ve magnezyumun kullanılması neticesinde meydana gelen ağırlık kazanımları gösterilmiştir [2]. Şekil 1.1'de görüldüğü üzere meydana gelen bu ağırlık kazançlarının 100 kg ulaşmasıyla hem 100 km'de yaklaşık 0,5 litrelik bir yakıt tasarruf sağlanacak hem de atmosfere salınan egzoz gazlarında da azalma olacaktır [3].



Şekil 1.1. Otomobil parçalarında magnezyumun çelik ve alüminyuma karşı sağladığı ağırlık kazançları [2].

Bu üç yapısal metalin elastik modülü, akma dayanımı ve kopma dayanımı gibi mekanik özellikler bakımından kıyaslayacak olursak magnezyumun alüminyum ve çeliğe göre çok daha zayıf olduğu görülmektedir. Ancak bu değerlerin metallerin yoğunluklarına bölünmesi neticesinde elde edilen öz elastik modülü, öz akma dayanımı, öz kopma dayanımı değerlerinde ise magnezyumun çelik ve alüminyum ile karşılaştırılabilir kapasitede olduğu gözlenmektedir [4].

Magnezyumun demir ve alüminyuma alternatif olabilmesi için bahsi geçen mekanik özelliklerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu özelliklerinin geliştirilebilmesi için farklı yöntemler kullanılabilir. Bunlar; alaşımlandırma, ısıl işlem, termomekanik işlem ve farklı üretim yöntemlerinin kullanılmasıdır.

Bu çalışmada farklı ısıl işlem koşullarının AZ63 magnezyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisi incelenip, uygun bir ısıl işlem koşulu belirlenmesi ve bu belirlenen ısıl işlem koşulu neticesinde demir ve alüminyuma alternatif olabilecek mekanik özelliklerin elde edilip edilemediğinin tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Ticari olarak üretilmiş AZ63 magnezyum alaşımları 400 °C’de 16 saat çözeltiye alma ısıl işlemi uygulandıktan sonra bir grup numune havada, diğer bir grup ise suda soğutulmuştur. Havada ve suda soğutulan numuneler 3 farklı sıcaklıkta (160 °C, 190 °C ve 220 °C) ve 5 farklı sürede (1, 3, 6, 9 ve 12 saat) yapay yaşlandırılmıştır. Yaşlandırma işleminden sonra numuneler çekme testi, mikro sertlik ölçümleri, XRD, SEM ve EDX analizleri ile karakterize edilmiştir. Yapılan çalışmalardan çözeltiye alma ısıl işlemi sonrasında $Mg_{17}Al_{12}$ fazının matris içinde neredeyse tamamen çözüldüğü anlaşılmıştır. Yaşlandırma işlemlerinde yaşlandırma sıcaklığı ve süresine bağlı olarak $Mg_{17}Al_{12}$ fazının tane sınırları ve tane içlerinde homojen olarak çökmeye başladığı ve büyüdüğü görülmüştür. Değerlendirmelerin neticesinde çözeltiye alma ısıl işleminden sonra hava veya suda soğutup 9 saat 190 °C’de yaşlandırılmış olan numunelerin mekanik özellikleri malzemenin döküm halindeki özellikleriyle karşılaştırıldığında akma mukavemetinde yaklaşık %15’lik bir artış olduğu buna karşılık sertlik ve uzama değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı belirlenmiştir.

BÖLÜM 2

MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARI

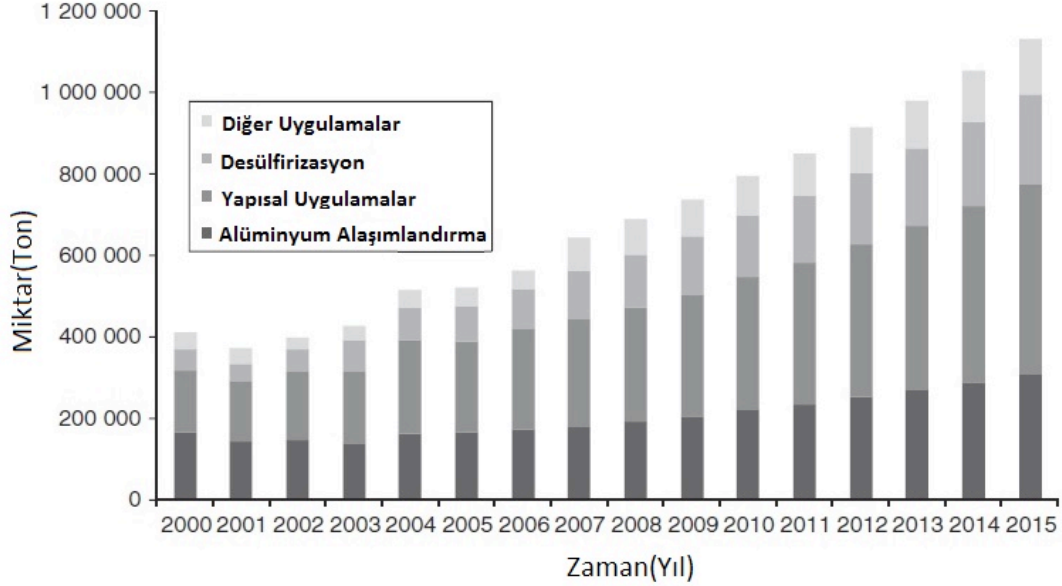
2.1. MAGNEZYUM VE ALAŞIMLARININ GENEL ÖZELLİKLERİ

Magnezyum ve alaşımlarının genel özelliklerine değinmeden önce magnezyum metalinin üretimindeki kilometre taşı olarak ifade edilebilecek tarihi gelişmeler şu şekilde özetlenebilir.1808'de Humphrey Davy ilk kez magnezyanın magnezyum metalinin oksidi olduğunu keşfetti. 1828'de Antoine-Alexander Bussy magnezyum metalini arı olarak elde etti. J. Von Liebling ve Michael Faraday 1833'de klorürden magnezyum metalini elektrolitik indirgenme yöntemi ile ürettiler. 1860'da Johnson Matthey ve ortakları Deville-Caron yöntemi ile magnezyum metalini ticari olarak üretmeye başladılar [5]. 1868'de magnezyum işaret fişeği ve alüminyum üretiminde indirgeyici element olarak kullanıldı [6].

1900'lerde dünya genelinde magnezyum üretimi yılda sadece 10 tondu. Magnezyumun askeriye, havacılık ve otomobil sektörlerinde kullanılmaya başlaması ile birlikte 1939'da yıllık üretim 32000 tona kadar çıktı.1990 yılında ise dünyanın batı kesimindeki yıllık üretim miktarı 250000 tona ulaştı [7]. Gümümüzde, dünyada magnezyum üretiminin yaklaşık %80'ini Çin karşılamaktadır. 2010 yılı verilerine göre ise magnezyum üretimi yıllık 950000 ton seviyelerindedir [8].

US Geological Survey verilerine göre saf magnezyum öncelikli olarak %41'lik bir oran ile paketlenme, ulaşım ve diğer uygulamalarda kullanılan alüminyum esaslı malzemelerin alaşımlandırılmasında kullanılmaktadır [9]. Ayrıca 2010 yılındaki verilere göre magnezyumun yapısal uygulamaları (döküm parçaları ve işlenmiş ürünleri) ise yaklaşık %32'lik bir oran ile yer almaktadır. %13'lük bir oran ile demir ve çeliğin desülfirizasyonunda ve kalan %14'lük oran ise diğer uygulamalar için kullanılmaktadır. Şekil 2.1'de 21. yüzyılın başından itibaren magnezyumun kullanım

alanları ve kullanım miktarındaki değişimleri ve 2015'teki yaklaşık tahmini alanları ve miktarları belirtmektedir [10].

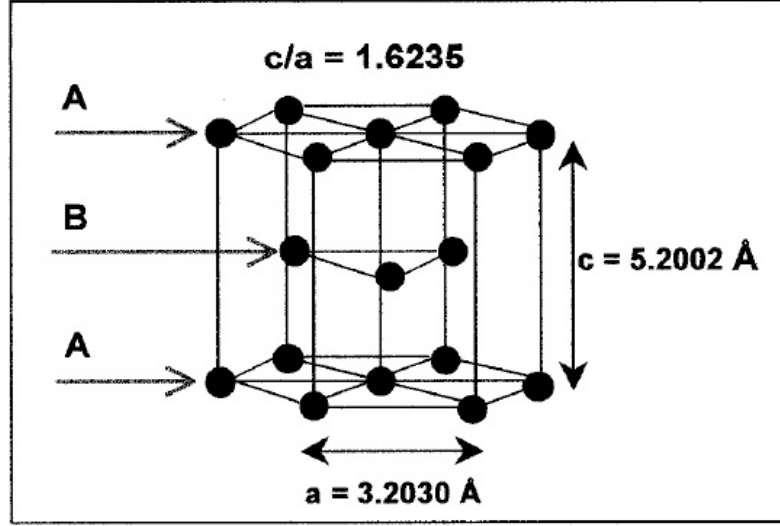


Şekil 2.1. Magnezyum kullanım alanları ve yıllara göre kullanım miktarındaki değişimler [10].

Magnezyum periyodik cetvelin IIA grubunda yer alan toprak alkali metallere aittir. Magnezyum, dünya yüzeyinde en çok bulunan sekizinci elementtir. Ayrıca alüminyum ve demirden sonra yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü metaldir [11].

Magnezyum sıkı paket hegzagonal (SPH) kristal yapıya sahiptir (Şekil 2.2) ve bu nedenle soğuk şekillendirmeye elverişli değildir. 225 °C'nin altındaki şekillendirme işlemlerinde sadece tek kayma düzleminin olması nedeniyle magnezyum kırılmalıdır [12]. Birçok magnezyum alaşımı çok iyi işlenebilirlik ve dökülebilirlik özelliğine sahiptir. Döküm, dövme ve enjeksiyon gibi yöntemler ile üretilen malzemeler, asal gaz ortamlarında kolaylıkla işlenebilir ve kaynak edilebilirler. Magnezyum alaşımlarının diğer önemli özelliği ise, ses ve titreşimi absorbe edebilmesidir. Bu özelliği ile magnezyum kullanıldığı makinelerin ve makina parçalarının ömrü artmaktadır. Saf magnezyumun dökme demire göre çok daha yüksek titreşim sönümleyici özelliği vardır [13]. Böyle mükemmel özelliklerinin yanında, magnezyum alaşımlarının kullanımında bazı sınırlılıklar da vardır. Magnezyumun

yanmaya karşı yüksek reaktif özelliğinin yanında, düşük korozyon direnci bunlardan bazılarıdır [14].



Şekil 2.2. Magnezyumun sıkı paket hegzagonal kristal yapısı [7].

Saf magnezyumun fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Magnezyumun fiziksel, kimyasal ve elektriksel özellikleri [6,15].

Özellik	Değer	Birim	Not
Element Simgesi	Mg		
Element Sınıfı	Toprak Alkali Metal		
Atom Numarası	12		
Kristal yapı	Sıkı Paket Hegzagonal a= 0,32092 b=0,52105	nm nm	20 °C
Atom Hacmi	13,97	cm ³ /mol	
Atom Ağırlığı	24.3050(6)		
Atom Yarıçapı	0.160	nm	
İyon Yarıçapı	0.072	nm	
Burger Vektörü	0,321	nm	
Katı Haldeki Yoğunluğu	1,738 1.650	g/cm ³ g/cm ³	20 °C 650 °C
Katılma Esnasındaki Hacim Değişimi	4,2 hacimsel 1,5 düzlemsel	% %	

Çizelge 2.1. (devam ediyor).

Soğuma Esnasındaki Hacim Değişimi	5 hacimsel 1,7 düzlemsel	% %	650 °C'den 20 °C'ye soğuma esnasında
Elastikiyet Modülü	45	GPa	
0,2% Akma Mukavemeti	21	MPa	
Çekme Mukavemeti	80-180	MPa	
Kopmaya Kadarki Uzama	1-12	%	
Sertlik	30-47	HB	
Poisson Oranı	0,35		
Viskosite(Akmazlık)	1,23	mPa.s	650 °C
	1,13	mPa.s	700 °C
Yüzey Gerilimi	0,56	N/m	650 °C
Katı-Sıvı Arayüzeyi Serbest Enerjisi(γ_{SL})	0,115	J/m ²	650 °C
Elektriksel Direnç	45,3	n Ω m	a ekseni
	37,8	n Ω m	c ekseni
Ergime Noktası	650 ± 1	°C	
Kaynama Noktası	1090	°C	
İsısal Genleşme	26,1	μ m/°C	20-100 °C
	29,9	μ m/°C	20-500 °C
İsısal İletkenlik (Katı Halde)	156	W/m.K	27 °C
	149	W/m.K	327 °C
	130	W/m.K	650 °C
İsısal İletkenlik (Sıvı Halde)	78	W/m.K	650 °C
Erime Gizil Isısı/Mol	8,954	kJ/mol	
Erime Gizil Isısı/Birim Hacim	5,9	J/m ³	
Buharlaşma Isısı	127,4	kJ/mol	
Isı Kapasitesi	1,025	kJ/kg.K	20 °C
Kafes Difüzyonu	$D_{oL} = 1,0 \times 10^{-4}$	m ² /s	
	$Q_L = 135$	kJ/mol	
Tane Sınırı Difüzyonu	$\delta D_{ob} = 5,0 \times 10^{-12}$	m ³ /s	
	$Q_b = 92$	kJ/mol	
Çekirdek Difüzyonu	$a_c D_{oc} = 3,0 \times 10^{-23}$	m ⁴ /s	
	$Q_c = 92$	kJ/mol	
Buhar Basıncı (650 °C)	360	Pa	

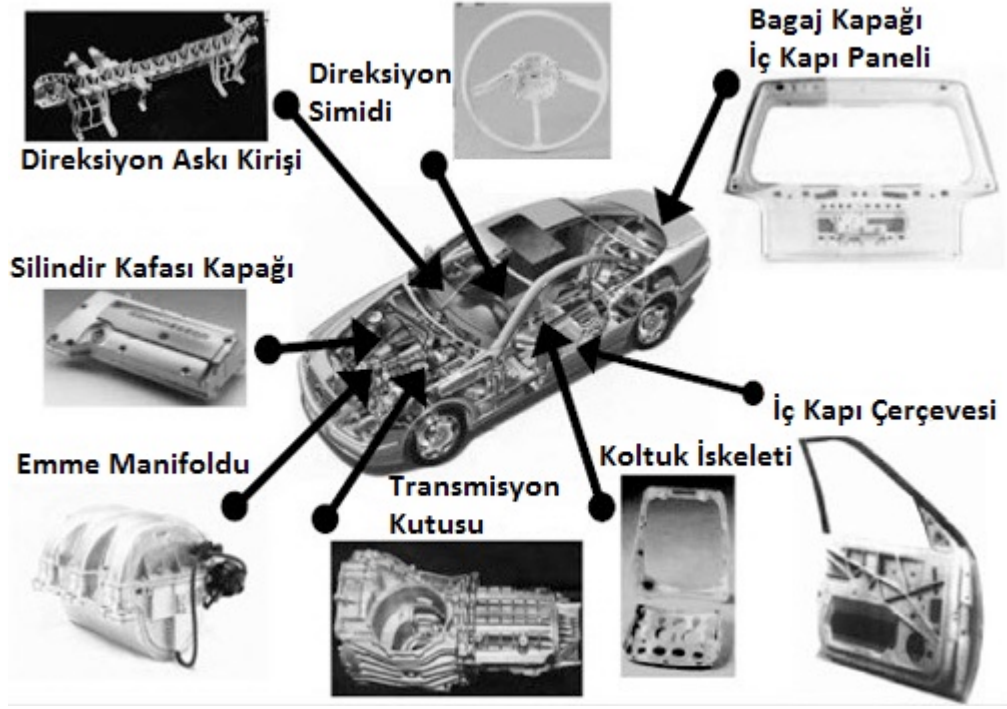
2.1.1. Magnezyum Alaşımlarının Uygulama Alanları

2.1.1.1. Otomotiv Uygulamaları

1920'lerde magnezyumdan üretilen parçalar yarış otomobillerinde kullanılmaya başlamıştır. Buna rağmen magnezyumdan üretilen parçaların Volkswagen (VW) Beetle gibi ticari üretimi yapılan araçlarda da kullanılması 1930'ları bulmuştur. VW Beetle'da şanzıman ve kartelde olmak üzere yaklaşık 20 kg Mg alaşımı kullanılmıştır.

Son yıllarda otomotiv endüstrisi üzerinde daha hafif, yüksek yakıt tasarrufu sağlayan ve yüksek performans gösteren araçlar üretmesi konusunda çevresel ve yasal baskılar nedeniyle, magnezyumun alaşımları ulaşım araçlarında da yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Geleneksel olarak geniş bir kullanım alanına sahip olan çelikten üretilmiş otomobil parçaları yerine magnezyum alaşımları, alüminyum alaşımları ve metal matrisli kompozitlerden üretilen parçalar kullanılmaya başlanmıştır. Öncü olarak kabul edilen Audi, Volkswagen, Daimler Chrysler (Mercedes-Benz), Toyota, Ford, BMW, Jaguar, Fiat, Hyundai ve Kia Motors Corporation gibi firmalar otomobil parçalarının üretiminde magnezyum alaşımlarını [15]. Şekil 2.3'te magnezyum alaşımlarından üretilen bazı otomobil parçaları örnekler verilmiştir.

VW Passat ve Audi A4 gibi otomobillerde vites kutuları magnezyum alaşımlarından üretilmektedir [17]. Toyota'nın Lexus, Carina, Celica ve Corolla modellerinde bulunan direksiyon simitlerinde de magnezyum alaşımları tercih edilmektedir [18]. Ayrıca Mercedes-Benz SLK'nın yakıt tankı kapağı, Hyundai'nin Azera (Grandeur) ve Kia'nın Amanti (Opirus) modellerinde ise magnezyum koltuk iskeleti, sürücü hava yastığı kutusu, direksiyon simidi, direksiyon kolunu ve kilit gövdesi gibi parçalarında Mg alaşımlarından üretilmektedir [19]. Hyundai ve Kia Motors Corporation'ın birlikte yürüttükleri projeye göre koltuk iskeletinde magnezyumun kullanılması her bir araba için 6 kg'lık bir ağırlık kazancı sağlamaktadır (çeliğin magnezyum alaşımı ile değiştirilmesi sonucu ~%40'lık bir ağırlık kazancı). Sonuç olarak bu firmaların 2004'te 670 ton olan yıllık magnezyum kullanımınının 2007'de 3700 ton seviyelerine çıktığı tahmin edilmektedir [19].



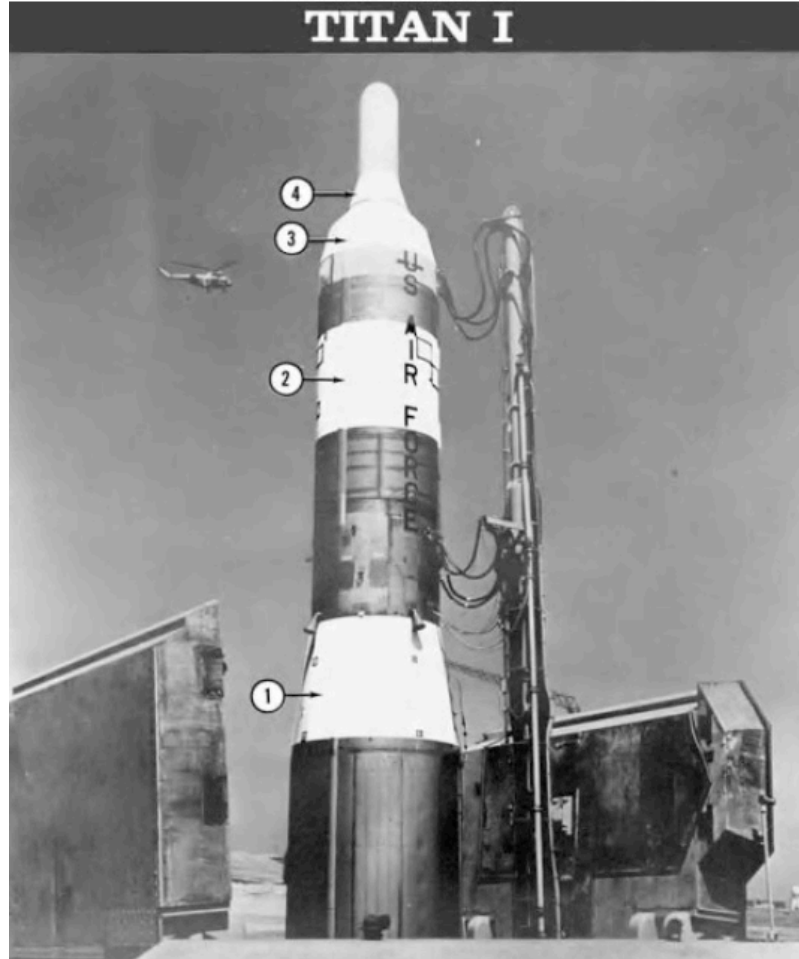
Şekil 2.3. Magnezyum alaşımlarının kullanıldığı otomobil parçalarına örnekler [16].

2.1.1.2. Uzay ve Havacılık Uygulamaları

Uzay ve havacılık endüstrisinde zararlı gaz salınımının azaltılması ve yakıt tasarrufu sağlanabilmesi için araçların ağırlıklarının azaltılması, en önemli konulardan biridir. Bir uzay aracının toplam ağırlığının azaltılması yakıt tasarrufu sağlamakla birlikte toplam operasyon maliyetini de azaltmaktadır. Metal elyafli laminatlar ve düşük yoğunluğa sahip polimerler gibi alternatif malzemelerin geliştirilmesi devam etmektedir. Fakat metal elyafli laminatların yüksek maliyeti bu konuda bir sorun teşkil etmektedir. Bunlara ek olarak düşük yoğunluğa sahip polimerlerin sergiledikleri düşük darbe direnci ve hasar toleransları da uygulamalar açısından bir engel teşkil etmektedir. Ayrıca bu malzemeler yüksek sıcaklığa maruz kaldıklarında düşük mekanik özellikler göstermektedirler. Sonuç olarak bütün bu kısıtlamalar magnezyum alaşımlarının alternatif olmasına neden olmaktadır.

Magnezyum alaşımlarının uzay ve havacılık endüstrisinde kullanılması çok eskilere dayanmaktadır. Geçmiş yıllarda magnezyum alaşımları sivil ve askeri uçaklarda yoğun olarak kullanılmıştır. Bunlara örnek olarak itici güç ters çeviricisi (Boeing

737, 747, 757, 767 modellerinde), vites kutusu (Rolls-Royce), motorlar ve helikopterlerin iletim kovanları, Eurofighter Typhoon, Tornado ve F16 gibi askeri uçakların iletim kovanları verilebilir. Uzay araçlarında ve roketlerde kalkış anındaki ağırlığın azaltılabilmesi için hafif malzeme kullanılmasının gerekliliğinden dolayı magnezyum alaşımları tercih edilmektedir. Bunun nedeni, magnezyum alaşımlarının mekanik özellikleri, işlenebilirliği ve yüksek sıcaklığa, ozona, yüksek enerjili parçacık bombardımanına ve küçük göktaşlarına karşı dayanıklı olması gibi etkileyici özellikleri ile de desteklenebilmesidir. Titan, Agena ve Atlas gibi kıtalararası balistik füzelerde, yüksek miktarlarda magnezyum (saç halde) kullanılmıştır [7]. Şekil 2.4'te yapımında yaklaşık 450-550 kg arası magnezyum alaşımı kullanılmış olan Titan 1 füzesi gösterilmektedir.



Şekil 2.4. Titan 1 Füzesi: (1) Magnezyum – Toryum Alaşımı HK31A saç, (2) ve (3) HM21A saç, (4) AZ31B saç [7].

2.1.1.3. Tıbbi Uygulamalar

Magnezyum ortopedik biomalzeme olarak ilk kez 20. yüzyılın ilk yarısında kullanılmaya başlanmıştır [20]. Ancak magnezyumun sahip olduğu düşük korozyon direnci sebebiyle hastaya nakledilen implantın etrafında hidrojen birikmesi olduğu tespit edilmiştir. Bu olay, magnezyumun yaygın bir şekilde biomalzeme olarak kullanılabilmesini sınırlandırmaktadır. Bütün bunlara rağmen, magnezyum sahip olduğu etkileyici özellikler sebebiyle, sağlık endüstrisinde taşıyıcı implant uygulamalarında hala potansiyel bir adaydır.

Magnezyum implant uygulamalarında kullanılan diğer malzemelere göre çok daha düşük yoğunluğa sahiptir. Bununla birlikte Çizelge 2.2’de görüldüğü gibi elastik modülü ve basma mukavemeti, diğer metalik implant malzemelere göre insan kemiğinin sahip olduğu değerlere daha yakındır [21].

Çizelge 2.2. İnsan kemiği ve bazı implant malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin karşılaştırılması.

Malzeme	Yoğunluk (g/cm ³)	Kırılma Tokluğu (MPa.m ^{1/2})	Elastikiyet Modülü (GPa)	Basma Mukavemeti (MPa)
İnsan Kemiği	1,8-2,1	3-6	3-20	130-180
Ti Alaşımları	4,4-4,5	55-115	110-117	758-1117
Co-Cr Alaşımları	8,3-9,2	-	230	450-1000
Paslanmaz Çelik	7,9-8,1	50-200	189-205	170-310
Magnezyum	1,74-2,0	15-40	41-45	65-100
Hidroksiapatit	3,1	0,7	73-117	600

Magnezyum insan vücudunda ion halinde bulunmaktadır. 70 kg ağırlığa sahip bir insanda yaklaşık 1 mol magnezyumun depolanabilmektedir [21]. Ayrıca insan sağlığı açısından toksik olmayıp insan vücudunda meydana gelen birçok metabolik olaya yardımcı olmaktadır. Bütün bu bahsi geçen özellikler magnezyum esaslı malzemelerin implant olarak kullanılabilmesi için ümit vermektedir [21-23].

Magnezyum esaslı malzemelerin ortopedik uygulamalarda kullanımını sınırlandıran bu korozyon dayanımlarının artırılabilmesi için, son yıllarda farklı alaşım

elementleri ilave ederek yeni alaşımlar geliştirilmesine (malzemenin yzeyine koruyucu kaplama yapılarak) alışılmaktadır [21].

2.1.1.4. Spor Malzemeleri Uygulamaları

Spor malzemeleri endüstrisinde en önemli meselelerden birisi spor tutkunlarının sürekli artan beklentilerinin üretilmekte olan spor malzemeleri ile karşılanabilmesidir. Magnezyum alaşımlarının ve magnezyum bazlı kompozitlerin karmaşık şekillerde üretilbilme bu alandaki üretimi arttırmaktadır. Magnezyum alaşımları okçuluk, tenis, golf, vb. branşlarda kullanılabilir. (şekil 2.5).



şekil 2.5. Magnezyum alaşımlarının spor alanlarındaki uygulamalarına örnekler [24].

Magnezyum alaşımları hafif olması ve mükemmel sönümlene kabiliyeti nedeniyle, bisiklet iskeleti ve paten şasisi olarak kullanılabilir popöler bir tercih olmuştur (şekil 2.5). Magnezyum alaşımlarından ya da magnezyum kompozitlerden üretilen bisiklet iskeletinin çok ve titreşimi emme özelliği vardır [7]. Dolayısıyla biniciye daha az enerji sarf ederek daha rahat bir sürüş keyfi sağlar.

2.1.1.5. Elektronik Uygulamaları

Elektronik malzeme endüstrisindeki eğilim, ürünleri çok daha kişiselleştirmek ve kolay taşınabilir hale getirebilmektir. Dolayısıyla, üretilecek olan parçalar için kullanılan malzemenin de hafif ve dayanıklı olması gerekmektedir. Magnezyum alaşımları polimerler ile kıyaslandığında, en az polimerler kadar hafif olması ile birlikte yüksek mukavemeti, iyi ısı transferi ve elektromanyetik girişime ve radyo frekansı girişimine engel olma gibi avantajlar sağlamaktadır [7]. Dolayısıyla Şekil 2.6'de gösterildiği gibi magnezyum esaslı malzemeler cep telefonları, diz üstü bilgisayarlar ve taşınabilir medya araçları, kamera ve dijital görüntü yansıtım elemanları gibi elektronik cihazların yapımında kullanılmaktadırlar [25].



Şekil 2.6. Magnezyum alaşımlarının kullanıldığı bazı elektronik cihazlar [25].

Magnezyum alaşımları iyi ısı dağıtımı ve iyi ısı iletimi özellikleri nedeniyle soğutucular ve sabit sürücü okuyucu kollarının üretiminde kullanılmaktadır [7].

2.2.1.6. Diğer Uygulamalar

Optik Uygulamalar: Magnezyum hafif olması sebebi ile gözlük çerçevesi ve dürbün malzemesi olarak da kullanılmaktadır.

El Gereçlerindeki Uygulamalar: Yüksek iş verimliliği elde edebilmek için el gereçlerinin hafif olması ve kolay taşınabilmesi arzu edilmektedir. Dolayısıyla

magnezyumun düşük yoğunluğu, darbe direnci, gürültüyü ve titreşimi emme gibi özellikleri ile birleşince el gereçleri yapımında da kullanılmaktadır. Bu el gereçleri [7];

1. Zincir testere gövdesi
2. Havalı çivi tabancası gövdesi
3. El aletleri dişli ve motor muhafazaları
4. El makası kolları
5. El matkabı gövdesi'dir.

2.1.2. Magnezyum Alaşımlarının Kodlama Sistemi

Magnezyum alaşımlarının kodlanması dört bölümden oluşmaktadır(Çizelge 2.3). Örnek olarak AZ91E-T6 alaşımı verilebilir. Burada AZ, alaşımın içindeki iki ana alaşım elementi olan alüminyum ve çinkoyu ifade etmektedir. Kodun ikinci bölümünü oluşturan 91, alaşımın içindeki ana alaşım elementlerinin yüzde ağırlık oranlarını belirtmektedir. E ise standartlarda 5 tane AZ91 alaşımı olduğunu belirtmektedir. Dördüncü bölümdeki T6 ise alaşımın çözeltiye alma işleminden sonra yapay yaşlandırıldığını göstermektedir.

Çizelge 2.3. ASTM sistemine göre magnezyum alaşımlarını ifade eden kod sistemi [26].

Birinci Bölüm	İkinci Bölüm	Üçüncü Bölüm	Dördüncü Bölüm
Alaşımın içinde en yüksek miktarda bulunan alaşım elementlerini ifade eder. Alaşımın içindeki azalan oranlarına göre sıralanarak alaşım elementlerini ifade eden iki harf kodundan oluşur eğer iki element aynı oranda ise alfabetik sıraya göre sıralanır.	Alaşımın içinde bulunan en yüksek miktardaki alaşım elementlerinin alaşım içindeki yuvarlatılmış yüzde oranlarını ifade eder. Alaşımın içinde bulunan en yüksek orandaki alaşım elementlerinin yuvarlatılmış yüzdelerini ifade eden iki rakamdan oluşur, birinci bölümdeki harf kodu sırasına uygun olarak dizilir.	En yüksek miktardaki alaşım elementlerinden aynı oranda içeren iki alaşımı birbirinden ayırt etmek için kullanılır. Standartlarda belirtilen kompozisyon sırasına bağlı olarak alfabedeki I ve O harfleri hariç olarak bir harften oluşur.	Alaşımın maruz kaldığı işlemi ifade eder. Bir harfi izleyen bir rakamdan oluşur.

Çizelge 2.4. Kullanılan alaşım elementleri ve elementi ifade eden simgeler [26].

Mg Alaşımındaki Kodu	Alaşım Elementi	Mg Alaşımındaki Kodu	Alaşım Elementi
A	Alüminyum	H	Toryum
B	Bizmut	K	Zirkonyum
C	Bakır	L	Lityum
D	Kadmiyum	M	Mangan
E	Nadir Toprak Elementleri	N	Nikel
F	Demir	P	Kurşun
Q	Gümüş	R	Krom
S	Silisyum	T	Kalay
W	İtriyum	J	Stronsiyum
X	Kalsiyum	Y	Antimon
Z	Çinko		

Çizelge 2.4'te magnezyum alaşımlarında kullanılan alaşım elementleri ve simgeleri verilmiştir. Çizelge 2.5'te de magnezyum alaşımlarına uygulanabilen işlemleri ifade eden simgeler verilmiştir.

Çizelge 2.5. Magnezyuma uygulanabilen işlemler ve işlemleri ifade eden simgeler [26,27].

İşlemi İfade Eden Simge	Açıklaması
F	Üretildiği gibi
O	Tavlanmış
H1	Sadece gerinim sertleştirilmesi uygulanmış
H2	Gerinim sertleştirilmesi uygulandıktan sonra kısmi tavlanmış
H3	Gerinim sertleştirilmesi uygulandıktan sonra dengelendirilmiş
H10 ve H11	Hafifçe pekleştirilmiş
H23, H24 ve H26	Pekleştirilmiş ve kısmi tavlanmış
T1	Soğutulmuş ve doğal olarak yaşlandırılmış
T2	Tavlanmış
T3	Çözeltiye alma ısı işlemi uygulanmış ardından soğuk işlem uygulanmış
T4	Çözeltiye alma ısı işlemi uygulanmış ardından doğal olarak yaşlandırılmış
T5	Sadece suni olarak yaşlandırılmış
T6	Çözeltiye alma işleminden sonra suni olarak yaşlandırılmış
T7	Çözeltiye alma ısı işlemi uygulanmış sonra dengelendirilmiş
T8	Çözeltiye alınmış, soğuk işlem görmüş ardından suni olarak yaşlandırılmış

Çizelge 2.5. (devam ediyor).

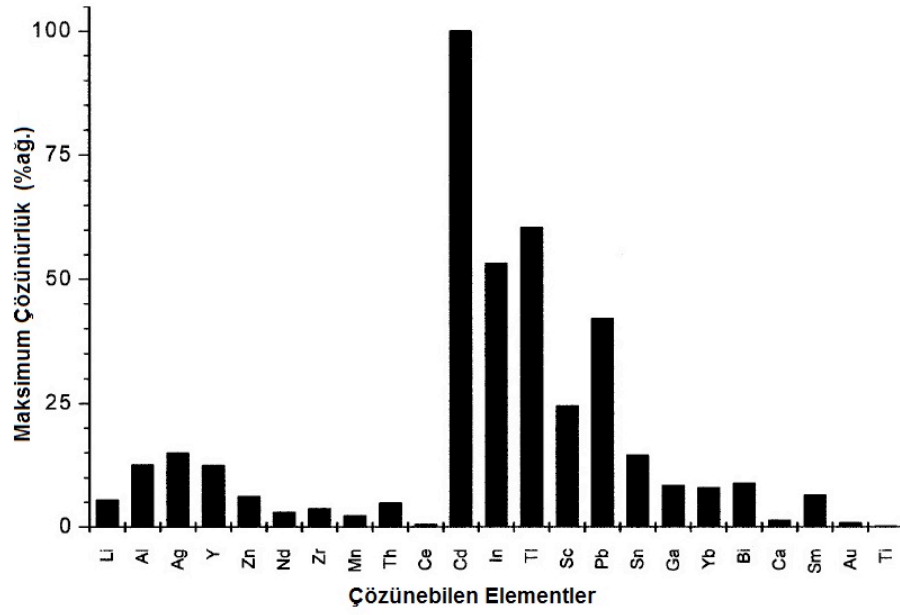
T9	Çözeltiliye alınmış, suni olarak yaşlandırılmış ardından soğuk işlem görmüş
T10	Soğutulmuş, suni olarak yaşlandırılmış ardından soğuk işlem görmüş
W	Çözeltiliye alma ısı işlemi uygulanmış (kararsız temperleme)

2.2. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA ETKİLERİ

Birçok yapısal uygulamada kullanılan magnezyum alaşımları, bazı elementlerle birlikte kullanılarak tek fazlı (katı eriyik) alaşımlar elde edilebilmektedir. Tek fazlı alaşımların elde edilebilmesi için Hume-Rotary kurallarının gerçekleşmesi gerekir. Bu nedenle magnezyum alaşımları [5,28];

1. Sıkı paket hegzagonal yapıya sahip metaller ile alaşımlandırılabilir. Örn; çinko, kadmiyum, berilyum, titanyum, zirkonyum gibi elementler magnezyumla birlikte sürekli katı eriyik çözeltisi oluşturabilirler.
2. Atomik çapı magnezyumun $\pm 15\%$ 'i kadar olan elementler ile magnezyum katı eriyik çözeltisi oluşturabilir.
3. Magnezyum yüksek elektro pozitifliğe sahip olduğu için periyodik tablonun IVB ve VIB gruplarında yer alan daha az elektropozitif olan karbon ve silisyum gibi elementler ile intermetalik bileşikler oluşturabilmektedir.

Magnezyum içerisinde birçok element çözünebilmekte ve katı eriyik çözeltisi oluşturabilmektedir. Bu alaşım elementleri ve magnezyum içindeki yüzde ağırlık olarak maksimum çözünebilirlikleri Şekil 2.7'de verilmektedir.



Şekil 2.7. Bazı elementlerin magnezyum içindeki maksimum katı çözünürlükleri [27].

Magnezyum içinde birçok element çözünebildiği için mekanik ve kimyasal özelliklerinin geliştirilmesi amacı ile birçok alaşım tasarlanmıştır. Bu alaşım elementleri; Al, Be, Ca, Cu, Ni, Fe, Li, Mn, Nadir toprak elementleri, Si, Ag, Ti, Zn, Zr, Sn, Sr ve Y'dir.

2.2.1. Alüminyum

Bütün alaşım elementleri arasında en çok tercih edilenidir. Çünkü mekanik özellikleri geliştirmekle birlikte katılaşma alanını genişleterek alaşımın dökülebilirliğini kolaylaştırmaktadır [8]. Oda sıcaklığında magnezyumunda çözünen maksimum alüminyum miktarı 2,6 (%ağ.) iken 436 °C'de bu oran 12,1 (%ağ.)'dir. Alüminyum ilavesi ile elde edilen katı çözeltiler ve $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik çökeltisi ile mekanik özelliklerin arttırılmaktadır [17]. Bunun yanında, alüminyumun magnezyum alaşımına en büyük olumsuz etkisi gözenekli yapı oluşmasıdır [29]. Ticari olarak üretilen Mg-Al alaşımlarında en yaygın kullanılan alüminyum oranı 2-9 (%ağ.) arasındadır.

2.2.2. Berilyum

Magnezyum alaşımlarına 30 ppm'den daha az miktarda ilave edildiğinde, eriyiğın oksitlenmesini büyük oranda azaltmaktadır. Berilyumun zehirli olmasından dolayı, kullanımını sırasında dikkat edilmelidir [27].

2.2.3. Kalsiyum

Tane inceltmek ve sürünme özelliklerini arttırmak ve eriyik metalin oksitlenmesini azaltmak için kullanılmaktadır. Ayrıca Ca, magnezyum saçlarının haddelenebilirliğini ve Ca içeren intermetaliklerin oluşması ile de sürünme mukavemetini artırmaktadır [8].

2.2.4. Bakır

Alaşıma sağladığı en büyük katkı yüksek sıcaklık mukavemetinin geliştirilmesidir. Alaşımdaki oranının 0.05'i (ağ.%) geçmesi ise alaşımanın korozyon direnci üzerinde olumsuz etki oluşturmaktadır [27].

2.2.5. Nikel ve Demir

Bu iki element de magnezyum alaşımlarının korozyon direncini olumsuz yönde etkilemektedir. Bu yüzden her ikisinin de genellikle magnezyum alaşımlarında eser miktarda (ppm) bulunması istenmektedir [29].

2.2.6. Lityum

Magnezyumun fiziksel özellikleri üstünde çok çeşitli etkileri olduğu için bu element üzerinde çok geniş araştırmalar yapılmıştır. Lityum magnezyum içinde oda sıcaklığında %5,5 (ağ.) ile yüksek katı çözünürlüğüne sahiptir. İlginç olan ise çözeltideki lityum miktarının %11'in (ağ.) üzerine çıkması ile kristal yapının sıkı paket hekzagonalden hacim merkezli kübik yapıya dönmesidir. Kristal yapıdaki bu değışim, prizmatik kayma düzlemlerini aktif hale getirerek, işlenmiş magnezyum

alaşımının şekillendirilebilirliğini artırmaktadır [30]. Ayrıca, magnezyuma lityum ilavesi yoğunluğun, saf magnezyumun yoğunluğundan daha da azalmasını sağlamaktadır. Bu elementin olumsuz etkisi ise, alaşımdaki miktarı arttıkça mukavemet ve korozyon direncinin azalması neden olmasıdır [8].

2.2.7. Mangan

Mangan, eriyik magnezyuma ilave edildiğinde demirin cüruf halinde ayrılmasına neden olarak alaşımın korozyon direncini artırmaktadır. Mangan, magnezyum alaşımında akma mukavemetinin artırılması, tane inceltmesi ve kaynaklanabilirlik özelliklerinin geliştirilmesi için kullanılmaktadır. Magnezyum içindeki maksimum çözünebilirliği % 1,5'dur (ağ.) [27].

2.2.8. Nadir Toprak Elementleri

Eskiden magnezyuma içinde %50 (ağ.) seryum içeren mishmetal ilave edilmekteydi. Fakat son zamanlardaki araştırmalar nadir toprak elementlerinin magnezyum alaşımı üzerindeki bireysel etkilerinde yoğunlaşmaktadır [27,30]. Seryumun magnezyum katı çözünebilirliğindeki etkisi hegzagonal sıkı paket kristal yapıdaki c/a oranını düşürmesidir. Böylece işlenmiş magnezyum alaşımının şekillendirilebilirliği geliştirilmektedir [31]. Genel olarak nadir toprak elementlerinin magnezyum alaşımına ilavesi, alaşımının yüksek sıcaklıktaki mukavemetini, korozyon direncini ve sürünme direncini arttırmaktadır [29].

2.2.9. Silisyum

Alüminyum alaşımında olduğu gibi magnezyum alaşımında da silisyum eriyik metalin akıcılığını arttırmaktadır. Bununla beraber silisyumla birlikte alaşıma eser miktarda (ppm) demir elementi de ilave olur. İstenmeyen demir elementinin alaşıma ilavesi sonucu alaşımın korozyon direnci düşmektedir [27].

2.2.10. Gümüş

Magnezyum alaşımının içinde nadir toprak elementlerinin bulunması ile yüksek sıcaklık mukavemetinde ve sürünme direncinde artış meydana getirmektedir. Alaşımın yaşlandırma sertleştirmesini kolaylaştırarak mekanik özelliklerin gelişmesini sağlamaktadır [32].

2.2.11. Toryum

Magnezyum alaşımlarının yüksek sıcaklık mukavemetini ve sürünme direncini en fazla arttıran elementtir. Fakat radyoaktif olduğu için tercih edilmemekte ve yaygın olarak kullanılmamaktadır [29].

2.2.12. Çinko

Alüminyumdan sonra magnezyum alaşımları için kullanılan ikinci en çok tercih edilen elementtir, magnezyum alaşımlarının dökülebilirliğin artırılması ve mukavemetin geliştirilmesi açılardan etkilidir [17]. Magnezyuma zirkonyum veya nadir toprak elementleri ile birlikte ilave edildiğinde çökelti sertleştirilmesine uygundur. Sadece alüminyum ile birlikte ilave edildiğinde ise magnezyum alaşımının oda sıcaklığı mukavemetini arttırmaktadır. Bunun yanı sıra demir ve nikelin alaşımın korozyon direnci üzerindeki olumsuz etkisi çinko ilavesi ile azaltılmaktadır [27].

2.2.13. Zirkonyum

Zirkonyum tane inceltme için ilave edilmesinin yanı sıra tokluğu arttırmak için de kullanılmaktadır [17]. Zirkonyum alüminyum veya mangan içeren magnezyum alaşımlarında kullanılmaz. Çünkü zirkonyum bu elementler ile birlikte intermetalik fazlar oluşturmaktadır [27].

2.2.14. Kalay

Az miktarda alüminyum ile birlikte magnezyuma ilave edildiğinde çok faydalıdır. Alaşımın sünekliğini arttır. Alaşımın sıcak işlem uygulanırken kırılma eğilimini azalttığı için, alaşımın dövülebilirliğini arttırmaktadır [8].

2.2.15. İtiryum

Bu element çoğu zaman nadir toprak elementleri ile karıştırılmaktadır. Çünkü özellikleri bakımından onlara çok benzerdir. Magnezyuma nadir toprak elementleri ile birlikte ilave edilerek, yüksek sıcaklık sürünme direncinin geliştirilmesini sağlamaktadır. Ayrıca korozyon özelliklerinin gelişmesi üzerinde de olumlu etki yapmaktadır [27].

2.2.16. Stronsiyum

Diğer ana alaşım elementleri ile birlikte magnezyuma ilave edilmektedir. Stronsiyumun alaşıma ilavesiyle sürünme mukavemetinin arttığı, fakat akma ve çekme mukavemeti üzerinde belirli bir etkisi olmadığı tespit edilmiştir [33].

2.3. MAGNEZYUM ALAŞIMLARININ ÜRETİM YÖNTEMLERİ

Magnezyum alaşımlarının üretiminde kullanılan döküm yöntemleri dört ana başlık halinde toplanabilir [15]. Bunlar;

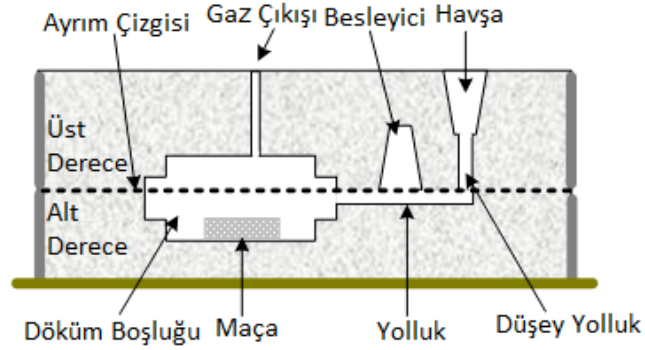
1. Kum Kalıba Döküm
2. Kokil Döküm
3. Yüksek Basınçlı Döküm
4. Yarı Katı Metal Döküm'dür.

2.3.1. Kum Kalıba Döküm

Metalik parçaların imalatında kum kalıba döküm yöntemi oldukça yaygın kullanılan bir metottur. Kum kalıbın şematik gösterimi Şekil 2.8'de verilmiştir. Üretimi

yapılacak olan döküm parçası, sıvı metalin kumdan yapılmış kalıp boşluğuna dökülmesi sonucu elde edilmektedir. Kalıp soğuyana kadar metal de katılaşıp ve dökülen parça kalıptan çıkartılır. Ancak döküm parçasının kalitesi için, metal ve kalıp arasında meydana gelebilecek olan etkileşimler minimum olmalıdır. Çünkü magnezyum birçok kalıp malzemesi ile etkileşime girebilmektedir [8]. Bu sorun;

1. Kumda bulunan nem seviyesini minimuma indirilerek
2. Kalıp yapımında kullanılan kum karışımına uygun inhibitörler ilave edilerek giderilebilmektedir.



Şekil 2.8. Kum kalıbım şematik gösterimi [34].

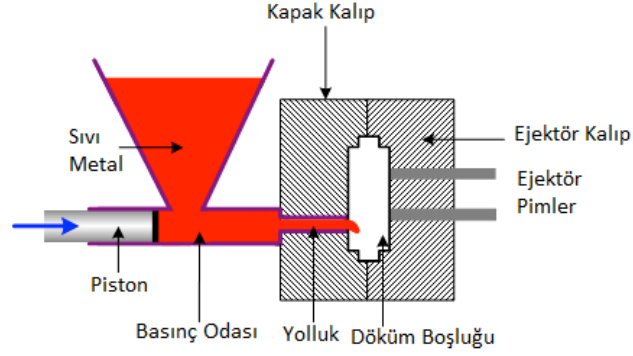
Kükürt, potasyumfloroborat, borik asit ve amonyum florosilikat gibi inhibitörler tek başlarına kullanılabilir gibi başka inhibitörler ile birlikte de kullanılabilir. Kuma ilave edilecek olan inhibitör miktarını etkileyecek olan faktörler ise [8];

1. Sıvı metalin döküm sıcaklığı,
2. Dökümü yapılacak olan alaşımın kimyasal bileşimi,
3. Döküm parçanın geometrisidir (kalınlığı).

Yüksek sıcaklıklarda yapılan dökümlerde metal ve kalıp arasındaki etkileşimin yüksek olması beklenir. Dolayısıyla kalıp kumuna ilave edilen inhibitör miktarı da bu oranda yüksek olmalıdır. Ayrıca ilave edilen alaşım elementleri alaşımın öz kütlesini değiştireceği için, ilave edilecek inhibitör oranı da değişmektedir. Döküm parçanın kalın kesitleri yavaş soğuduğu için bu kısımlarda inhibitörün yanma riski bulunmaktadır.

2.3.2. Kokil Döküm

Kokil döküm aynı zamanda permanent döküm olarak da bilinir. Kokil döküm yönteminin şematik gösterimi Şekil 2.9’da verilmiştir.



Şekil 2.9. Kokil dökümün şematik gösterimi [35].

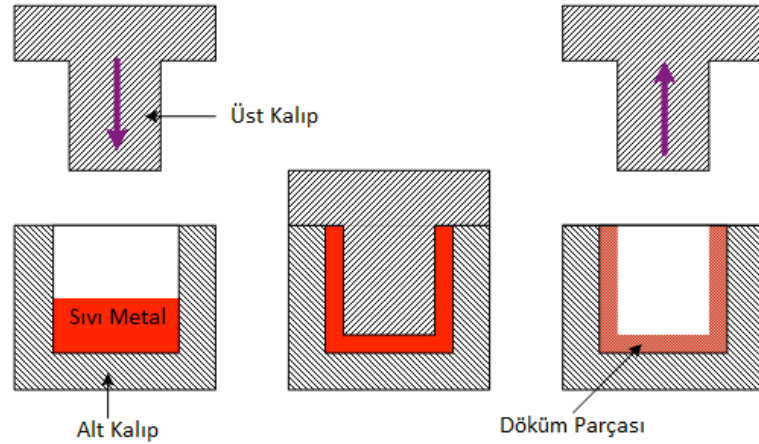
Katılaşma sırasında kalıbın içindeki sıvı metale 40 - 1000 MPa arasında bir basınç uygulanmaktadır. Bu işlem sıvı metalin içinde sıkışıp kalmış olan gaz boşluklarının giderilmesini ve katılaşma sırasında meydana gelen hacimsel daralmanın (çekmenin) en aza indirilmesini sağlamaktadır. Buna ilave olarak dökümü yapılan metalin yüksek hızlarda (100–1000°C/s) soğuması ile ince taneli mikroyapı elde edilmektedir [8]. Dökülen parçanın kalıptan kolayca çıkarılabilmesi ve kalıba yapışmasını önlemek için yağlayıcı kullanılmaktadır. Kokil döküm yöntemi ince kesitli parçaların üretiminde tercih edilmektedir. Bu yöntemin avantajları;

1. İstenilen şekle en yakın ölçülerde ürün elde edilebilmesi.
2. Yüksek hızlarda üretim yapılması
3. Bu yöntem ile karmaşık şekilli parçaların bile kolaylıkla üretilebilmesi
4. Elde edilen ürünlerin mukavemet değerlerinin yüksek olması
5. Yüksek yüzey kalitesi ve boyutsal hassasiyet
6. Üretilen parçanın ekstra işleme gereksiniminin minimum olması

2.3.3. Yüksek Basınçlı Döküm

Şekil 2.10'da yüksek basınçlı döküm şematik olarak gösterilmiştir. Doğrudan yüksek basınçlı döküm ve dolaylı yüksek basınçlı döküm olmak üzere iki farklı yöntemi vardır [36].

Erimiş metal bir kalıbın alt yarısı içine dökülür kalıbın üst kısmı kalıbı tamamen kapatacak şekilde indirilmektedir. Eriyik metal tek yönlü basınç altında kalıbın şeklini alarak katılaşır. Bu yöntem metal matrisli kompozit üretiminde ve özellikle de fiber takviyeli metal matrisli kompozit üretiminde kullanılmaktadır [38]. Katılaşma esnasında uygulanmakta olan yüksek basınç katılaşma çekmesi, gaz-ilişkili gözenekler ve metal takviye ara yüzey boşluklarının engellenmesine yardımcı olmaktadır.

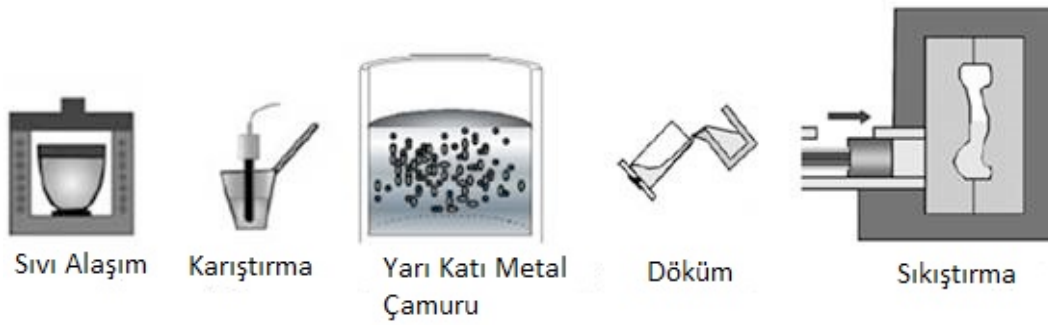


Şekil 2.10. Yüksek basınçlı dökümün şematik gösterimi [37].

Dolaylı yüksek basınçlı döküm kokil döküme benzer şekilde uygulanmaktadır, farklı olarak sıvı metal yüksek basınçlı döküm kolu yardımı ile kalıba dökülmektedir. Pistonun hızını kontrol ederek, erimiş metal doldurma hızı değiştirilebilmektedir. Erimiş metal doldurma hızı gözeneksiz döküm elde etmek ve türbülans akımını oluşumunu en aza indirmek için önemlidir. Doğrudan yüksek basınçlı döküm ile dolaylı yüksek basınçlı dökümü karşılaştırdığımızda, dolaylı yüksek basınçlı dökümde daha fazla malzeme kaybı olması sebebi ile verim daha düşüktür [36].

2.3.4. Yarı Katı Metal Döküm

Magnezyum alaşımlarının birçok uygulamalarında, kullanılır. Şekil 2.10'de bu yöntem şematik olarak ifade edilmiştir. Bunun başlıca sebepleri yüksek üretim verimliliği, yüksek üretim hacmi ve düşük üretim maliyetleridir. Bütün bunlara rağmen, bu yöntemle üretilen parçalarda üretim hataları oluşmaktadır. Kalıbın sıvı metalle dolması sırasında oluşan gazların tahliye edilememesi sonucu döküm parçalarında gözenekler oluşmaktadır. Ayrıca kalıbın içindeki katılaşma sırasında sıcak yırtılma meydana [39-41]. Bu hatalar malzemenin mekanik özelliklerini zayıflatmanın yanında alaşımın mekanik özelliklerini arttırmak için uygulanan ısı işlemlerin de başarılı olmasını engellemektedir.



Şekil 2.11. Yarı katı metal döküm yönteminin şematik gösterimi [44].

Bu sorunların giderilmesinde genellikle yarı katı metal döküm yöntemleri kullanılmaktadır (Şekil 2.11). Bu yöntemler thixomolding, rheocasting, thixocasting, compocasting, squeeze casting, thixoforming'dir. Bu yöntemin bazı avantajları ise [42,43] ;

1. Üretilen parçada dökümden kaynaklanan boşluklarının minimuma indirilmesi
2. Üretilen parçaların tutarlı mekanik özellikler göstermesi(izotropik davranış)
3. Karmaşık şekilli parçaların üretilmesi
4. Kalıp ömrünü uzatması

Yarı katı bir bulamacın sıcaklığı daha düşüktür ve aynı alaşımın eriyik hali ile kıyaslandığında daha yüksek viskoziteye sahiptir. Düşük sıcaklık, daha kısa sürede

katılma ve daha büyük bir enerji verimliliği sağlamakla beraber, kalıp ömrünün uzamasına da neden olmaktadır. Ayrıca daha yüksek bir viskoziteye sahip olan bulamaç, döküm boşluğunda daha az türbülansa ve gözenek oluşumuna neden olarak parçanın mükemmel mekanik özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır [45].

2.4. MAGNEZYUM ALAŞIMLARINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemlerin amacı, mekanik özellikleri geliştirmek veya üretim aşamalarında gerekli olan mikroyapısal ve mekanik özelliklerin düzenlemektir. Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemleri ifade eden kodlamalar ve açıklamaları Çizelge 2.6'da verilmiştir.

Çizelge 2.6. Magnezyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemleri ifade eden simgeler ve açıklamaları [8].

ISIL İŞLEM SİMGESİ	AÇIKLAMASI
T1	Soğutma ve doğal yaşlandırma
T2	Döküm parçasını tavlama
T3	Çözeltiye alınıp ardından soğuk işlem uygulama
T4	Çözeltiye alma
T5	Soğutma ve suni yaşlandırma
T6	Çözeltiye alma ve suni yaşlandırma
T7	Çözeltiye alma ve dengileştirme
T8	Çözeltiye alma, soğuk işlem uygulama ve suni yaşlandırma
T9	Çözeltiye alma, suni yaşlandırma ardından soğuk işlem uygulama
T10	Soğutma, suni yaşlandırma ve soğuk işlem uygulama

Magnezyum alaşımlarına uygulanan en yaygın ısı işlemler tavlama, gerilim giderme, yaşlandırmadır.

2.4.1. Tavlama

Tavlama alaşımın yapısını soğuk deformasyondan sonra yeniden düzenlemek için uygulanmaktadır. Uygulama sıcaklığı alaşımın içinde yer alan alaşım elementlerine ve bu elementlerin miktarlarına bağlı olarak değişmekle beraber, 290 °C - 450 °C

arasındadır. Tavlama parçalar istenilen sıcaklıkla (malzemenin boyutuna bağlı olarak) yeterli süre bekletildikten sonra yavaş soğutulmaktadır [6].

2.4.2. Gerilim Giderme

Gerilim giderme hem döküm alaşımlarına hem de dövme alaşımlarına uygulanabilmektedir. Dövme alaşımlarına uygulanmasındaki amaç şekil verme, düzleştirme ya da kaynaklama esnasında meydana gelen gerilimi ortadan kaldırmaktır. Döküm alaşımlarına uygulanmasındaki amaç ise döküm esnasında, boyutsal kararlılığı sağlamak amacıyla parçaya uygulanan işlemler esnasında meydana gelen iç gerilimleri gidermek için ya da servis koşullarında meydana gelebilecek gerilim korozyonu çatlaklarının önlenmesi için uygulanır. Sıcaklık ve zaman parametreleri alaşım kimyasına ve durumuna bağlı olarak değişir. Genel olarak sıcaklık, 150 °C - 340 °C, zaman ise dakikalar ile saatler arasında değişmektedir [6].

2.4.3. Çözeltiye Alma ve Yaşlandırma

Bu işlem çökelim sertleşmesine sebebiyet vermekte ve üç aşamadan oluşmaktadır;

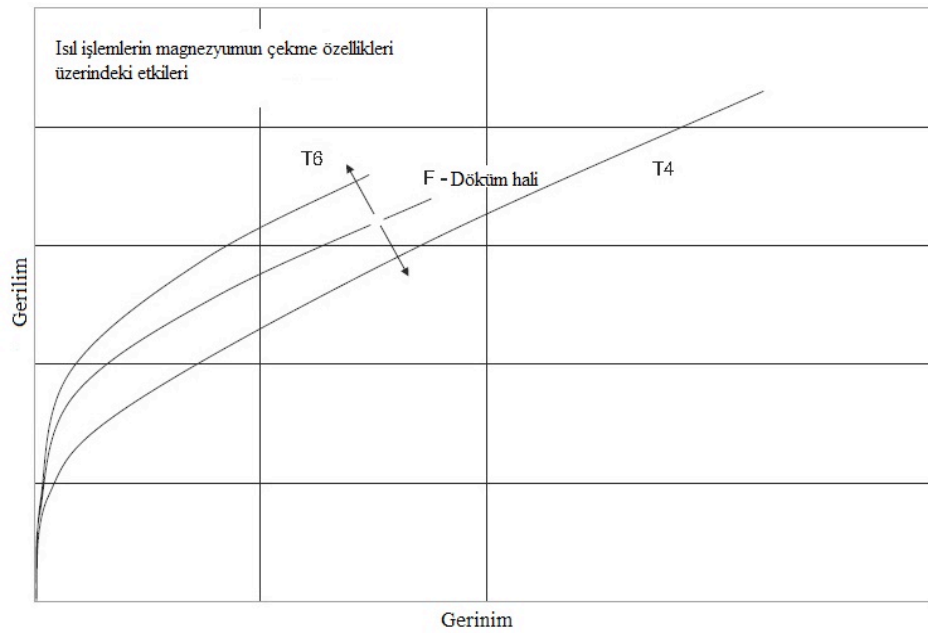
1. Çözeltiye alma, alaşım katı-katı eğrisi üzerindeki sıcaklıklara kadar ısıtılır.
2. Hızlı soğutma; alaşım hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulur.
3. Yaşlandırma, çözeltiye alınmış alaşımda istenilen bileşiklerin çökmesini sağlamak için tekrar ısıtılır.

Sıcaklık ve zaman parametreleri alaşım kimyasal bileşimine bağlı olmakla birlikte, Çizelge 2.7’de bazı alaşımlar için bu parametreler verilmiştir. Sıcaklık ve zaman birbirine bağlı ve birbirini etkileyen parametrelerdir. İdeal sonuçların elde edilmesi için düşük sıcaklıklar ve uzun sürelerin kullanılmasının daha etkili olduğu bilinmektedir. Çökelti sertleşmesiyle elde edilecek etkiye alaşım kimyasının da büyük tesiri vardır. Mg-9Al alaşımları için bu sertleşme % 20’lerde iken, nadir toprak elementi içeren alaşımlarda daha yüksektir ve Mg-5Zn alaşımları için ise yaklaşık % 70 civarındadır. Yaşlandırma sertleştirme açısından Mg-Al alaşımları ile Al alaşımları kıyaslandığında Mg-Al alaşımlarının verdiği tepkinin çok daha zayıf

olduğu ifade edilebilir. T4 ve T6 ısı işlemlerinin alaşımların çekme özelliklerine etkisi Şekil 2.12'deki gibi gösterilebilir [6].

Çizelge 2.7. Bazı magnezyum döküm ve dövme alaşımları için tavsiye edilen çözelti alma ve yaşlandırma parametreleri [8].

Alaşım	İşlem	Çözeltiye Alma			Yaşlandırma	
		Sıcaklık (°C)	Süre (saat)	Maksimum Sıcaklık(°C)	Sıcaklık (°C)	Süre (saat)
AZ91	T4	413	16-24	418		
	T5				168	16
	T6	413	16-24	418	168	16
AZ63	T4	385	10-14	391		
	T5				260	4
	T6	385	10-14	391	218	5
AM100	T4	424	16-24	432		
	T5				232	5
	T6	424	16-24	432	232	5
WE43	T6	525	4-8	535	250	16
ZE63	T6	480	10-72	491	141	48
ZK61	T5				149	48
	T6	499	2	502	129	48
ZK60	T5				150	24
AZ80	T5				177	16-24



Şekil 2.12. Mg-Al-Zn alaşımlarına uygulanan ısıl işlemin Gerilim-Gerinim grafiği üzerindeki etkileri [6].

2.4.3.1. Mg-Al-Zn Alaşımlarında Çökelti Oluşumu

Çözeltiye alma ve hızlı soğutma işleminin ardından uygulanan yaşlandırma işleminde genellikle Mg-Al-Zn alaşımlarında oluşan çökelti hmk yapıya sahip $Mg_{17}Al_{12}$ çökeltileridir. Alaşımda meydana gelen sertleşmenin levha benzeri çökelti fazlarının Mg matrisinin üzerinde yer alan prizmatik ya da bazal yüzeylerde oluşmasından kaynaklanmaktadır. Yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak iki farklı çökelti oluşum mekanizmasının birlikte gerçekleşmektedir. Bunlar şu şekilde tanımlanabilir:

1. Çökeltinin tane içinde çekirdeklenmesi ve büyümesiyle oluşan sürekli çökeltiler
2. Tane sınırlarında çekirdeklenme ve büyümeyle oluşan süreksiz çökeltiler

Al'nin Mg içinde %12,5 gibi yüksek bir katı çözünürlüğe sahip olmasına rağmen, çökelti sertleştirmesinde etkisi % 20'nin altındadır. Bunun sebebi çökeltiler arasındaki boşluğun çok olması ve $Mg_{17}Al_{12}$ fazının istenmeyen plaka benzeri çökmesi neticesinde taban kaymasını engellemesidir. Mg-Al-Zn alaşımları içindeki Zn miktarının % 2'lere kadar artması Al'nin Mg içindeki katı çözünürlüğünü azaltarak alaşım içerisindeki çökelti faz miktarını arttırmaktadır [6].

2.4.3.2. Çökeltilerin Kristalografisi

$Mg_{17}Al_{12}$ çökeltisi ile Mg matrisi çok farklı dizilimlerde etkileşmesine rağmen, iki dizilimin baskın olduğu kabul edilmektedir [46];

1. Burger dizilimi, $(0001)_M$ 'in alışık düzlemini belirttiği ve çökeltilerin Mg matrisinin taban düzlemine paralel olduğu dizilim:

$$(0001)_M // (011)_\gamma, [\bar{2}\bar{1}\bar{1}0]_M // [1\bar{1}\bar{1}]_\gamma$$

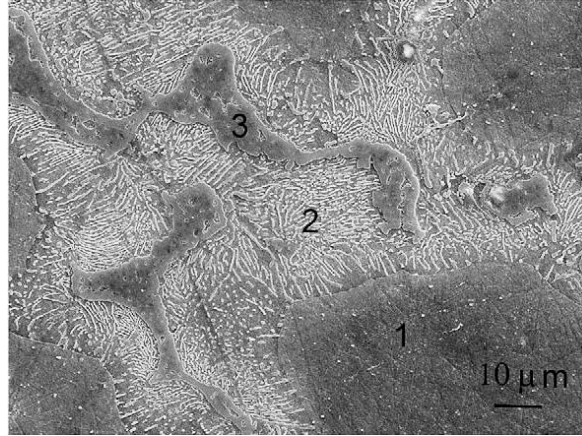
2. Potter dizilimi,

$$(0001)_M \text{ 2 deg from } (001)_\gamma, (01\bar{1}\bar{1})_M // (110)_\gamma, [\bar{2}\bar{1}\bar{1}0]_M // [1\bar{1}\bar{1}]_\gamma$$

Bu dizilimler hem sürekli hem de süreksiz tip çökeltiler için geçerlidir. Tek fazlı taneler içindeki çökelti dizilimi farklı olabilir

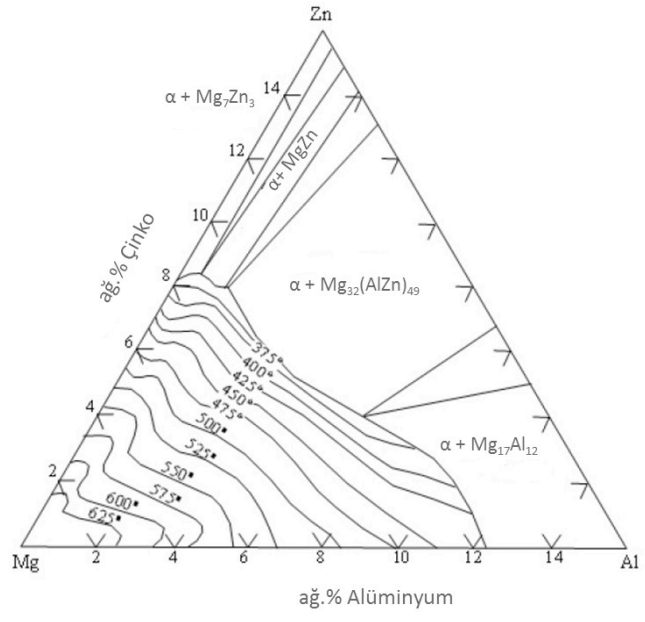
2.5. MAGNEZYUM ALUMİNYUM ÇİNKO (Mg-Al-Zn) ALAŞIM SİSTEMİ

Mg-Al-Zn alaşım sistemi, Mg döküm alaşımlarında önemli bir yere sahiptir. 1913 yılında keşfedilen bu alaşım sistemi daha sonra birçok araştırmacı tarafından geliştirilmiştir [47-50]. AZ91, AZ31, AZ63 gibi alaşımlar Mg-Al-Zn üçlü alaşım sistemine göre tasarlanmıştır. Mg-Al ikili alaşım sisteminde olduğu gibi Mg-Al-Zn üçlü faz sisteminde de baskın olan intermetalik faz β -Mg₁₇Al₁₂ fazıdır [48]. Şekil 2.14'teki Mg-Al-Zn alaşım sisteminin üçlü faz diyagramındaki magnezyumca zengin bölge incelendiğinde, dört farklı intermetalik fazın olduğu görülmektedir. Bunlar; MgZn, Mg₃₂(Al,Zn)₄₉, Mg₇Zn₃ ve Mg₁₇Al₁₂ fazlarıdır. Mg₃₂(Al,Zn)₄₉ fazının oluşma sıcaklığı 535 °C'dir. α + MgZn ve α + Mg₁₇Al₁₂ ötektik fazlarının ergime sıcaklıkları 347 °C ve 460 °C'dir [49]. Mg-Al-Zn sisteminde sıvı bölgesindeki en yüksek sıcaklık Al'un ergime sıcaklığı olan 650 °C'dir.



Şekil 2.13. AZ91 magnezyum alaşımına ait SEM görüntüsü; 1) α -Mg matris, 2) lamelar ötektik çökelti (α + Mg₁₇Al₁₂), 3) Ayrık ötektik çökelti [50].

Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazının çökeltisinin olduğu Şekil 2.13'te AZ91 alaşımının SEM görüntüsünde görülebilmektedir.



Şekil 2.14 Mg-Al-Zn üçlü faz diyagramının Mg zengin kesiti [49].

BÖLÜM 3

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

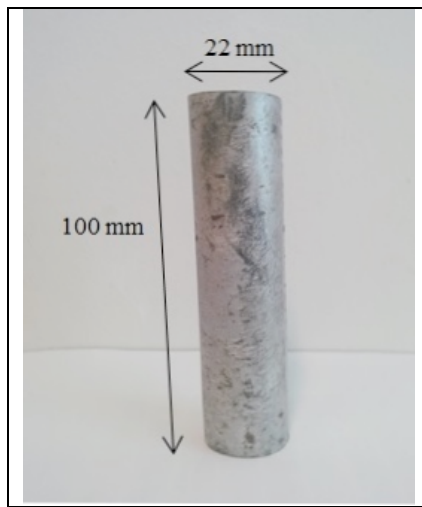
3.1. MALZEME

Bu çalışmada, ticari olarak üretilmekte olan ve piyasada genellikle kurban anot olarak kullanılan AZ63 magnezyum alaşımı ısıtma işlem uygulamalarına uygunluğundan dolayı tercih edilmiştir. Kullanılan AZ63 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. Deneysel çalışmalarda kullanılan AZ63 magnezyum alaşımının kimyasal bileşimi.

	Al	Zn	Mn	Si	W	Fe	Mg
AZ63	6,180	3,174	0,251	0,073	0,049	0.011	Kalan

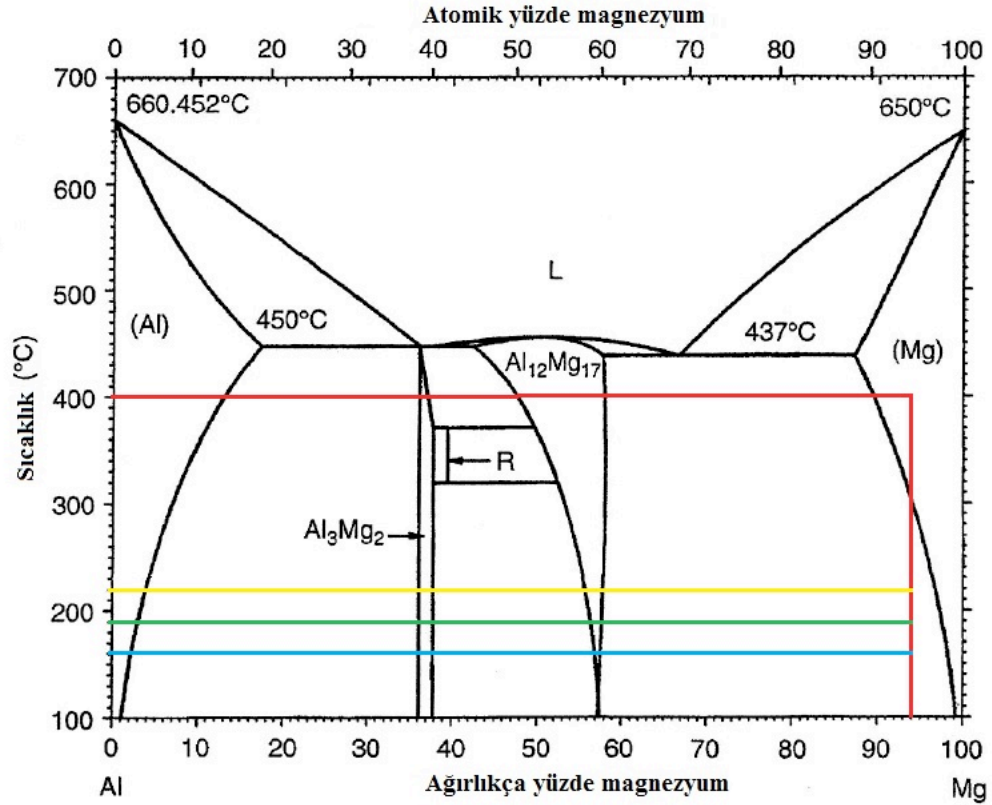
Deneysel çalışmalarda kullanılan AZ63 magnezyum alaşımı 100 mm uzunluğunda ve 22 mm çapında silindirik çubuklar halinde temin edildi. Şekil 3.1’de temin edilen alaşımın görüntüsü ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.1. Temin edilen AZ63 magnezyum çubuk ve ölçüleri.

3.2. ISIL İŞLEM

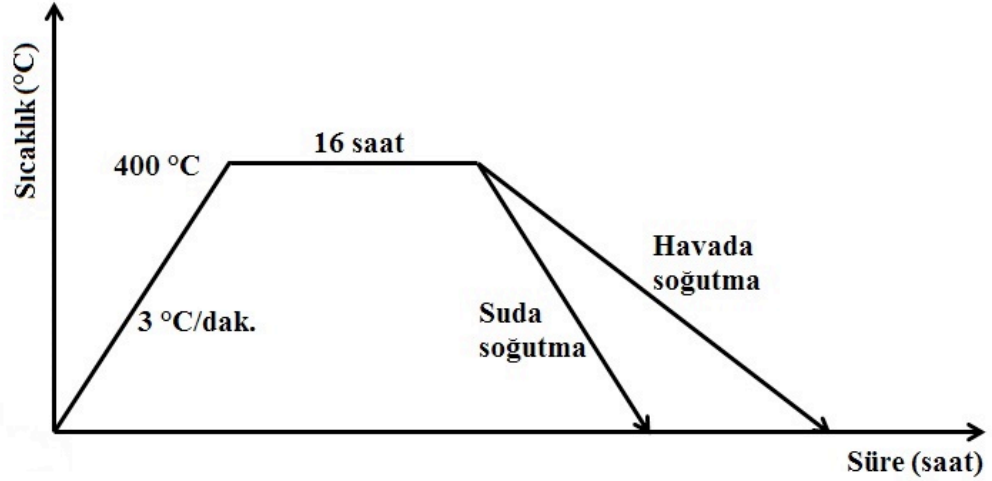
Çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma ısıtım basamakları Mg-Al ikili faz diyagramının katı-katı çizgisini temel alınarak belirlendi. Çözeltiye alma ısıtım işleminde 400 °C'nin seçilme sebebi, yaklaşık 300 °C civarlarında alaşımanın tek fazlı bölgeye geçmesidir. Ön deneyler sırasında Çizelge 2.7'de AZ63 magnezyum alaşımı için tavsiye edilen çözeltiye alma parametrelerinde istenilen seviyede çözeltiye alma işleminin gerçekleşmemiş olmasından dolayı sıcaklık ve sürenin bir miktar üzerine çıkılarak bu yeni parametreler belirlenmiştir.



Şekil 3.2. Al-Mg ikili faz diyagramı. Kırmızı çizgi çözeltiye alma sıcaklığını, mavi, yeşil ve sarı çizgiler ise sırası ile 160 °C, 190 °C ve 220 °C'deki yapay yaşlandırma sıcaklıklarını göstermektedir [52].

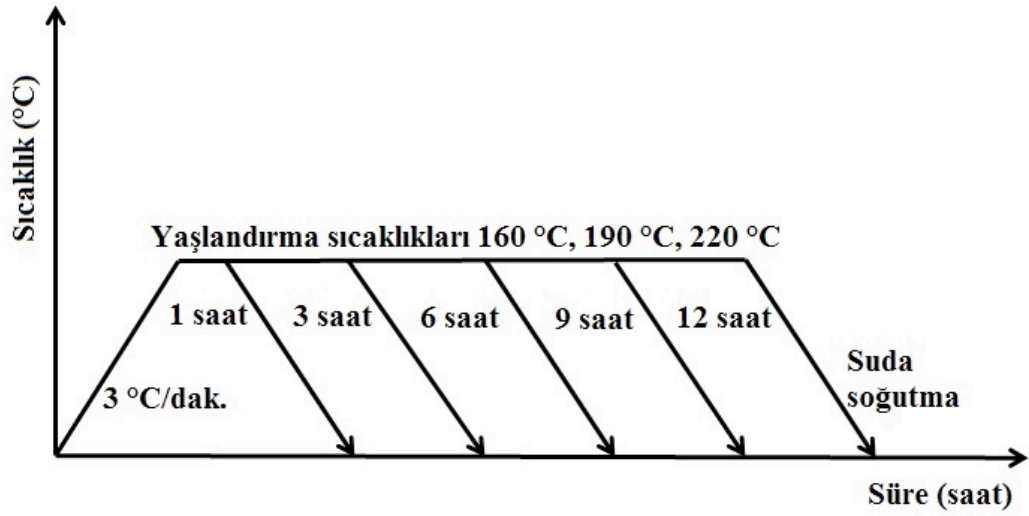
Al-Mg ikili faz diyagramında AZ63 magnezyum alaşımı ile seçilmiş olan çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma ısıtım işlemlerinin sıcaklıklarının kesişim noktaları Şekil 3.2'da gösterilmiştir.

Numuneler hem çözeltiliye alma hem de yaşlandırma ısı işlemleri için oda sıcaklığından istenilen sıcaklıklara ısıtılırken, hızlı ısınmadan kaynaklı yapıda meydana gelmesi muhtemel termal streslerin önlenmesi amacı ile 3 °C/dak.'lık bir rampa kullanılmıştır [51]. Çözeltiliye alma ve yapay yaşlandırma ısı işlemlerinin basamaklarını gösteren şemalar Şekil 3.3 ve Şekil 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.3. Çözeltiliye alma ısı işleminin şematik gösterimi.

Şekil 3.3'de belirtildiği üzere çözeltiliye alma ısı işleminin bütün numuneler için oda sıcaklığından 400 °C'a 3 °C/dak.'lık ısıtma hızı ile ısıtılmıştır. Numuneler 400 °C sıcaklıkta 16 saat bekletilmiştir. Çözeltiliye alma ısı işleminin tamamlanmasından sonra numunelerin bir kısmı havada bir kısmı da suda soğutulmuştur. Çözeltiliye alma ısı işleminin ardından numuneler yapay yaşlandırılmıştır (Şekil 3.4). Yapay yaşlandırma ısı işleminin 3 farklı sıcaklıkta (160 °C, 190 °C, 220 °C) ve 5 farklı sürede (1, 3, 6, 9, 12 saat) yapılmıştır.



Şekil 3.4. Yapay yaşlandırma ısıl işlemi aşamalarının şematik gösterimi.

Aynı çözeltiye alma ısıl işleminde olduğu gibi yapay yaşlandırma ısıl işleminde de numuneler istenilen sıcaklığa 3 °C/dak. ısıtma hızında ısıtılmıştır. Yapay yaşlandırmanın ardından bütün numuneler suda soğutulmuştur. Isıl işlemlerin yapıldığı Magmatherm MT1220 marka fırın Şekil 3.5’te verilmiştir.



Şekil 3.5. Çözeltiye alma ve yaşlandırma ısıl işlemlerinin yapıldığı Magmatherm (MT1220) fırınının görüntüsü.

Test ve analiz sonuçları kısmında numunelere ait sonuçların takibinde kolaylık olması açısından Çizelge 3.2’de her bir numuneye maruz kalmış olduğu işlemi ifade edecek şekilde bir kod verilmiştir. Üç bölümden oluşan kodlama sisteminin ilk bölümü F,H ve S harflerinin birinden oluşmaktadır. F, malzemenin işlem görmemiş

döküm (as cast) halini ifade etmektedir. H, numunenin çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduğunu; S ise, numunenin çözeltiliye almadan sonra suda soğutulduğunu ifade etmektedir. Harf karakterinin ardından gelen 3 basamaklı sayı karakteri ise yaşlandırma sıcaklıkları olan 160, 190 veya 220 °C'den oluşmaktadır. Tire işaretinin ardından gelen son kısım ise yaşlandırma sürelerini ifade etmektedir. Eğer numune yaşlandırmaya tabi tutulmamış ise yaşlandırma sıcaklığı ve süresini ifade eden karakterlerin tamamı 0 ile ifade edilmiştir.

Çizelge 3.2. Numunelere gördükleri işlemlere göre verilen kodlar ve açıklamaları.

Kod	Numune Bilgileri
F000-0	İşlem görmemiş döküm hali
S000-0	Çözeltiliye almadan sonra suda soğutulmuş
H000-0	Çözeltiliye almadan sonra havada soğutulmuş
S160-1	Suda soğutulmuş 160 °C'de 1 saat yaşlandırılmış
S160-3	Suda soğutulmuş 160 °C'de 3 saat yaşlandırılmış
S160-6	Suda soğutulmuş 160 °C'de 6 saat yaşlandırılmış
S160-9	Suda soğutulmuş 160 °C'de 9 saat yaşlandırılmış
S160-12	Suda soğutulmuş 160 °C'de 12 saat yaşlandırılmış
S190-1	Suda soğutulmuş 190 °C'de 1 saat yaşlandırılmış
S190-3	Suda soğutulmuş 190 °C'de 3 saat yaşlandırılmış
S190-6	Suda soğutulmuş 190 °C'de 6 saat yaşlandırılmış
S190-9	Suda soğutulmuş 190 °C'de 9 saat yaşlandırılmış
S190-12	Suda soğutulmuş 190 °C'de 12 saat yaşlandırılmış
S220-1	Suda soğutulmuş 220 °C'de 1 saat yaşlandırılmış
S220-3	Suda soğutulmuş 220 °C'de 3 saat yaşlandırılmış
S220-6	Suda soğutulmuş 220 °C'de 6 saat yaşlandırılmış
S220-9	Suda soğutulmuş 220 °C'de 9 saat yaşlandırılmış
S220-12	Suda soğutulmuş 220 °C'de 12 saat yaşlandırılmış
H160-1	Havada soğutulmuş 160 °C'de 1 saat yaşlandırılmış
H160-3	Havada soğutulmuş 160 °C'de 3 saat yaşlandırılmış
H160-6	Havada soğutulmuş 160 °C'de 6 saat yaşlandırılmış
H160-9	Havada soğutulmuş 160 °C'de 9 saat yaşlandırılmış
H160-12	Havada soğutulmuş 160 °C'de 12 saat yaşlandırılmış
H190-1	Havada soğutulmuş 190 °C'de 1 saat yaşlandırılmış
H190-3	Havada soğutulmuş 190 °C'de 3 saat yaşlandırılmış
H190-6	Havada soğutulmuş 190 °C'de 6 saat yaşlandırılmış
H190-9	Havada soğutulmuş 190 °C'de 9 saat yaşlandırılmış
H190-12	Havada soğutulmuş 190 °C'de 12 saat yaşlandırılmış
H220-1	Havada soğutulmuş 220 °C'de 1 saat yaşlandırılmış

Çizelge 3.2. (devam ediyor).

H220-3	Havada soğutulmuş 220 °C'de 3 saat yaşlandırılmış
H220-6	Havada soğutulmuş 220 °C'de 6 saat yaşlandırılmış
H220-9	Havada soğutulmuş 220 °C'de 9 saat yaşlandırılmış
H220-12	Havada soğutulmuş 220 °C'de 12 saat yaşlandırılmış

3.3. TEST VE ANALİZ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Isıl işlemler tamamlandıktan sonra AZ63 çubuklar 10 mm ve 90 mm olmak üzere iki parçaya kesildi. 10 mm'lik parçalar mikro yapı ve XRD analizi ve sertlik testleri için metalografik numune hazırlamaya tabi tutuldu. 90 mm'lik parçalardan ise çekme testleri için çekme numuneleri hazırlanmıştır.

Mikroyapı incelemeleri için standart metalografik işlemler yapıldı. Hazırlanan numuneler 1µm'luk alümina pasta ile parlatıldı. Parlatmadan sonra numune yüzeyi saf su ve alkol (etanol) ile temizlenerek kurutuldu. Zımpara ve parlatma işlemlerinin yapıldığı düzenek Şekil 3.6'da gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Zımpara ve parlatma işlemlerinin yapıldığı düzenek.

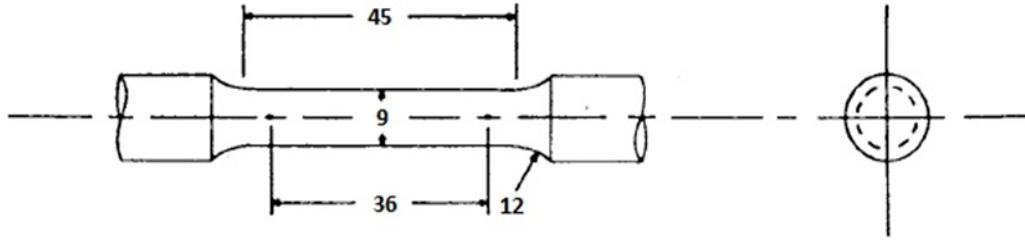
Metalografik olarak hazırlanan ve parlatılan numuneler Nital ve Asidik pikral ile dağlanmıştır. Bu dağlayıcılar magnezyum alaşımlarının genel mikro yapısının ortaya

çıkartılması için kullanılmaktadır [53]. Kullanılan Nital ve Asidik pikral'in bileşimleri Çizelge 3.3'de verilmiştir.

Çizelge 3.3. Nital ve asidik pikralin kimyasal bileşimi [53].

Dağlayıcı	Kimyasal Bileşim
1-0,5% Nital	1-0,5 ml yoğunlaştırılmış Nitrik Asit, 99-99,5 ml Etanol (%99,8)
Asidik Pikral	10 ml Asetik Asit, 4,2 g Pikrik Asit, 10 ml saf H ₂ O, 70 ml Etanol (%99,8)

ASTM B557-10 standardına göre hazırlanmış olan çekme testi numunelerinin boyutları Şekil 3.7'de verilmiştir [54].



Şekil 3.7. Çekme testi numunesi ve ölçüleri (Ölçüler mm cinsindedir).

3.4. SEM İNCELEMELERİ

Numunelerin mikro yapı incelemeleri için ULTRA PLUS (FESEM) taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır.



Şekil 3.8. Mikro yapı incelemelerinin yapıldığı SEM cihazı.

Farklı büyütmelelerde görüntüler alınarak mikro yapıdaki değişimleri en net ifade edebilecek görüntüler seçilmeye çalışılmıştır. Ayrıca mikro yapıda ortaya çıkan fazların ne olduklarının anlaşılabilmesi için de EDS analizi yapılmıştır. Şekil 3.8’de deneysel çalışmalarda kullanılan SEM cihazı görülmektedir.

3.5. XRD ANALİZİ

Numunelerin kristal yapısı ve oluşan fazların belirlenebilmesi için RIGUKA ULTRA IV XRD cihazı kullanılmıştır. Isıl işlem görmüş numunelerin XRD sonuçları AZ63 magnezyum alaşımının kokil döküm sonrası işlem görmemiş halinin XRD sonuçları ile karşılaştırılarak ısıtıl işlem neticesinde fazlar arasındaki değişimler belirlenmiştir. Bütün numunelerin kimyasal bileşimleri aynı olduğundan dolayı farklı koşulları (döküm hali, havada ve suda soğutma gibi) temsil eden 9 adet numune XRD de incelenmiştir. Şekil 3.9’da deneysel çalışmalarda kullanılan XRD cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.9 Deneysel çalışmalarda kullanılan XRD cihazı.

3.6. SERTLİK TESTİ

Numunelerin sertliklerinin ısıtıl işlem etkisiyle değişimini belirlemek için Shimadzu HMV mikro sertlik test cihazı kullanılmıştır. 5 N yük uygulanarak (10 sn). sertlik ölçümü yapılmıştır. Sertlikler değerleri, 5 farklı değerlerin ortalaması alınarak

belirlenmiştir. Şekil 3.10’da deneysel çalışmalarda kullanılan sertlik ölçüm cihazı görülmektedir.



Şekil 3.10. Sertlik ölçümlerinde kullanılan mikro sertlik test cihazı.

3.7. ÇEKME TESTİ

Isıl işlem koşullarının AZ63 magnezyum alaşımının akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve maksimum uzama miktarlarının üzerindeki etkilerinin anlaşılabilmesi için çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi TS EN ISO 6892-1-2010 standardı metod B’ye göre yapılmıştır. Şekil 3.11’de deneysel çalışmalarda kullanılan çekme test cihazı görüntüsü verilmiştir.



Şekil 3.11. Deneysel çalışmalarda kullanılan çekme test cihazının görüntüsü.

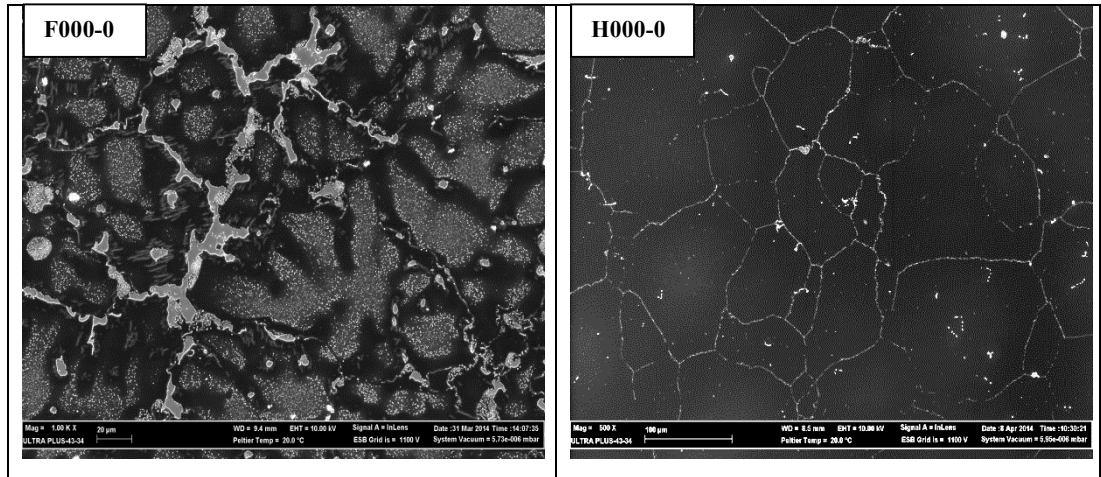
BÖLÜM 4

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

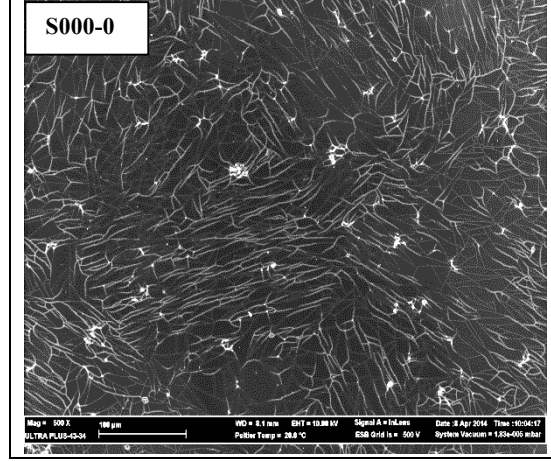
4.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

4.1.1. Çözeltiye Alma Isıl İşlemi Sonrası Oluşan Mikro Yapıların İncelenmesi

Bütün numunelere 400 °C’de 16 saat süre ile uygulanan çözeltiye alma işleminin AZ63 magnezyum alaşımının döküm halindeki yapısında bulunan fazların özellikle de $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının ana faz olan α -Mg matrisi içinde çözünmesi için yeterli olup olmadığı Şekil 4.1’de sunulan mikro yapı karşılaştırmaları ile belirlenmiştir.



Şekil 4.1. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ile çözeltiye alma ısıl işleminden sonraki mikro yapı SEM görüntüleri.

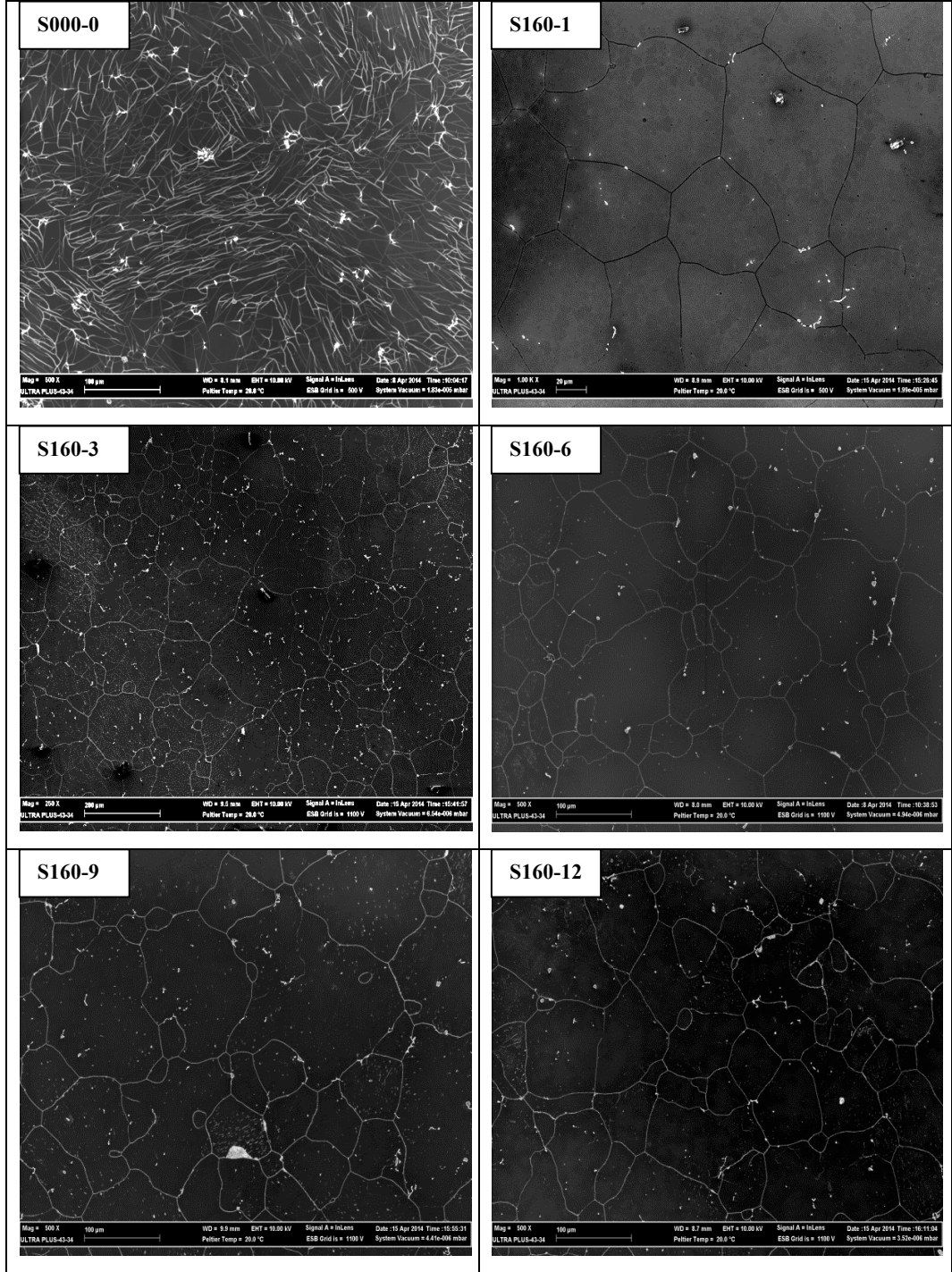


Şekil 4.1. (devam ediyor).

Yapılan karşılaştırma sonucunda çözeltiye alma işlemi koşullarının yeterli olduğu Şekil 4.1’de AZ63 magnezyum alaşımının döküm haline ait mikroyapı görüntüsündeki gösterilen fazların neredeyse tamamen kaybolması ile anlaşılmıştır. Yapılan mikro yapı analizlerinden havada soğutulan (H000-0) numunelerin suda soğutulan numunelere (S000-0) kıyasla daha iri taneli olduğu görülmüştür. Bunun nedeni suda soğutulmuş numunelerin daha hızlı soğuma hızına sahip olması ve tanelerin büyümek için yeterli enerji ve zamana sahip olamamasıdır.

4.1.2. Suda Soğutulup 160 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi

Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutularak 160 °C’de yapay yaşlandırılmış olan numunelerin mikro yapıları incelendiğinde, öncelikli olarak yapının tane sınırlarının çok daha belirginleştiği kararlı bir yapının oluştuğu anlaşılmaktadır. Artan yaşlandırma süresi ile birlikte tane sınırlarında ve tane içlerinde yer yer $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının çökelmeye başladığı görülmektedir. Yaşlandırma süresinin artması ile birlikte bu fazın yapı içindeki miktarında da artış olduğu belirlenmiştir. Suda soğutulup 160 °C’de yapay yaşlandırılmış seriye ait mikro yapı görüntüleri Şekil 4.2’de verilmiştir.

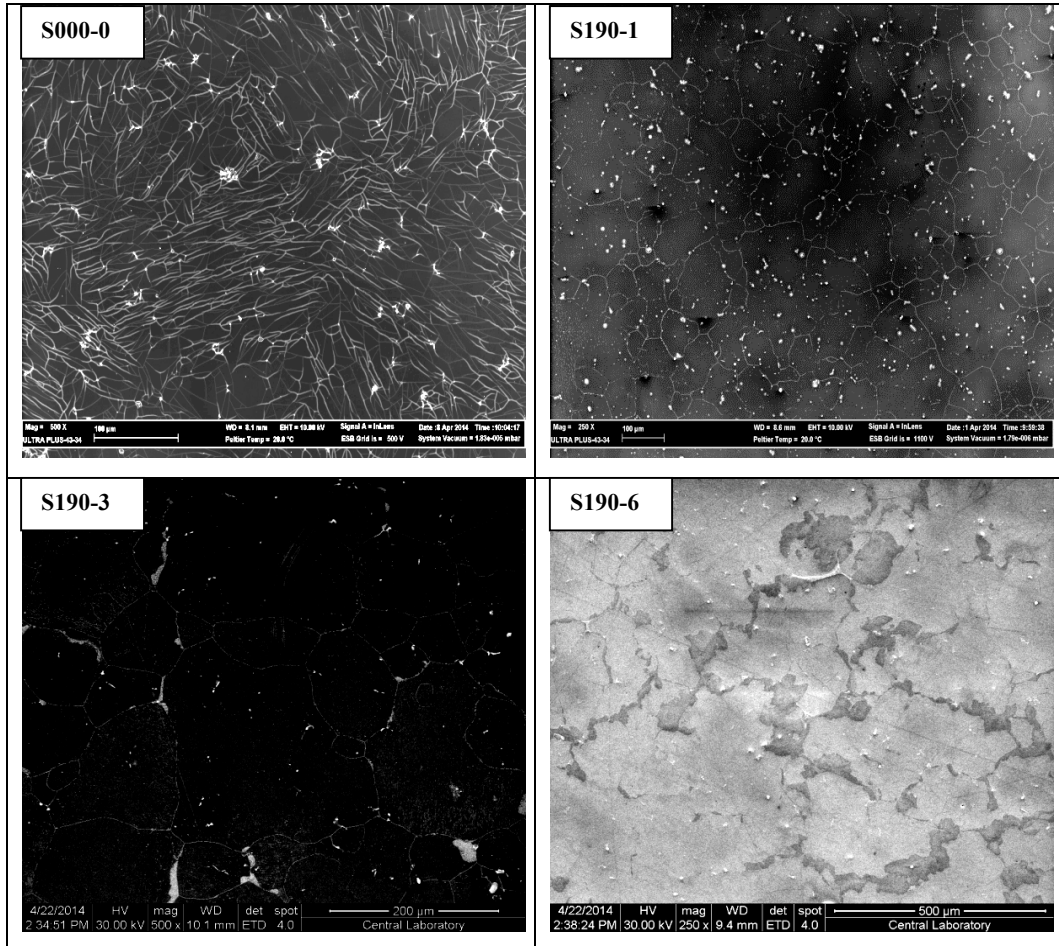


Şekil 4.2. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutulup 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları.

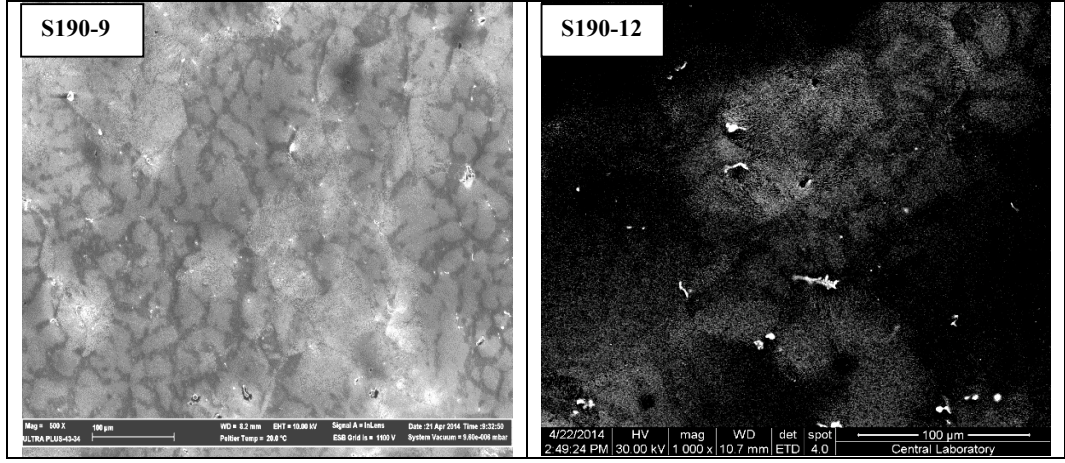
4.1.3. Suda Soğutulup 190 °C'de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi

Çözeltiye alma işleminden sonra 190 °C'de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları incelendiğinde (Şekil 4.3) belirgin tane sınırlarının görüldüğü kararlı yapının ortaya çıkmasıyla birlikte çökeltilerin de hem tane içlerinde hem de tane sınırlarında olduğu görülmektedir.

Yapay yaşlandırmanın ileri safhalarında ise tane sınırlarından tane içlerine doğru $Mg_{17}Al_{12}$ fazının oluştuğu belirlenmiştir. Yapay yaşlandırmanın sonlarına doğru ise bu yapının yaklaşık olarak tüm yapının tane sınırlarına yayıldığı anlaşılmaktadır.



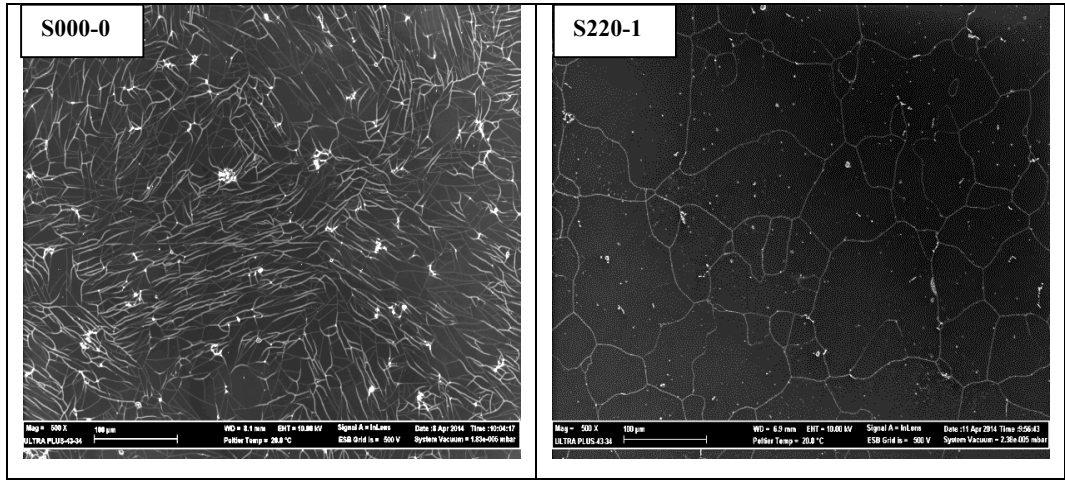
Şekil 4.3. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutulup 190 °C'de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapı SEM görüntüleri.



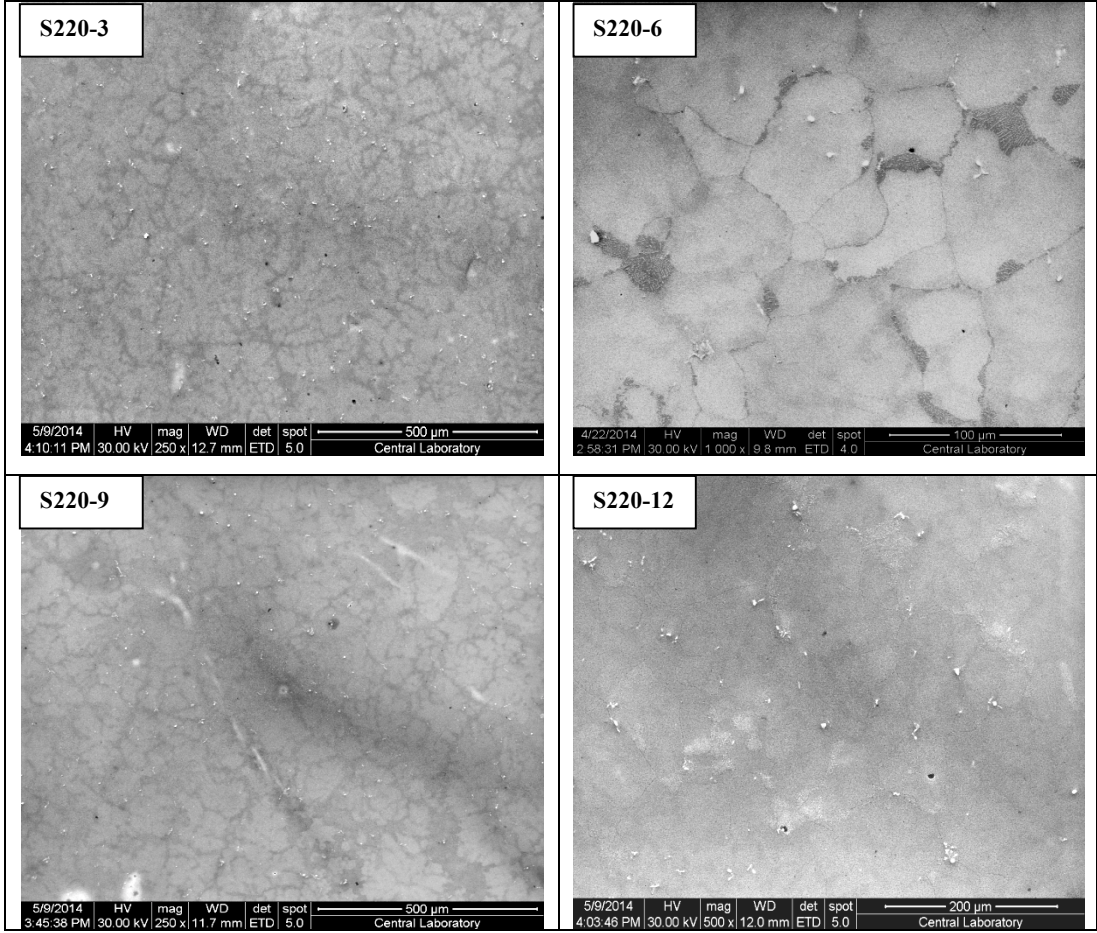
Şekil 4.3. (devam ediyor).

4.1.4. Suda Soğutulup 220 °C'de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi

Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra 220 °C'de yapay yaşlandırılan numunelerin mikro yapıları incelendiğinde (Şekil 4.4), 160 ve 190 °C'lerde yaşlandırılan numunelere göre, daha kaba taneli bir yapının oluştuğu gözlenmektedir.



Şekil 4.4. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutulup 220 °C'de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları.

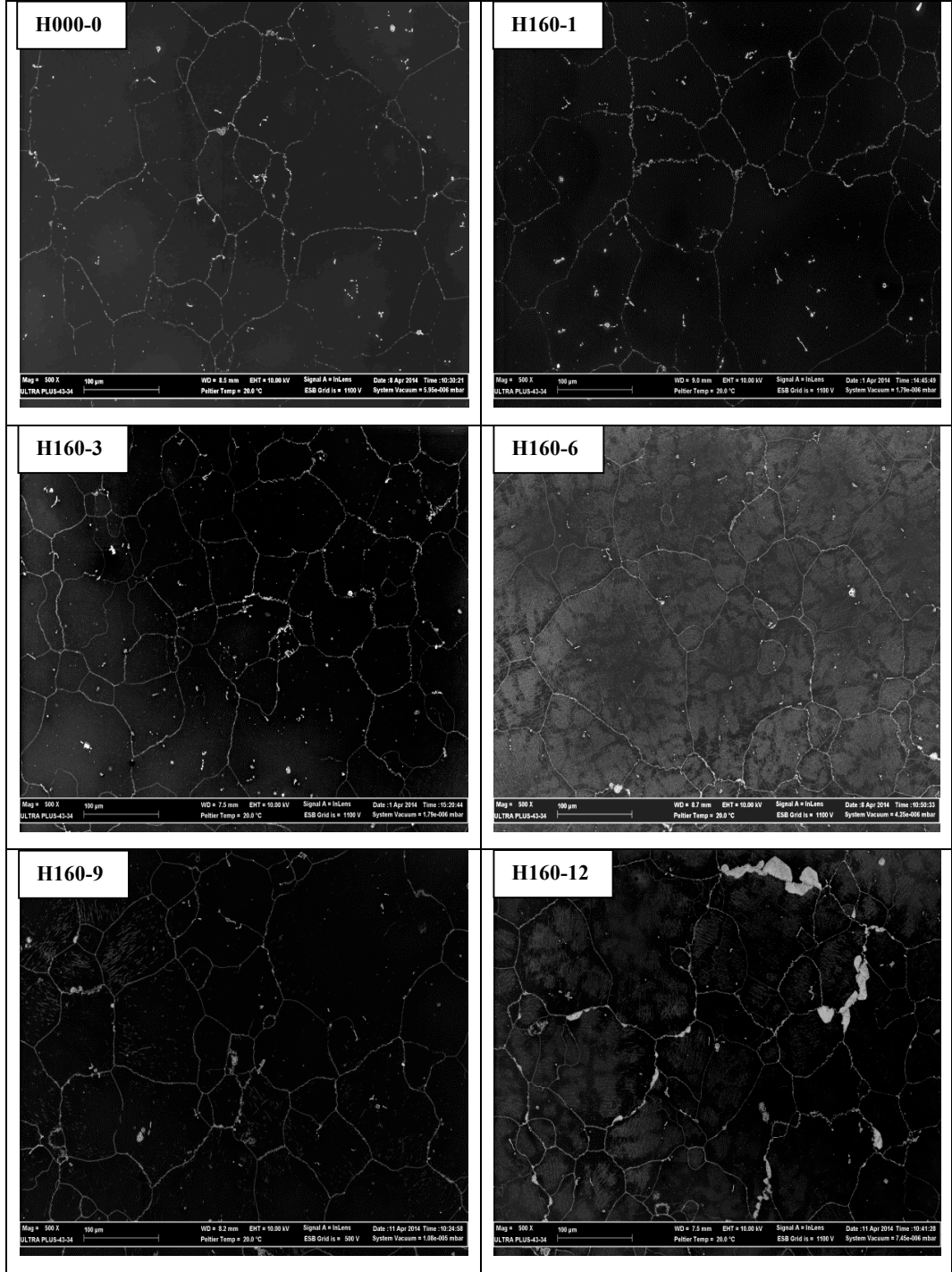


Şekil 4.4. (devam ediyor).

Yapay yaşlandırma sıcaklığının yüksek olması tane sınırlarının hareketin kolaylaştırıp tanelerin irileşmesine neden olmuştur. Bu seride de daha önceki yapay yaşlandırma serilerinde olduğu gibi tane içlerinde ve tane sınırlarında $Mg_{17}Al_{12}$ fazının çökelmeye başladığı, yaşlandırma süresinin artması ile birlikte tane sınırlarından tane içlerine doğru uzanan ince plakalı ötektik yapının α -Mg + $Mg_{17}Al_{12}$ olduğu tespit edilmiştir.

4.1.5. Havada Soğutulup 160 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi

Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra 160 °C’de yapay yaşlandırılmış olan numunelerin mikro yapıları incelendiğinde yapıda bir miktar da $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının tane sınırları ve tane içlerinde çökeldiği anlaşılmaktadır.



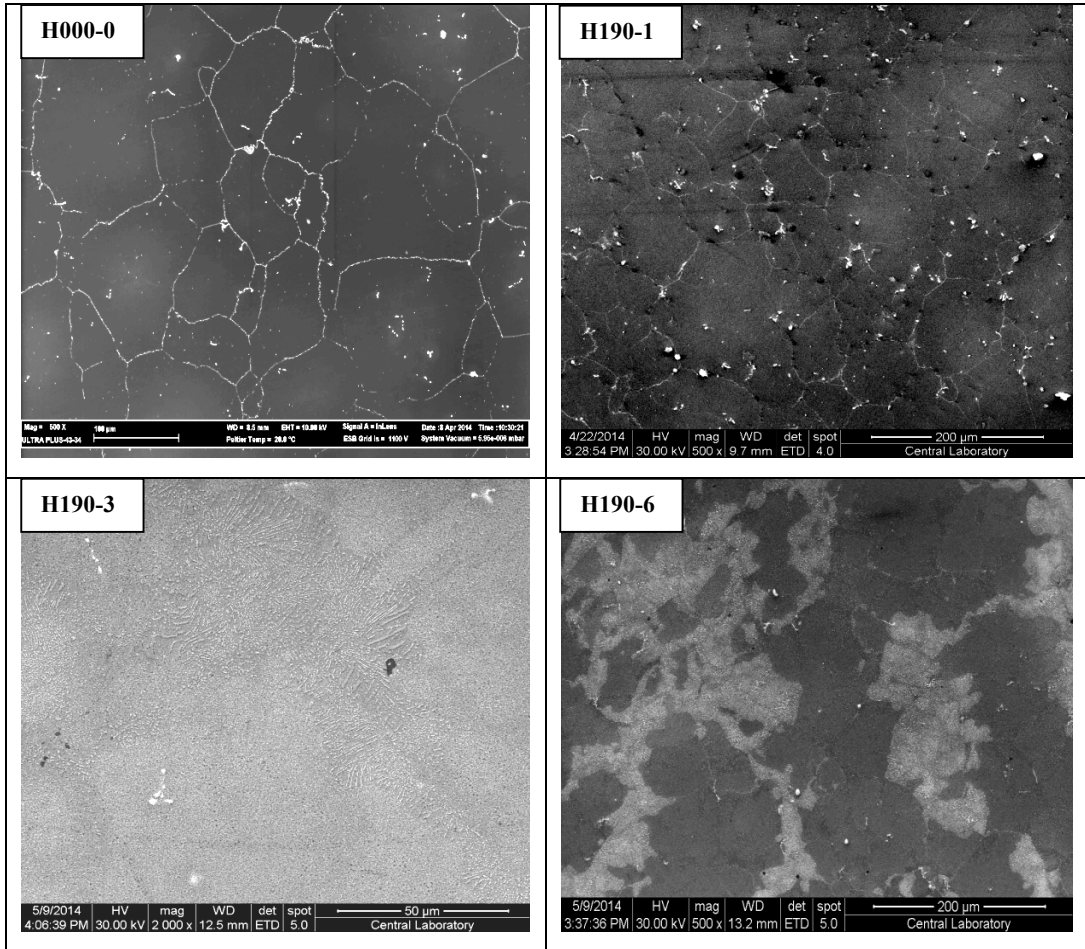
Şekil 4.5 Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra havada soğutulup 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapı SEM görüntüleri.

Şekil 4.5’te çözeltiye alma işleminden sonra havada soğutulup 160 °C’de yaşlandırılmış numunelerin mikro yapı görüntüleri verilmiştir. Çözeltiye alma işleminden sonra uygulanan soğutma işleminin yarı kararlı yapı oluşumu için yeterli süre olduğu için (yapay yaşlandırma sıcaklığının düşük olması) tane

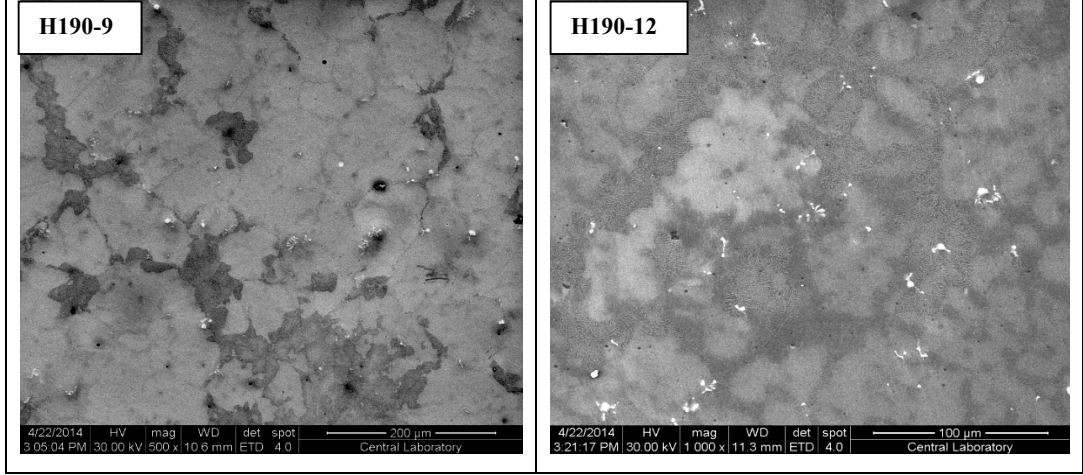
sınırlarından tane içlerine doğru uzanan ince plakalı ötektik yapının, α -Mg + $Mg_{17}Al_{12}$ ancak 6 saatten sonraki sürelerde oluştuğu anlaşılmaktadır.

4.1.6. Havada Soğutulup 190 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi

Çözeltiye alma işleminden sonra havada soğutulup 190 °C’de yapay yaşlandırılmış olan numunelerin mikro yapıları incelendiğinde (Şekil 4.6) yapay yaşlandırma sıcaklığının daha yüksek olmasından dolayı tane sınırlarından tane içlerine doğru uzanan ince plakalı ötektik yapının, α -Mg + $Mg_{17}Al_{12}$ daha düşük yaşlandırma sürelerinde oluştuğu anlaşılmaktadır. Bunun nedeni artan sıcaklıkla malzemeye verilen ısı enerjisini artmasıdır. Yapay yaşlandırma süresinin artmasıyla ötektik çökeltilerinin büyüdüğü ve tane sınırlarında konumlandığı görülmektedir.



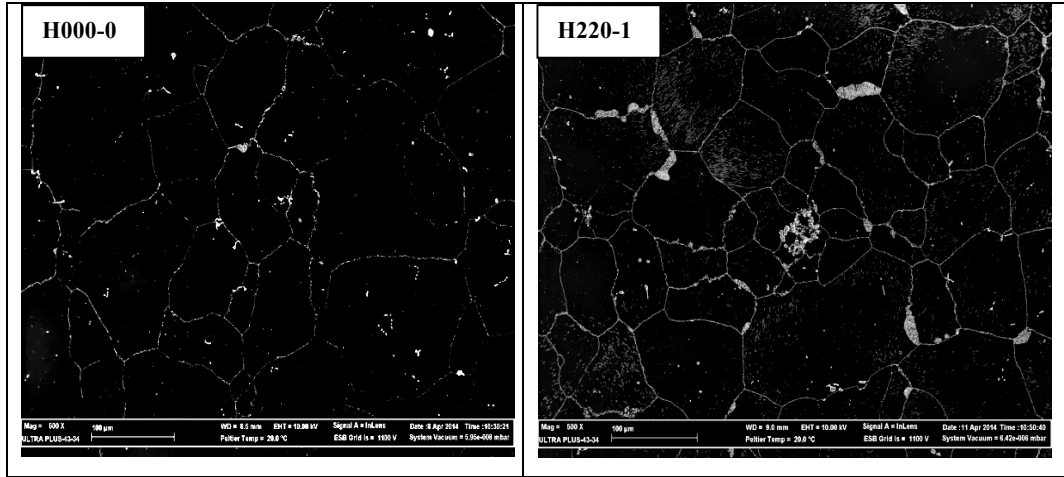
Şekil 4.6. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra havada soğutulup 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları.



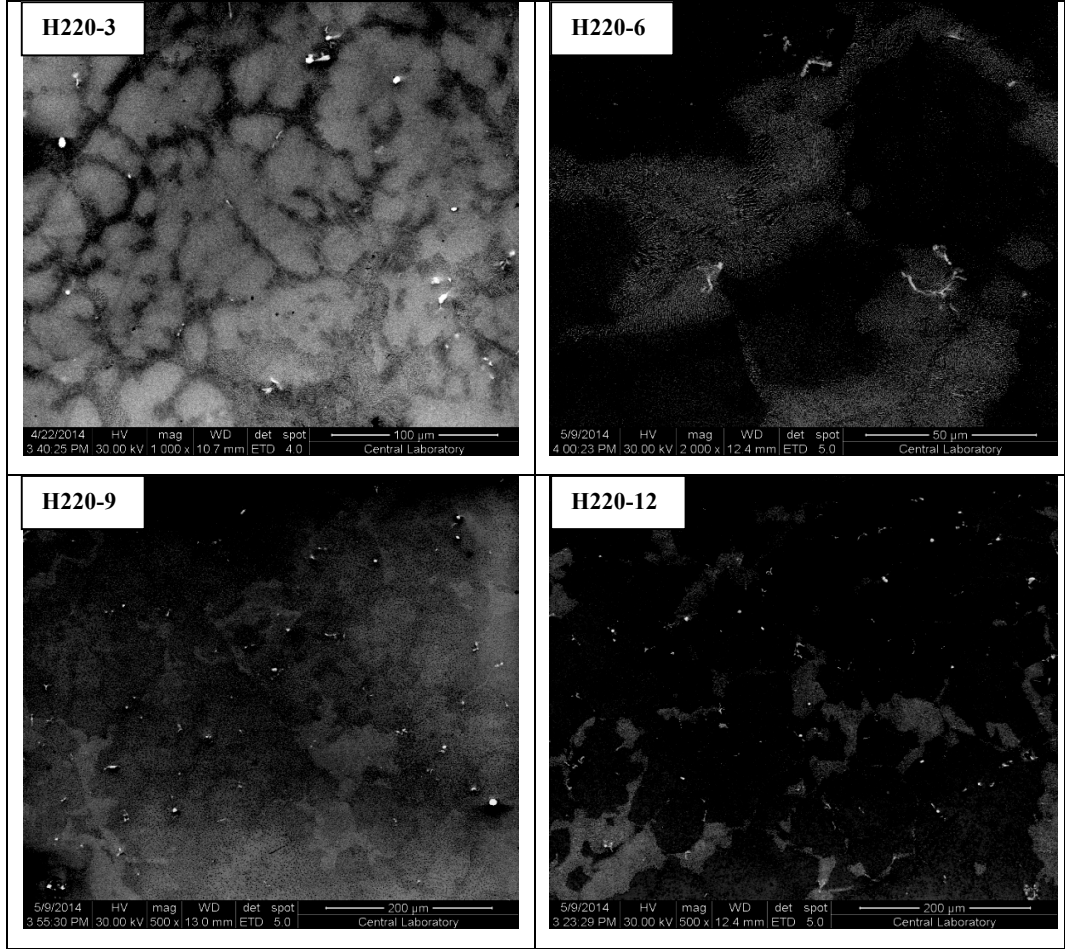
Şekil 4.6. (devam ediyor).

4.1.7. Havada Soğutulup 220 °C’de Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mikro Yapılarının İncelenmesi

Çözeltiye alma işleminden sonra havada soğutularak 220 °C’de yapay yaşlandırılmış olan numunelerin mikro yapıları incelendiğinde (Şekil 4.7), yüksek yapay yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak 1 saatten itibaren tane sınırlarından tane içlerine doğru uzanan ince plakalı ötektik yapı α -Mg + Mg₁₇Al₁₂ oluşmaya başlamıştır.



Şekil 4.7. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra havada soğutulup 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelerin mikro yapıları.



Şekil 4.7. (devam ediyor).

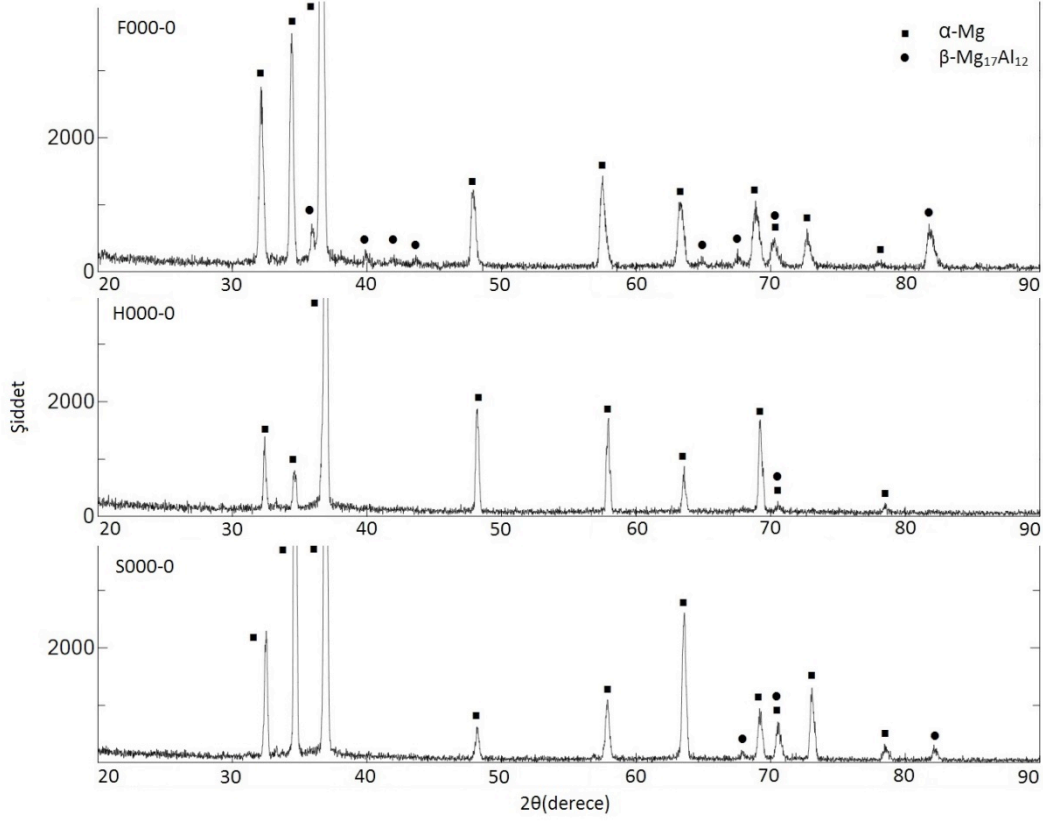
Yaşlandırma süresinin artması ile birlikte ötektik oranının (miktarının) arttığı ve adacıklar halinde tüm yapıya yayıldığı anlaşılmıştır (Şekil 4.7 H220-12).

4.2. XRD ANALİZ SONUÇLARI

4.2.1. Çözeltiye Alma Isıl İşlemi Sonrası XRD Analiz Sonuçlarının İncelenmesi

Çözeltiye alma işlemi koşullarının, AZ63 magnezyum alaşımının yapısında döküm sonrası yavaş soğumadan kaynaklanan çözünmesi için yeterli olduğunun anlaşılabilmesi için döküm hali ve çözeltiye alma işleminin ardından havada ve suda soğutulmuş olan numunelerin XRD sonuçları karşılaştırılmıştır (Şekil 4.8). XRD analizi neticesinde $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazına ait pikler belirlenmiştir. Bu piklerdeki çözeltiye alma ısıl işlemlerinin ardından meydana gelen değişimlere

bakılarak intermetalik fazın ana faz içinde çözünüp çözünmediği hakkında yorum yapılmaya çalışılmıştır.

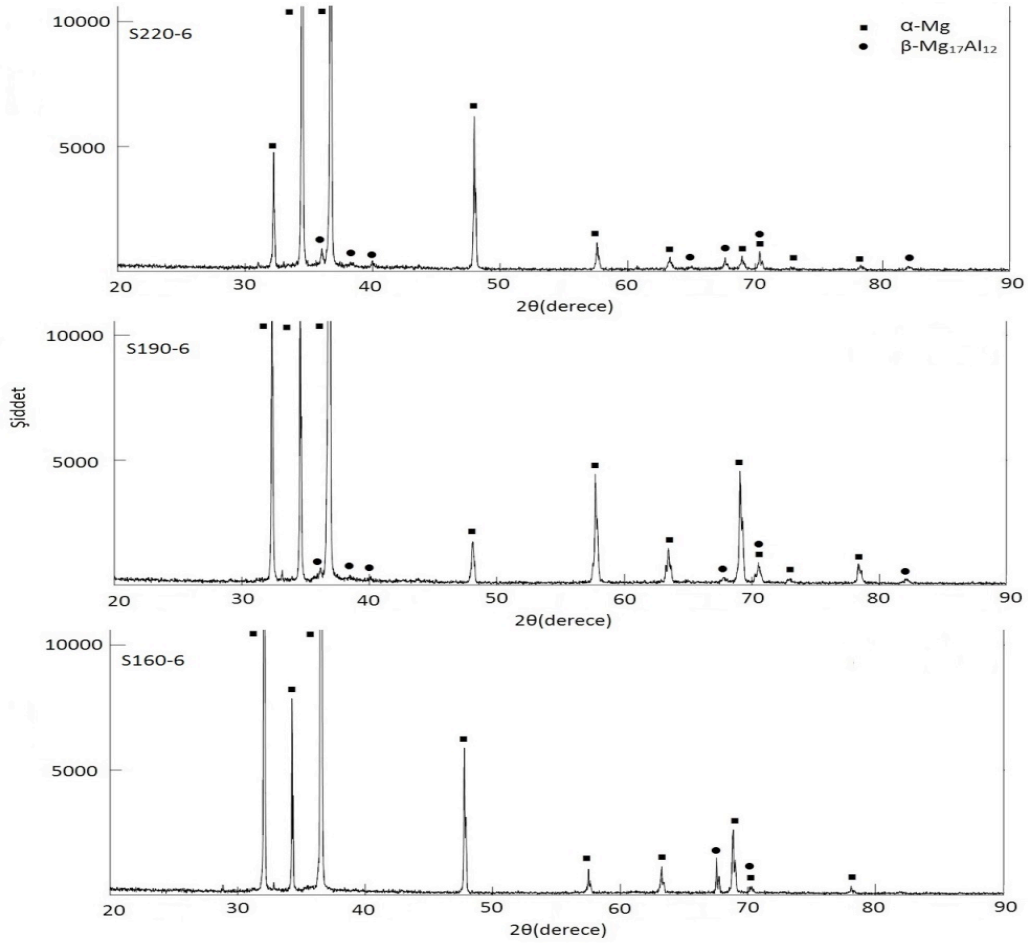


Şekil 4.8. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ile çözeltiye alma ısıl işleminden sonrası havada ve suda soğutulmuş numunelerin karşılaştırmalı XRD analiz sonuçları.

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi AZ63 magnezyum alaşımının döküm haline ait olan XRD analiz sonucunda Mg₁₇Al₁₂ intermetalik fazına ait olan piklerinin neredeyse tamamının çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada ve suda soğutulmuş numunelere ait XRD analiz sonuçlarında kaybolduğu gözlenmiştir. Böylelikle çözeltiye alma ısıl işlem koşulları olan 400 °C’de 16 saat bekletmenin AZ63 magnezyum alaşımı için yeterli olduğu anlaşılmıştır.

4.2.2. Suda Soğutulmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi

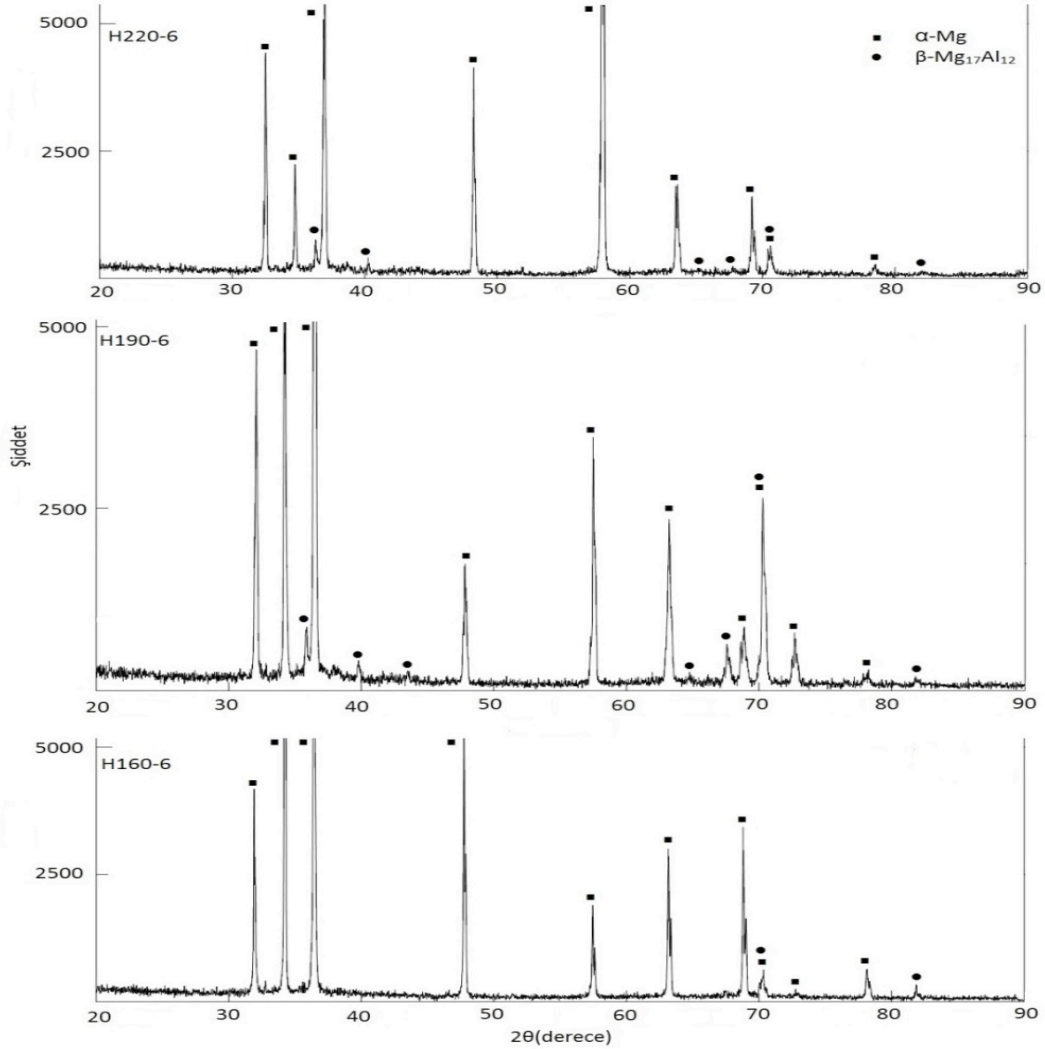
Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulmuş numunelerin yapay yaşlandırma koşullarındaki $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının tekrardan çökelp çökemediğinin tespiti için 160, 190 ve 220 °C’lerde 6’ar saat yapay yaşlandırılmış olan numunelere karşılaştırmalı XRD analizi yapılmıştır (Şekil 4.9). Bu analiz sonucunda yapay yaşlandırma sıcaklığının artışına bağlı olarak $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının çok daha hızlı çökeldeği belirlenmiştir. Aynı sürelerde yani 6 saat yapay yaşlandırmanın ardından 190 °C’deki numunede 160 °C’ye göre ve 220 °C’deki numunede de 190 °C’ye göre daha yoğun miktarda $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazına ait piklerin olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 4.9. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulmuş olan numunelerini 160, 190 ve 220 °C’lerde 6’ar saat yapay yaşlandırılmış olan numunelere ait karşılaştırmalı XRD analiz sonuçları.

4.2.3. Havada Soğutulmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin XRD Sonuçlarının İncelenmesi

Havada soğutulmuş numunelere de suda soğutulmuş numunelere benzer şekilde yapay yaşlandırma sıcaklıklarında 6 saat süre ile yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere XRD analizi yapılmıştır (Şekil 4.10). Suda soğutulmuş numunelerde olduğu gibi havada soğutulmuş numunelerde de yapay yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazına ait piklerde artış ve yoğunlaşma olduğu anlaşılmıştır.



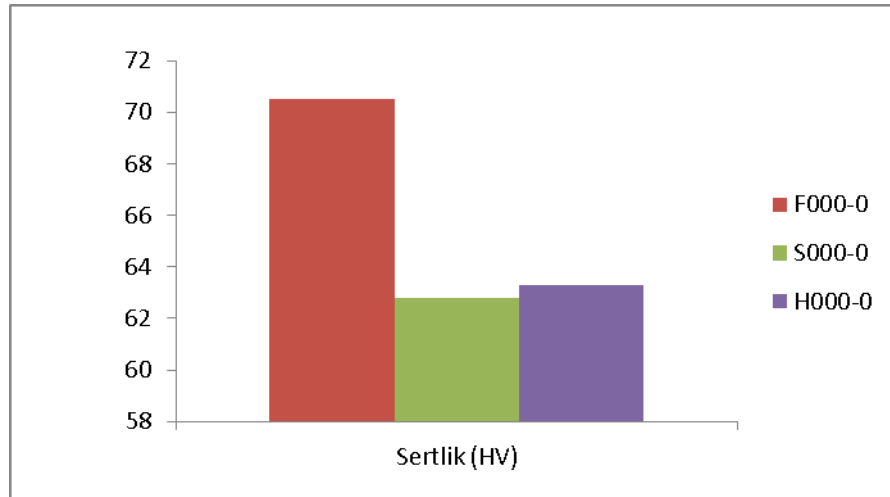
Şekil 4.10. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulmuş olan numunelerini 160, 190 ve 220 °C’lerde 6’ar saat yapay yaşlandırılmış olan numunelere ait karşılaştırmalı XRD analiz sonuçları.

Bu yapay yaşlandırmalara ait karşılaştırmalı XRD analiz sonuçları gösteriyor ki yapay yaşlandırma sıcaklıkları olan 160, 190 ve 220 °C'ler $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının tekrardan çökmesi için yeterli olan ısı enerjisi sağlamaktadır. Sıcaklık artışına bağlı olarak çökme hızı da artmaktadır.

4.3. SERTLİK TESTİ SONUÇLARI

4.3.1. Çözeltiye Alma İşleminin Sonraki Sertlik Değişimlerinin Karşılaştırılması

Uygulanan ısı işlem koşullarının uygun olduğu SEM ve XRD analizleri sonucu doğrulanmıştır. Uygulanmış olan ısı işlemlerin mekanik özelliklerine etkisinin belirlenmesi için bütün numunelere sertlik ve çekme testleri yapılmıştır. Sertlik testleri sonucunda AZ63 magnezyum alaşımının döküm halindeki sertliğinin 70,5 HV olduğu belirlenmiştir. Çözeltiye alma ısı işleminin ardından suda soğutulmuş olan numunenin sertliği 62,8 HV ve havada soğutulmuş numunenin sertliği ise 63,3 HV olarak belirlenmiştir. Buradan anlaşılacağı gibi intermetalik faz olan $Mg_{17}Al_{12}$ 'nin çözeltiye alma ısı işleminin ardından α -Mg içinde çözünmesiyle alaşım daha sünek bir yapıya kavuşmuştur.

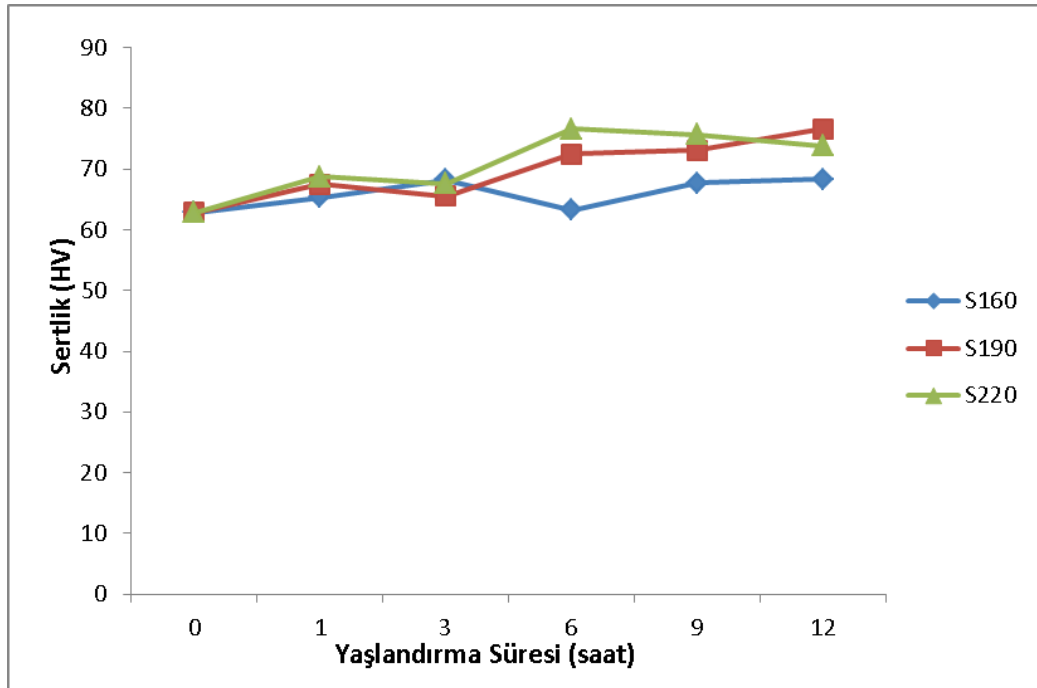


Şekil 4.11. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ile çözeltiye almadan sonra farklı şekillerde soğutulması sonucu elde edilen sertlik değerleri.

Havada soğutulmuş numunenin suda soğutulmuşa göre daha sert olmasının sebebi sert intermetalik faz olan $Mg_{17}Al_{12}$ 'nin yavaş soğuma hızından dolayı bir miktar çökelmiş olmasından kaynaklandığı söylenebilir. Şekil 4.11'de AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ve çözeltiye alma işleminden sonra havada ve suda soğutulmuş hallerinin sertlik değerleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

4.3.2. Suda Soğutmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Sertlik Değişimlerinin Karşılaştırılması

Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra suda soğutulan ardından yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelere ait sertlik dağılım grafiği Şekil 4.12'de verilmiştir. 160 °C'de yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan seriye bakacak olursak yaşlandırma süresinin sonuna kadar maksimum 5,6 HV bir artış olduğu görülmektedir. 190 C'de yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan seride ise bu artış yaklaşık 11,1 HV'dir. 220 °C'de yaşlandırılmış olan seride ise bu değer 13,8 HV'ye kadar çıkmaktadır.

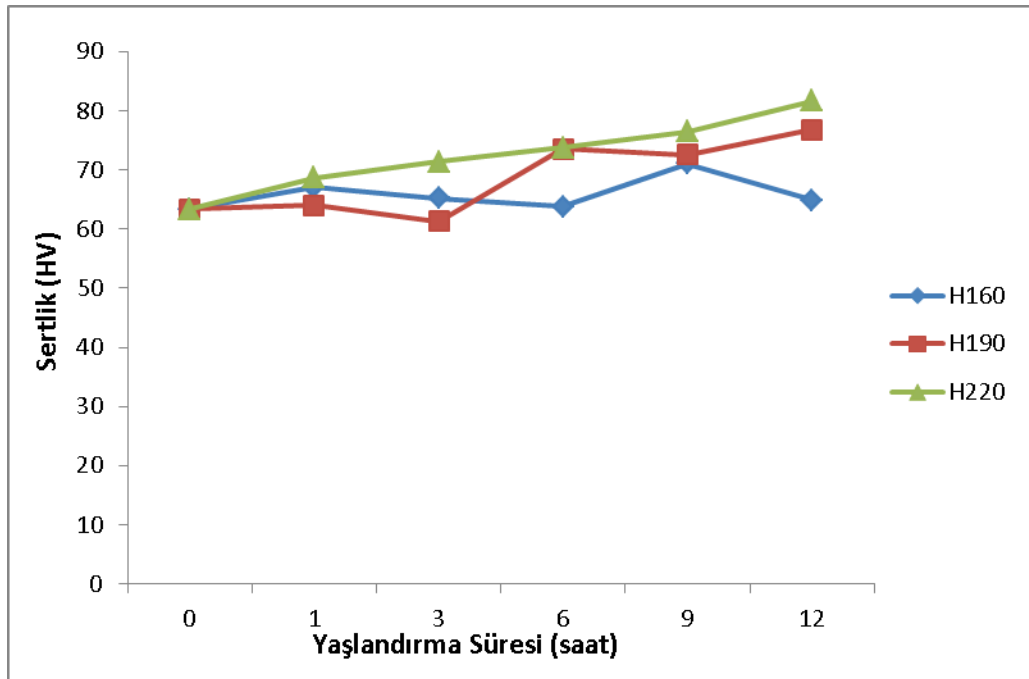


Şekil 4.12. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulan, farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde yapay yaşlandırılmış olan numunelerin sertlik değişimleri.

Genel olarak artan yaşlandırma süresi ile birlikte sertlik değerinin de artma eğiliminde olduğu söylenebilir. Grafikte gözlemlenen küçük dalgalanmaların ise ölçüm hatalarından kaynaklandığı düşünülebilir.

4.3.3. Havada Soğutulmadan Sonra Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Sertlik Değişimlerinin Karşılaştırılması

Çözeltiye alma ısıtma işleminden sonra havada soğutulan ardından yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelere ait sertlik dağılım grafiği Şekil 4.13’de verilmiştir. 160 °C’de yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan seriye bakacak olursak yaşlandırma süresinin sonuna kadar maksimum 9,2 HV bir artış olduğu görülmektedir. 190 C’de yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan seride ise bu artış yaklaşık 13,5 HV’dir. 220 °C’de yaşlandırılmış olan seride ise bu değer 18,4 HV’ye kadar çıkmaktadır.



Şekil 4.13. Çözeltiye alma ısıtma işleminin ardından havada soğutulan farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde yapay yaşlandırılmış olan numunelerin sertlik değişimleri.

Artan yaşlandırma süresine bağlı olarak suda soğutulduktan sonra yaşlandırmaya maruz bırakılmış numunelerde olduğu gibi havada oğutulan ve yapay yaşlandırılan

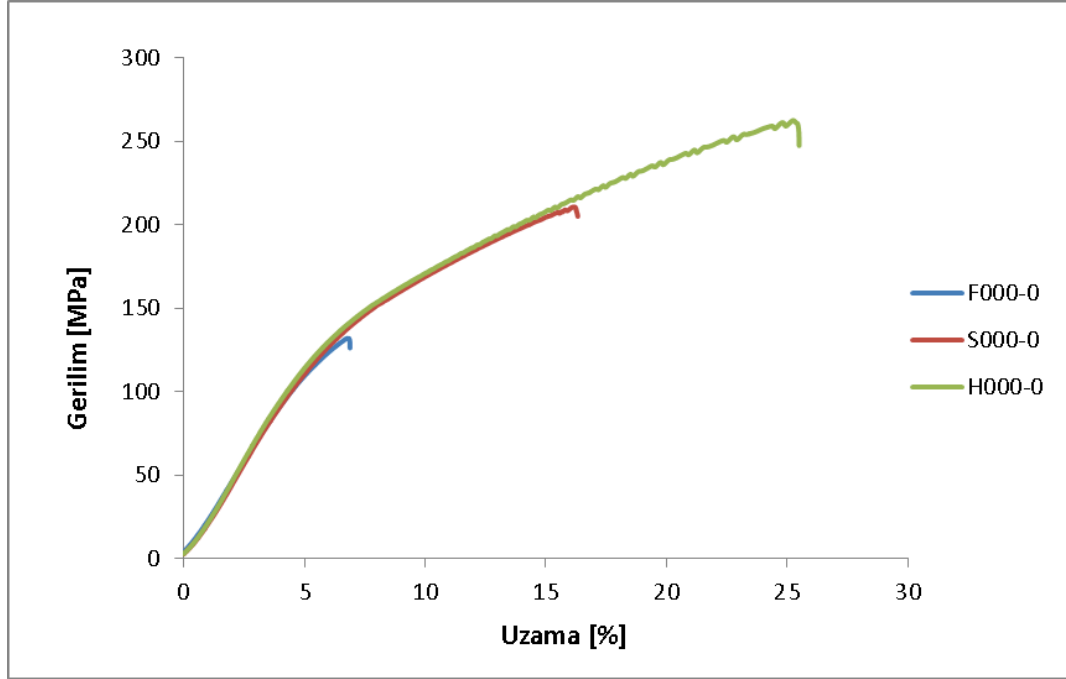
numunelerin sertlik değerlerinde de bir artış olduğu gözlenmiştir. Fakat sertlik değerlerindeki artış miktarının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Buna neden olarak çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından hava da soğutma esnasında oluşan küçük boyutlardaki $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının yapay yaşlandırma esnasında çekirdeklenme ve büyümeye katkıda bulunmuş olmasından kaynaklandığı söylenebilir.

4.4. ÇEKME TEST SONUÇLARI

4.4.1. Çözeltiliye Alma İşleminin Sonraki Mekanik Özellik Değişimlerinin Karşılaştırılması

AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali, çözeltiliye alma ısıl işleminden sonra suda ve havada soğutulmuş numunelere ait çekme testi sonucunda elde edilen karşılaştırmalı Gerilim-Uzama Grafiği Şekil 4.14'de verilmiştir. Ayrıca bu numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum yük altındaki toplam uzama ve sertlik değerlerinin toplu olarak gösterildiği Çizelge 4.1'de verilmiştir. Test sonuçları incelenecek olursa, döküm esnasında oluşan düzensiz $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve maksimum yük altındaki toplam uzama gibi mekanik özellikleri düşürdüğü Şekil 4.14'te verilmiş olan karşılaştırmalı grafikten anlaşılmaktadır.

Hem suda soğutulmuş hem de havada soğutulmuş numunelere ait test sonuçları incelendiğinde ise düzensiz $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının çözeltiliye alma ısıl işlemi ile birlikte α -Mg içinde çözünmesiyle akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve maksimum yük altındaki toplam uzama gibi mekanik özelliklerde gözle görülür bir artış olmuştur. Çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından malzemenin hem sünekliğinde hem de mukavemetinde belirgin bir artış olduğu çekme testlerinden anlaşılmıştır. Ayrıca çekme eğrilerinin altında kalan alan incelenecek olursa çözeltiliye alma işlemleri sonucunda malzemelerin tokluğunda önemli artış olduğu görülmektedir.



Şekil 4.14. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ve çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada ve suda soğutulmuş numunelere ait karşılaştırmalı Gerilim-Uzama grafiği.

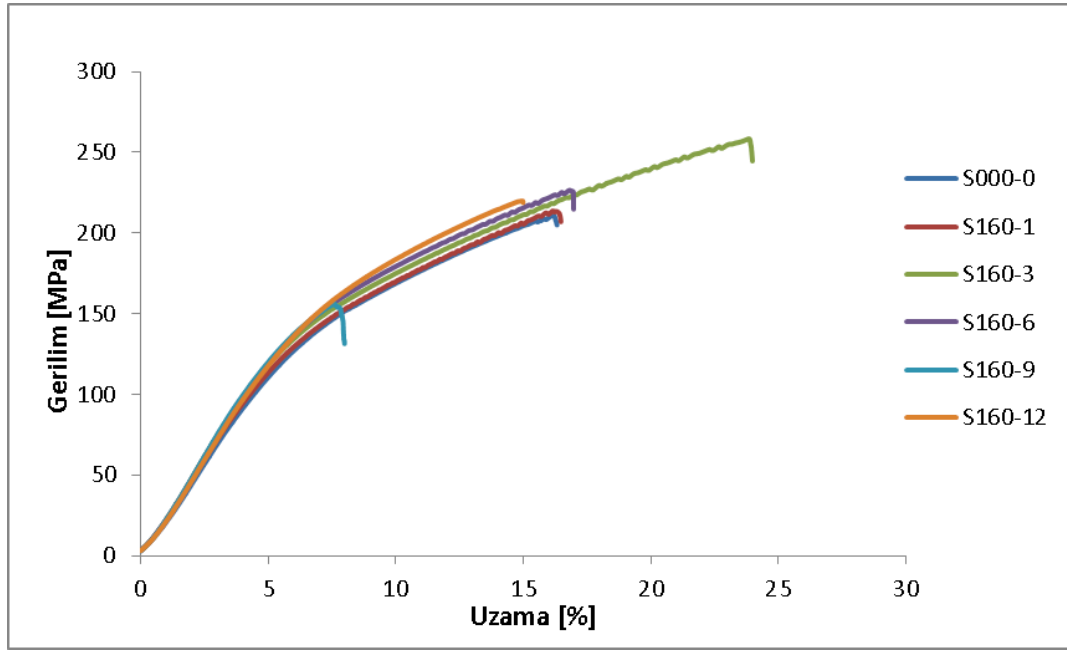
Çizelge 4.1. AZ63 magnezyum alaşımının döküm hali ve çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada ve suda soğutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzama (%)	Sertlik (HRV)
F000-0	132	132	6,8	70,5
S000-0	142	211	16,0	62,8
H000-0	141	262	25,3	63,3

Havada soğutulmuş ve suda soğutulmuş numuneler arasındaki belirgin farklılık ise havada soğutulmuş numunelerde düşük miktarda çökelen intermetalik fazın mekanik özelliklere etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Bilindiği gibi ikincil fazların şekli, boyutu, miktarı ve dağılımı mekanik özellikleri etkilemektedir.

4.4.2. Suda Soğutma Sonrası Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mekanik Özellikleri

Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulduktan sonra 160 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafikleri Şekil 4.15’te ve bu numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum yük altındaki toplam uzama ve sertlik değerlerinin toplu olarak gösterildiği tablo Çizelge 4.2’de verilmiştir.



Şekil 4.15. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutup 160 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.

Grafik incelendiğinde farklı sürelerde yapay yaşlandırılmış numunelerin gerilme-uzama eğrilerinin benzer özellikler gösterdiği; yaşlandırma süresi ile birlikte akma dayanımında küçük artışların olduğu, yalnızca 3 saat ve 9 saat süre ile yaşlandırılmış olan numunelerin çekme dayanımlarında ve yüzde uzamalarında farklılıklar olduğu görülmüştür. 9 saat süre ile yaşlandırılmış olan numunenin bu kadar düşük mekanik özellikler göstermesinin sebebi ise döküm esnasında oluşan kusurlardır. 3 saat süre ile yaşlandırılmış olan numunenin bu kadar üstün mekanik özellikler göstermesinin sebebi ise daha ince taneli yapıya sahip olmasıdır.

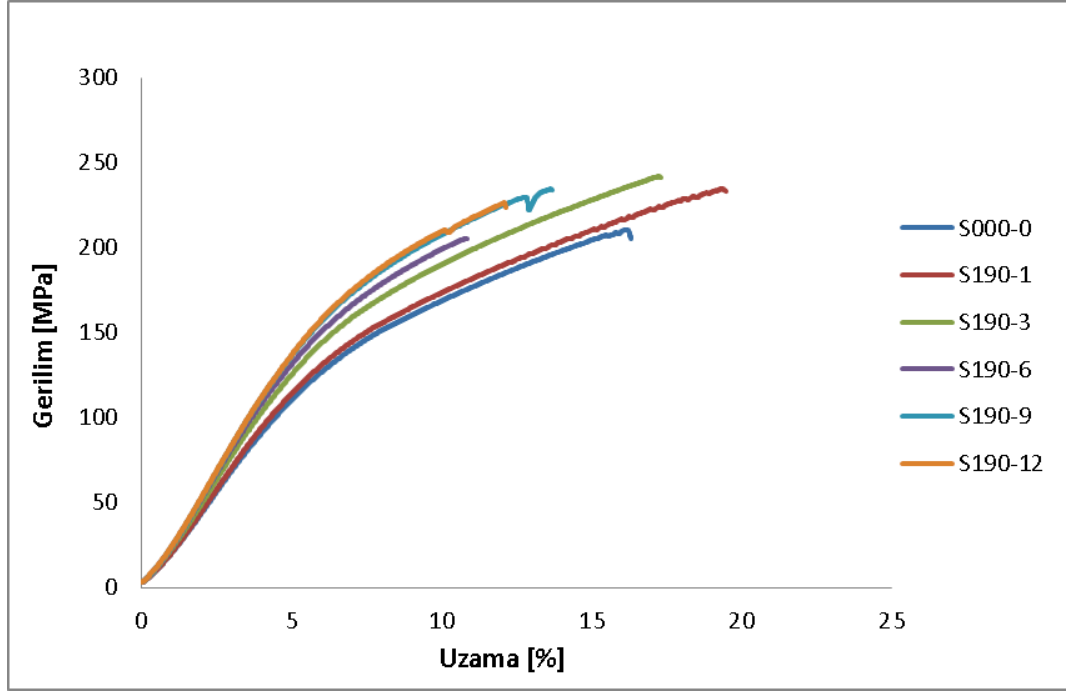
Bilindiği gibi tane sınırları deformasyona direnç göstererek mukavemet artışına neden olmaktadır. Tane boyutunun küçülmesi ile artan toplam tane sınır alanı mukavemeti artırmaktadır.

Çizelge 4.2. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutup 160 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzama (%)	Sertlik (HRV)
S000-0	142	211	16,0	62,8
S160-1	141	214	16,2	65,3
S160-3	142	258	23,8	68,2
S160-6	143	226	16,8	63,3
S160-9	143	156	7,6	67,7
S160-12	145	220	14,8	68,4

Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulduktan sonra 190 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği Şekil 4.16’da ve bu numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum yük altındaki toplam uzama ve sertlik değerlerinin toplu olarak gösterimi Çizelge 4.3’te verilmiştir.

160 °C’de yaşlandırılmış numunelere ait eğrilere nazaran 190 °C’de yaşlandırılmış numunelere ait eğrilerin birbirinden belirgin şekilde ayrılmaya başladığı, daha yüksek akma değerlerine ve daha yüksek sertliğe sahip olduğu Çizelge 4.3’te sunulan değerlerden görülmektedir. Ayrıca çizelgede sunulan toplam şekil değişimlerine bakıldığında 160 C’deki yaşlandırmalarda en düşük uzama %7,6 iken 190 C’de en düşük uzamanın %10,5 olduğu görülmektedir. Bu da 190 C’deki yaşlandırmaların sonucunda malzemenin akma dayanımı ile birlikte sünekliğinde de iyileşmeler olduğu anlamına gelmektedir. Çizelge 4.3’teki sertlik değerlerindeki trende bakacak olursak malzemenin 6 saatlik yaşlandırmadan itibaren çok daha sert bir yapıya kavuştuğu görülmektedir.



Şekil 4.16. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulduktan sonra 190 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.

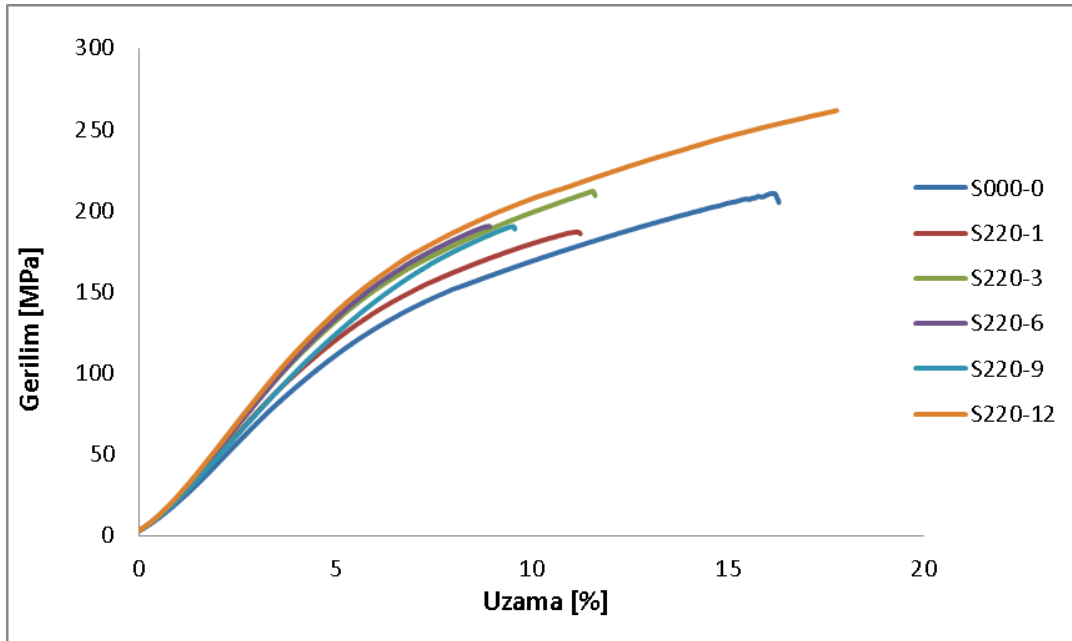
Çizelge 4.3. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından suda soğutup 190 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzama (%)	Sertlik (HRV)
S000-0	142	211	16,0	62,8
S190-1	142	235	19,3	67,5
S190-3	146	242	17,2	65,5
S190-6	148	205	10,5	72,5
S190-9	151	235	13,6	73,1
S190-12	152	227	12,1	76,6

190 C yaşlandırılmış numuneler ile 220 C’de yaşlandırılmış numunelerin mekanik özellikleri karşılaştırıldığında akma dayanımlarının benzer olduğu fakat 220 °C 12 saat yaşlandırılmış numune haricindeki diğer numunelerin çekme dayanımı ve maksimum yük altındaki toplam uzamalarında önemli düşmelerin olduğu şekil ve çizelgelerde sunulan verilerden anlaşılmaktadır. Bunun nedeni artan yaşlandırma sıcaklığı ile birlikte çökelen intermetalik fazın miktarı ve boyutu ile ilgili olduğu

düşünülmektedir. 12 saatte daha yüksek değerler göstermesinin nedeni ise aşırı yaşlanmadan kaynaklandığı düşünülmemektedir. Bu durum Şekil 4.6'daki bu numunelere ait mikroyapı görüntülerinde intermetalik fazın tane sınırlarından tane içlerine uzanan ötektik plakalar şeklinde değilde ötektik adacıklar şeklinde yapının belirli bölgelerinde birikmesiyle açıklanabilir. Örneğin 220 °C yaşlandırılmış numunelerin sertlik değerlerine bakacak olursak artan yaşlandırma süresi ile birlikte sertlik artarken 9 saatten 12 saate geçildiğinde sertliğin düştüğü görülmektedir. Sertlikteki bu düşüşün aşırı yaşlanmadan kaynaklandığı ve sünekliğe katkıda bulunduğu düşünülmemektedir.

Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulduktan sonra 220 °C'de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği Şekil 4.17'de ve bu numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum yük altındaki toplam uzama ve sertlik değerlerinin toplu olarak gösterimi Çizelge 4.4'te verilmiştir.



Şekil 4.17. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından suda soğutulduktan sonra 220 °C'de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.

Çizelge 4.4. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından suda soğutup 220 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzama (%)	Sertlik (HRV)
S000-0	142	211	16,0	62,8
S220-1	143	187	11,1	68,8
S220-3	148	212	11,5	67,6
S220-6	149	190	8,9	76,6
S220-9	149	190	9,5	75,7
S220-12	150	262	17,8	73,9

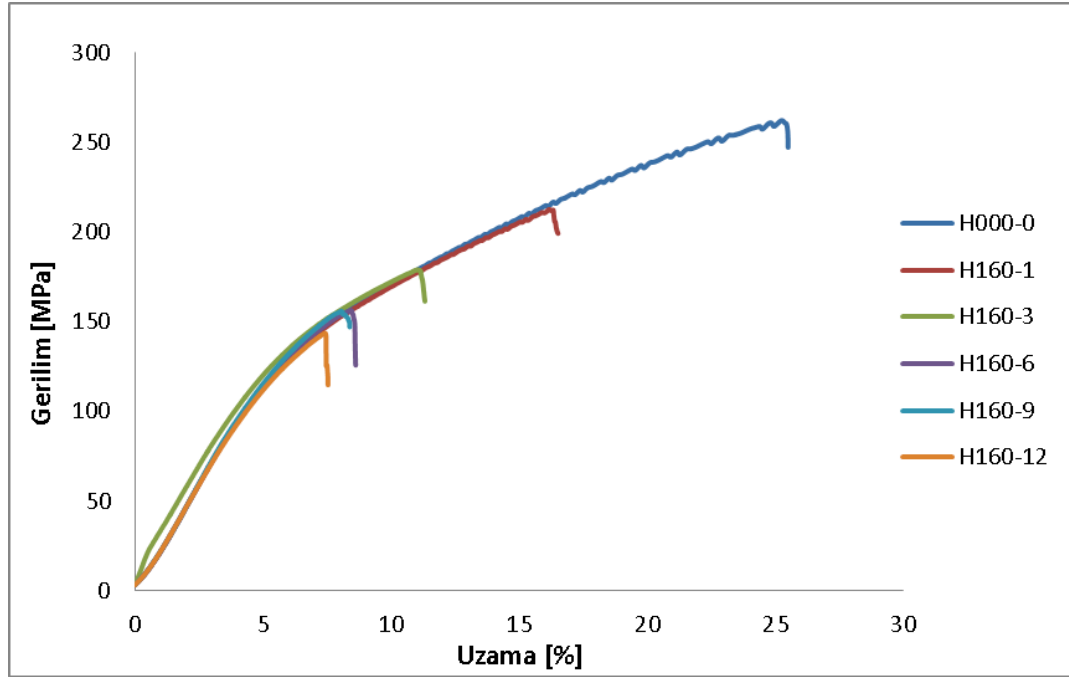
Genel olarak bu yaşlandırma sıcaklığındaki numunelerinde 190 °C’de yaşlandırılmış olan numuneler ile benzer özellikler gösterdiği anlaşılmıştır. Yaşlandırma süresinin artması ile birlikte süneklik ve mukavemetlerde azalmalar meydana gelmiştir. Grafik eğrilerindeki küçük çaplı farklılıkların ve düzensizliklerin malzemenin üretim safhalarında meydana gelen hatalardan kaynaklandığı söylenebilir.

4.4.3. Havada Soğutma Sonrası Farklı Sıcaklıklarda Yapay Yaşlandırılmış Numunelerin Mekanik Özellikleri

Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 160 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği Şekil 4.18’de ve bu numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum yük altındaki toplam uzama ve sertlik değerlerinin toplu olarak gösterimi Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Numunelerin süneklik ve çekme mukavemetlerinde yaşlandırma süresindeki artışa bağlı olarak kademeli olarak azalmanın meydana geldiği görülmektedir. Akma mukavemetinde ise artan yaşlandırma süresi ile birlikte hafif artışlar olmuştur. Bunun neticesinde grafiğin altında kalan alanın azalması ile birlikte malzemenin tokluğunun yaşlandırma süresine bağlı olarak düştüğü grafik ve tablodan elde edilen verilerden anlaşılmaktadır. Çekme mukavemeti ve maksimum yük altındaki

toplam uzamalardaki bu düşümlere yapıda çökelen intermetalik fazın miktarının yaşlandırma süresi ile birlikte artmasının neden olduğu söylenebilir. Artan yaşlandırma süresi ile beraber malzemenin sünekliği önemli miktarda düşerken sertliğinin arttığı çizelgede sunulan değerlerden anlaşılmaktadır. Bir başka değişle malzeme yaşlandırma süresinin artması ile sertleşirken sünekliği azalmıştır.

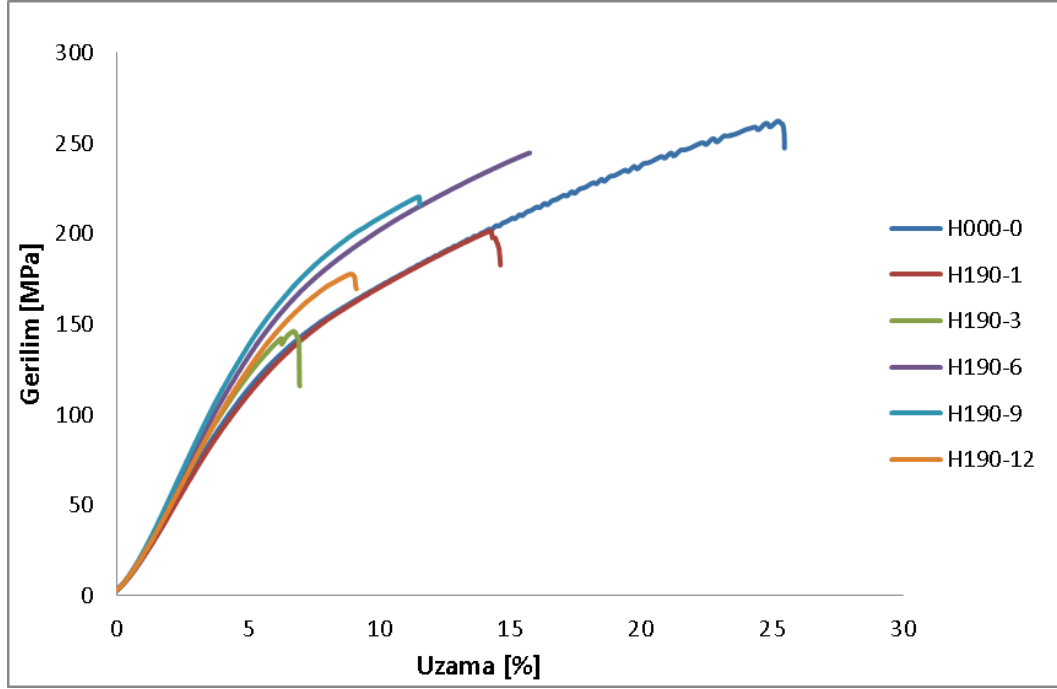


Şekil 4.18. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 160 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.

Çizelge 4.5. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından havada soğutup 160 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzama (%)	Sertlik (HRV)
H000-0	141	262	25,3	63,3
H160-1	141	213	16,2	67,0
H160-3	142	179	11,0	65,1
H160-6	142	156	8,3	63,7
H160-9	142	156	8,0	71,1
H160-12	144	144	7,4	64,9

Çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 190 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği Şekil 4.19’da ve bu numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum yük altındaki toplam uzama ve sertlik değerlerinin toplu olarak gösterimi Çizelge 4.6’da verilmiştir.



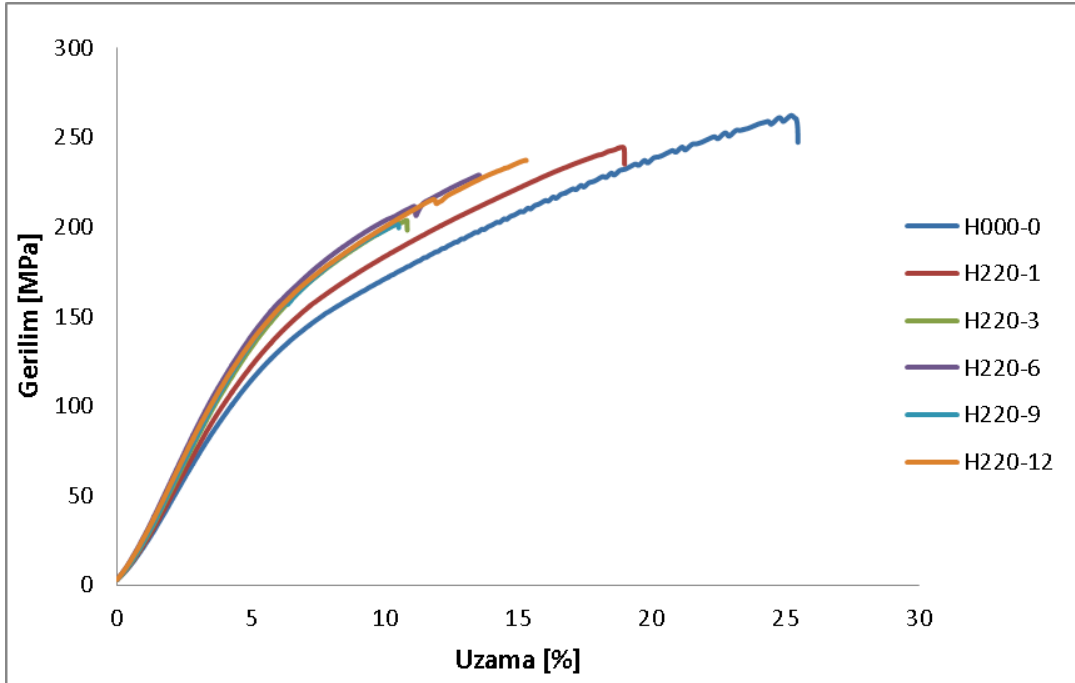
Şekil 4.19. Çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 190 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.

Çizelge 4.6. Çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından havada soğutup 190 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi.

Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzama (%)	Sertlik (HRV)
H000-0	141	262	25,3	63,3
H190-1	138	202	14,3	64,0
H190-3	142	146	6,4	61,2
H190-6	142	245	15,7	73,6
H190-9	143	221	11,4	72,5
H190-12	141	178	8,9	76,8

Bu veriler 160 °C’de yaşlandırılmış olan numunelerin verileri ile karşılaştırıldığında akma mukavemetlerinde belirgin bir değişikliğin olmadığı, artan yaşlandırma süresi ile birlikte sertlikte de önemli artışların olduğu görülmektedir.

Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 220 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği Şekil 4.20’de ve bu numunelere ait akma mukavemeti, çekme mukavemeti, maksimum yük altındaki toplam uzama ve sertlik değerlerinin toplu olarak gösterimi Çizelge 4.7’de verilmiştir.



Şekil 4.20. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından havada soğutulduktan sonra 220 °C’de farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait Gerilim-Uzama grafiği.

Çözeltiyeye alınmış numuneye kıyasla 220 °C’de yaşlandırılmış olan numunelerin Akma dayanımlarında belirgin değişikliğin olmadığı, sertliğinde önemli artışların olduğu ve buna karşılık çekme dayanımı sünekliğinin düştüğü % uzama değerlerinden anlaşılmaktadır. Fakat artan çekme dayanımı ile beraber yüzde uzamanın da beraber artmaktadır. Yaşlandırma ile beraber malzemenin çekme dayanımı ve sertliği artarken sünekliğinin düştüğü görülmektedir. 190 °C ile

kıyaslanacak olursa 220 °C’de yaşlandırılmış olan numunelerin akma dayanımlarının benzer olduğu sertliklerinin ise artan yaşlandırma süresi ile arttığı belirlenmiştir.

Çizelge 4.7. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından havada soğutup 220 °C farklı sürelerde yapay yaşlandırmaya tabi tutulmuş numunelere ait mekanik test sonuçlarının toplu halde gösterimi.

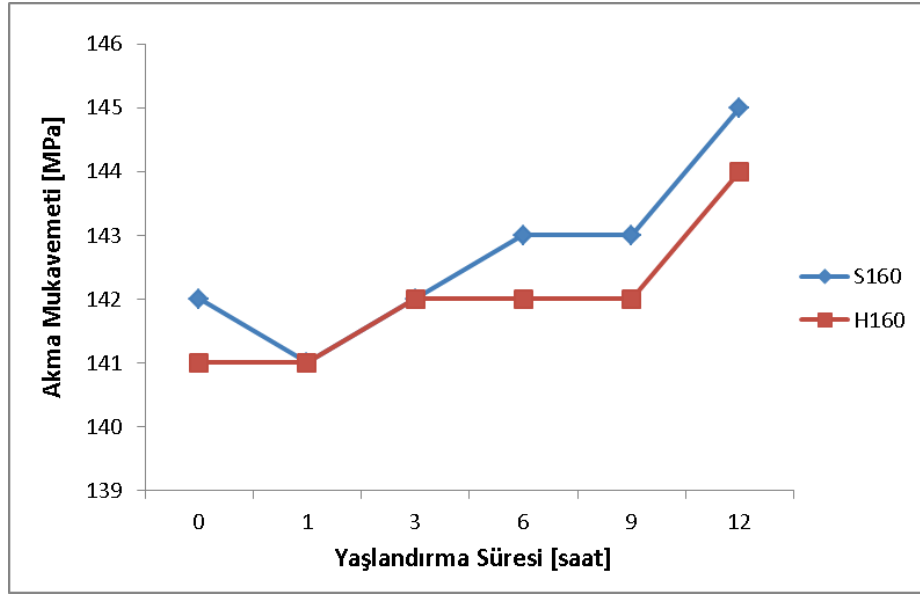
Numune	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzama (%)	Sertlik (HRV)
H000-0	141	262	25,3	63,3
H220-1	139	245	18,9	68,9
H220-3	141	204	10,8	71,4
H220-6	141	229	13,5	73,8
H220-9	142	201	10,4	76,5
H220-12	141	237	15,2	81,7

4.4.4. Çözeltiye Alma Isıl İşleminin Sonra Havada ve Suda Soğutmanın Aynı Sıcaklıkta Yapay Yaşlandırılmış Numunelerdeki Mekanik Özelliklere Etkisi

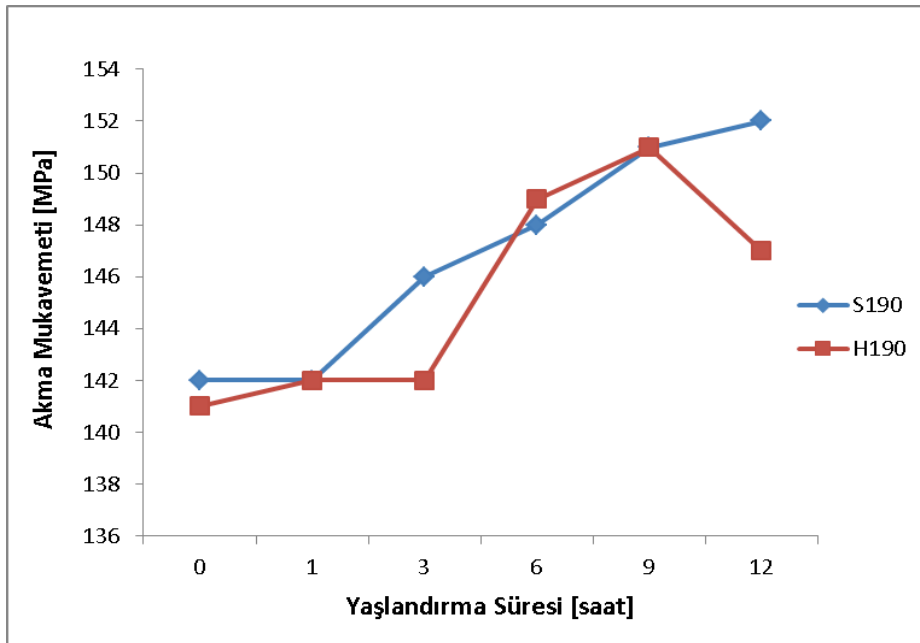
4.4.4.1. Akma Mukavemetine Etkisinin Karşılaştırılması

AZ63 magnezyum alaşımına uygulanan çözeltiye alma ısıl işleminin ardından uygulanan yapay yaşlandırmanın akma mukavemeti üzerinde yaşlandırma süresinin artması ile birlikte artma yönünde bir etki yaptığı söylenebilir. Bazı grafiklerde gözlemlenen akma mukavemeti değerlerinde sabit kalma ya da azalma yönündeki eğilimlerin malzemenin üretim aşamasında meydana gelmiş olabilen hatalardan kaynaklandığı söylenebilir. Çözeltiye alma ısıl işleminden sonra yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak akma mukavemetlerindeki değişimleri gösteren grafikler Şekil 4.21, Şekil 4.22 ve Şekil 4.23’te verilmiştir.

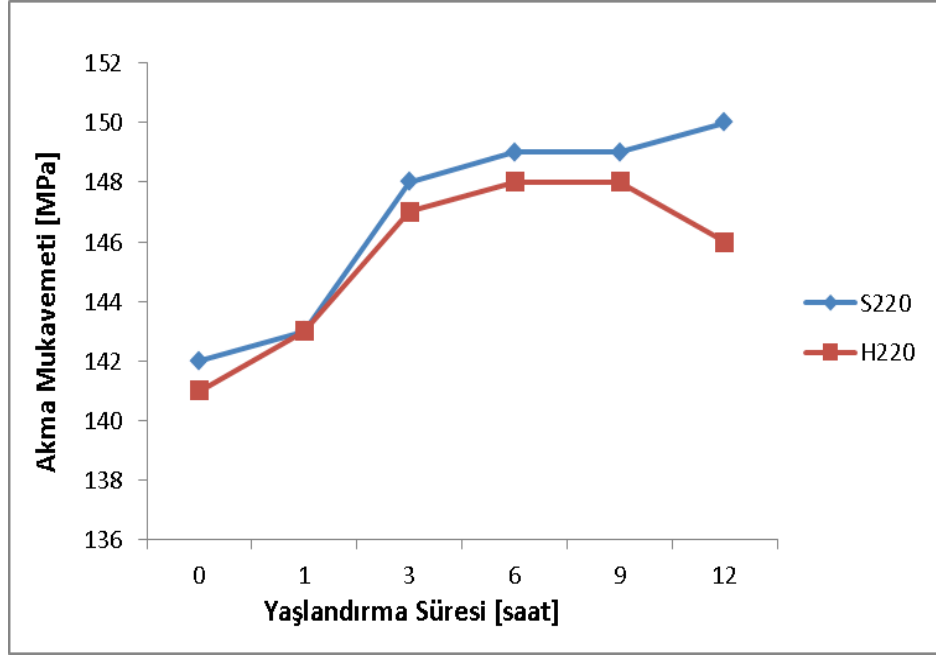
Yaşlandırma süresi ile beraber akma mukavemetindeki küçük artışların çökelen intermetalik fazın dislokasyonların hareketini engelleyerek mukavemet artırımına katkıda bulunduğu düşünülmektedir.



Şekil 4.21. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı akma mukavemetinin yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.



Şekil 4.22. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı akma mukavemetinin yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.

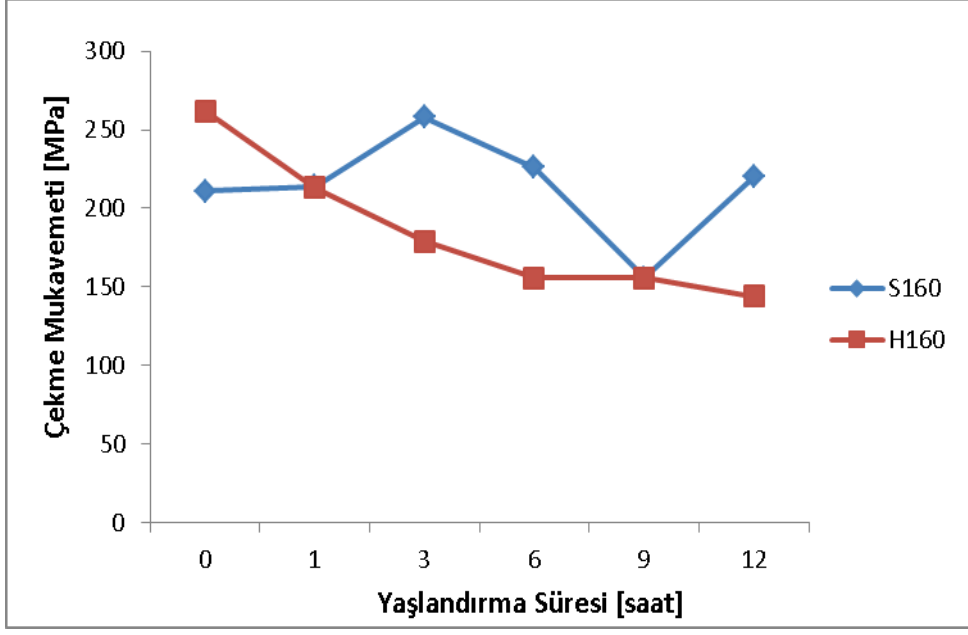


Şekil 4.23. Çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı akma mukavemetinin yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.

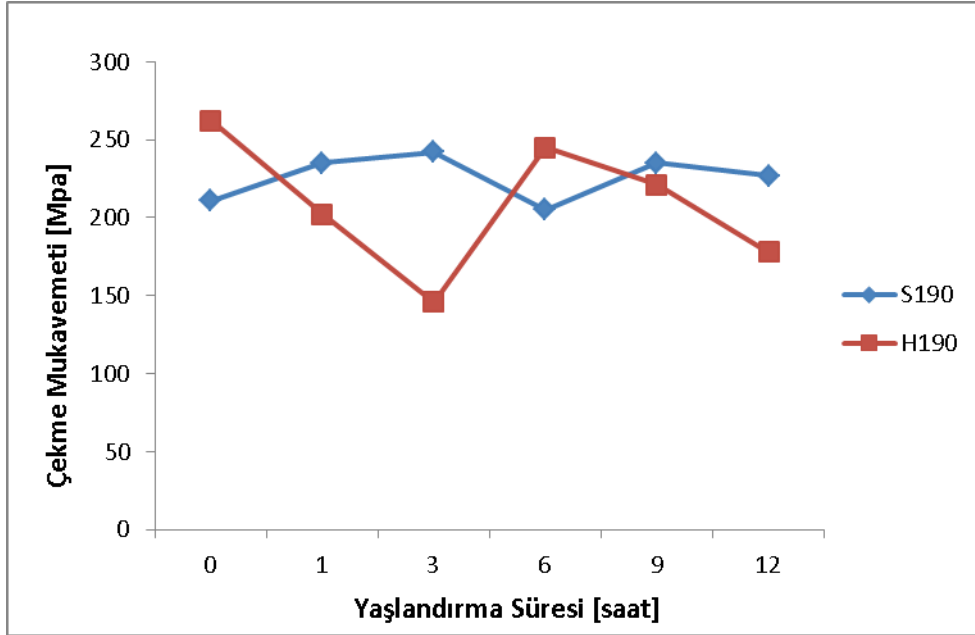
4.4.4.2. Çekme Mukavemetine Etkisinin Karşılaştırılması

AZ63 magnezyum alaşımına uygulanan çözeltiliye alma ısıl işleminin ardından uygulanan yapay yaşlandırmanın çekme mukavemeti üzerinde yaşlandırma süresinin artması ile birlikte genel olarak azalma yönünde bir eğilim göstermekle beraber dalgalanmaların olduğu da grafiklerden anlaşılmaktadır. Yaşlandırma süresi ile beraber intermetalik fazın miktarındaki artışın yapıda sertleşmeye neden olduğu düşünülmektedir.

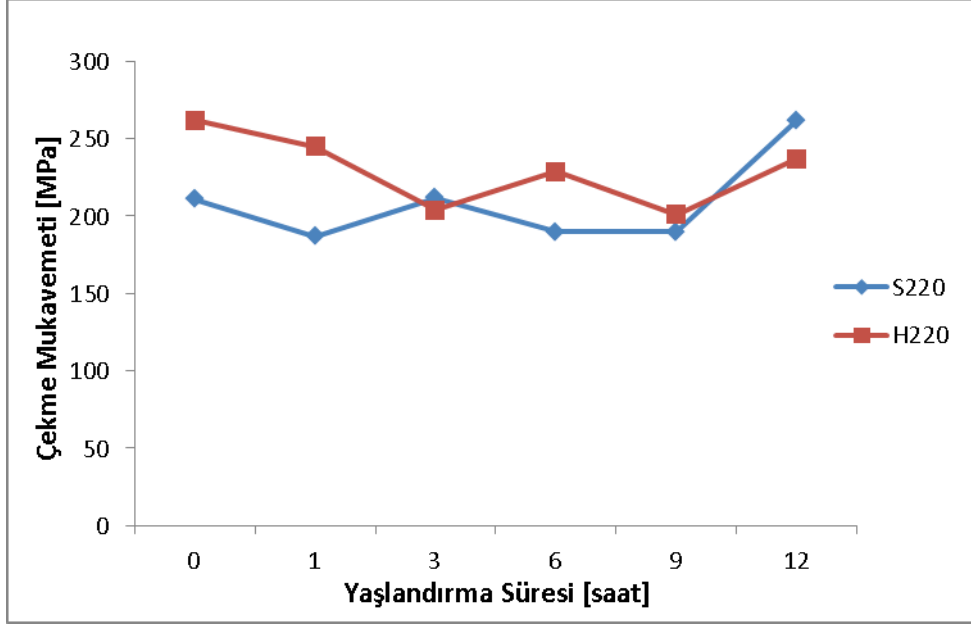
Çözeltiliye alma ısıl işleminden sonra yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak çekme mukavemetlerindeki değişimleri gösteren grafikler Şekil 4.24, Şekil 4.25 ve Şekil 4.26’da verilmiştir.



Şekil 4.24. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı çekme mukavemetinin yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.



Şekil 4.25. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı çekme mukavemetinin yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.

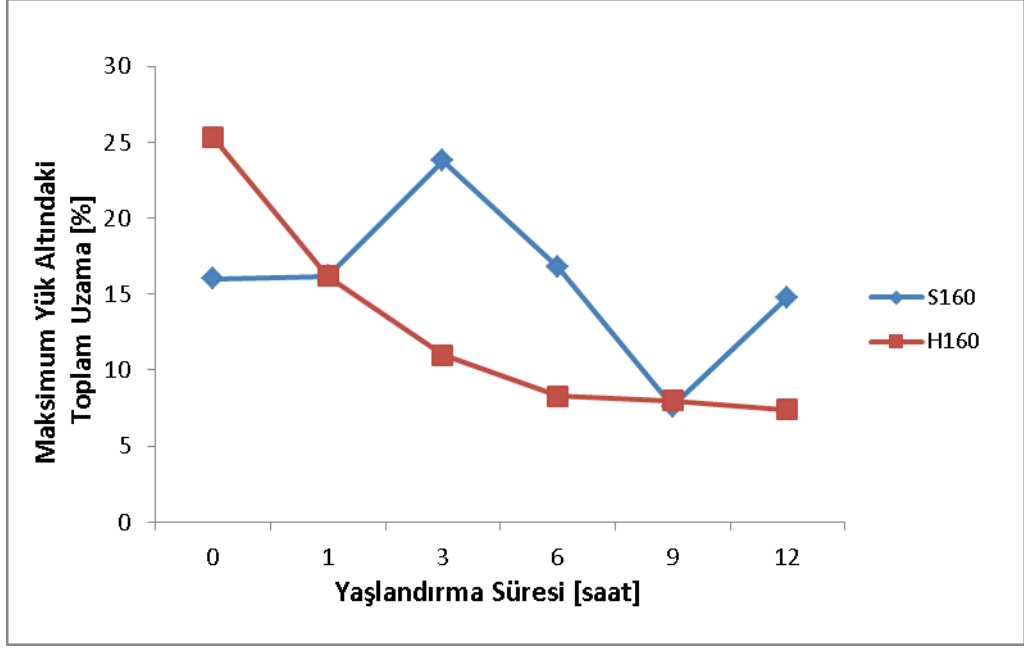


Şekil 4.26. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı akma mukavemetinin yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.

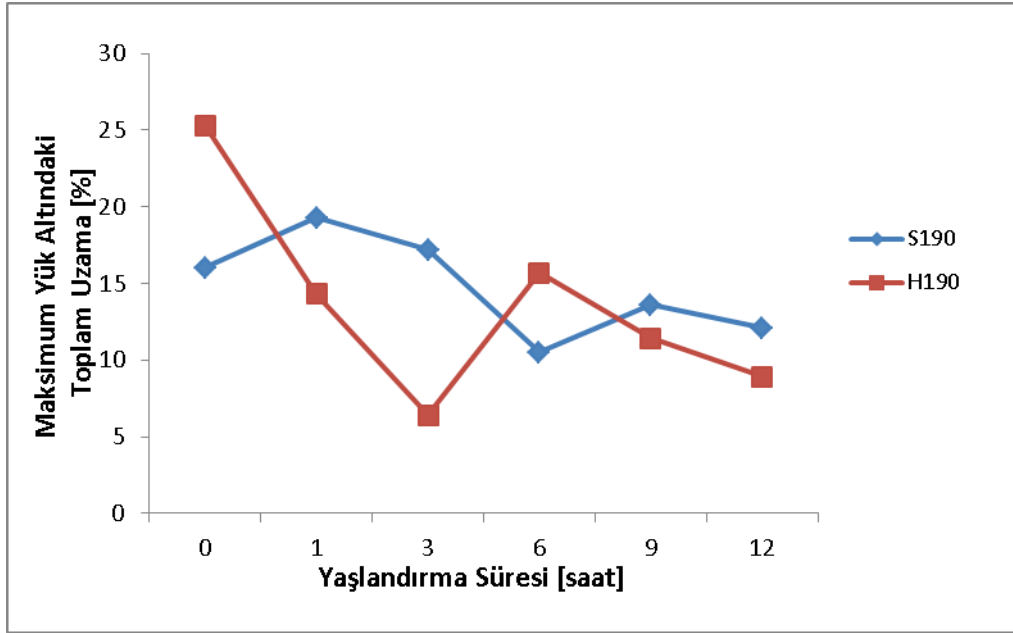
4.4.4.3. Maksimum Yük Altındaki Toplam Uzamaya Etkisinin Karşılaştırılması

AZ63 magnezyum alaşımına uygulanan çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından uygulanan yapay yaşlandırmanın maksimum yük altındaki toplam uzama üzerinde yaşlandırma süresinin artması ile birlikte çekme mukavemetindeki etkiye benzer şekilde azalma yönünde bir eğilim göstermekle beraber dalgalanmaların olduğu da grafiklerden anlaşılmaktadır.

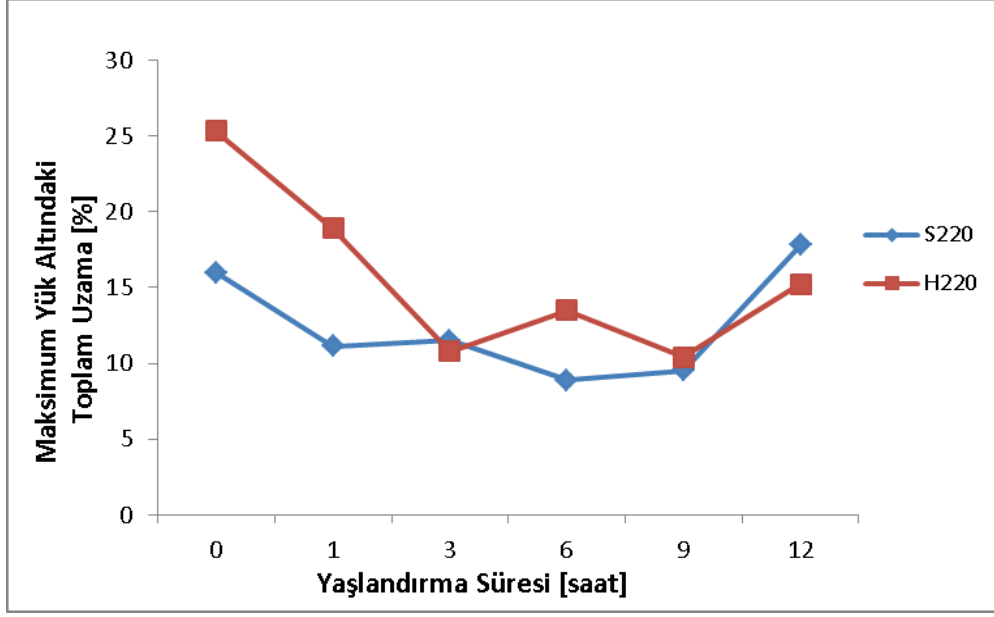
Çözeltiyeye alma ısıl işleminden sonra yapay yaşlandırmaya maruz bırakılan numunelerin sıcaklığa bağlı olarak maksimum yük altındaki toplam uzamalardaki değişimleri gösteren grafikler Şekil 4.27, Şekil 4.28 ve Şekil 4.29’da verilmiştir.



Şekil 4.27. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 160 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı maksimum yük altındaki toplam uzamanın yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.



Şekil 4.28. Çözeltiye alma ısıl işleminin ardından 190 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı maksimum yük altındaki toplam uzamanın yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.



Şekil 4.29. Çözeltiyeye alma ısıl işleminin ardından 220 °C’de yapay yaşlandırılmış numunelere ait karşılaştırmalı maksimum yük altındaki toplam uzamanın yaşlandırma süresine bağlı değişim grafiği.

BÖLÜM 5

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada ticari olarak üretilip kurban anot olarak kullanılan AZ63 magnezyum alaşımına 400 °C’de 16 saat süre ile çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ardından numunelerin bir miktarı havada ve bir miktarı da suda soğutulmuştur. Daha sonra çözeltiye alma ısıl işlemi tamamlanan numunelere 160 °C, 190 °C ve 220 °C’lerde ve 1, 3, 6, 9 ve 12 saat süreler ile yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmıştır. Mikro yapı karakterizasyonu SEM ile faz analizleri XRD analizleri ile yapılmıştır. Mekanik özellikleri belirlemek için de oda sıcaklığında sertlik ve çekme testleri uygulanmıştır. Bu çalışmalar sonucunda;

1. Çözeltiye alma ısıl işleminin sonucunda yapının α -Mg’den oluştuğu ve çok düşük miktarlarda intermetalik fazın çözünmediği SEM ve XRD analizleri sonucunda belirlenmiştir.
2. Döküm haline kıyasla çözeltiye alma ısıl işleminin malzemenin sertliğini düşürdüğü, çekme ve akma mukavemetlerini ve maksimum yük altındaki toplam uzamasını arttırdığı anlaşılmıştır.
3. Yapay yaşlandırma sıcaklığına ve süresine bağlı olarak sertlik değerlerinde belirgin bir artış olmuştur. Bu da $Mg_{17}Al_{12}$ fazının α -Mg fazından daha sert olduğunu göstermektedir.
4. Yapay yaşlandırma sıcaklığına ve süresine bağlı olarak akma mukavemetlerinde küçük artışlar gözlenmiştir.
5. Çözeltiye alınmış numunelere kıyasla yapay yaşlandırma sıcaklığına ve süresine bağlı olarak çekme mukavemetlerinde ve maksimum yük altındaki toplam uzama miktarlarında azalma görülmüştür.

6. Çözeltiyeye alınmış AZ63 magnezyum alaşımı daha yüksek çekme dayanımına ve sünekliğe sahip olduğundan $Mg_{17}Al_{12}$ intermetalik fazının minimum oranda tutulması malzemenin dayanımı, sünekliği ve tokluğu açısından önemlidir.

Uygulanmış olan analiz ve testlerin neticesinde çözeltiyeye alma ısıl işleminden sonra havada ve suda soğutulmuş olan numunelerden, 190 °C, 9 saat süre ile yaşlandırılanlarında malzemenin döküm halindeki uzama ve sertlik değerlerinin yakalanması ile birlikte akma mukavemetinde de yaklaşık %15'e varan artış sağlandığı anlaşılmıştır. Bütün bu ısıl işlem parametreleri içerisinde, akma mukavemetinde artışın diğer mekanik özelliklere olumsuz etki yapmadan yakalanabildiği 400 °C'de 16 saat çözeltiyeye alma ısıl işleminden sonra suda veya hava soğutup 190 °C'de 9 saat süreyle yaşlandırma AZ63 magnezyum alaşımı için en uygun ısıl işlem parametreleri olarak önerilmektedir.

Bundan sonrası için uygulanması düşünülen çalışmalar;

1. Yapay yaşlandırma ısıl işlemi daha yüksek sıcaklık ve/veya daha uzun sürelerde yapılarak aşırı yaşlanma koşulları belirlenebilir.
2. Isıl işlemin malzemenin darbe tokluğu üzerindeki etkileri araştırılabilir.
3. Korozyon direnci incelenebilir.

KAYNAKLAR

1. Mert, F. ve Özdemir, A., “Magnezyum alaşımlarının basınçlı dökümü ve otomotivdeki uygulamaları”, *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ, Turkey, 50 (2011).
2. Külekçi M.K., “Magnesium and its alloys applications in automotive industry”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39: 851-865 (2007).
3. Dobrzanski, L. A., Tanski, T., Cizek, L. and Brytan, Z., “Structure and properties of magnesium cast alloys”, *Journal of Materials Processing Technology*, 192-193: 567-574 (2007).
4. Abbott, T., “Why choose magnesium?”, *Material Science Forum*, 618-619: 3-6 (2009).
5. Czerwinski, F., “Magnesium Injection Molding”, *Springer*, Bolton, Ontario, 2, 19, 61-64 (2008).
6. Friedrich, H. and Mordike, B. L., “Magnesium Technology: Metallurgy, Design Data, Automotive Applications”, *Springer*, Berlin, Heidelberg, 24 (2006).
7. Avedesian, M. M., Baker, H. and ASM International Handbook Committee, “Magnesium and Magnesium Alloys”, *ASM International*, Materials Park, OH (1999).
8. İnternet: Research in China, “China Magnesium Industry Report 2010”, <http://www.researchinchina.com/Htmls/Report/2011/6054.html> (2011).
9. İnternet: U.S: Geological Survey, “Mineral Commodity Summaries-Magnesium Metal”, <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/magnesium/mcs-2011-mgmet.pdf>, 98-99 (2011).
10. Brown, R. E., “Future of magnesium developments in 21st Century”, *Materials Science & Technology Conference*, Pittsburgh, PA, USA (2008).
11. Emley E.F., “Principles of Magnesium Technology”, *Pergamon Press*, London, (1966).
12. Mordike, B. L. and Ebert, T., “Magnesium Properties applications-potential”, *Materials Science and Engineering A- Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 302: 1. 37-45 (2001).

13. Norsk Hydro Datenbank, “NHMg.db (ext.)”, *Norsk Hydro Research Centre*, Porsgrunn (1996).
14. Calister, W. D., “Material Science and Engineering an Introduction 7th Ed.”, *John Wiley & Sons*, New York (2007).
15. Gupta, M. and Sharon, N. M. L., “Magnesium, Magnesium Alloys, and Magnesium Composites *John Wiley & Sons*, New Jersey, 4-11 (2011).
16. Internet: KeytoMetals, “Automotive Uses of Magnesium Alloys: Part One” <http://www.keytometals.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=246> (2011).
17. Kainer, K., “Magnesium—Alloys and Technologies”, *WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KG aA*, Weinheim, 1-22 (2003).
18. Magers, D., “Einsatzmöglichkeiten von Magnesium im Automobilbau” *Leichtmetalle im Automobilbau (Sonderausgabe der ATZ und MTZ)*, Stuttgart (1995).
19. Kim, J. J. and Han, D. S., “Recent development and applications of magnesium alloys in the Hyundai and Kia Motors Corporation”, *Materials Transactions*, 49: 894–897 (2008).
20. McBride, E. D., “Absorbable metal in bone surgery”, *Journal of American Medical Association*, 111 (27): 2464–2467 (1938).
21. Staiger, M. P., Pietak, A., Huadmai, M. J. and Dias, G., “Magnesium and its alloys as orthopedic biomaterials: a review”, *Biomaterials*, 27: 1728–1734 (2006).
22. Song, Y. W., Shan, D. Y., and Han, E. H., “Electrodeposition of hydroxyapatite coating on magnesium alloy for biomaterial application” *Materials Letters*, 62: 3276–3279 (2008).
23. Song, Y. W., Shan, D. Y., Chen, R. S., Zhang, F. and Han, E. H., “Biodegradable behaviors of AZ31 magnesium alloy in simulated body fluid”, *Materials Science and Engineering C*, 29 (3): 1039–1045 (2009).
24. Internet: Yeh, C. C., “Lightweight Alloy Applications to the Sports and Leisure Industry”, Researcher of Industrial Technology Information Services, http://www.sports.org.tw/e/report/2010yearbook_subject/03lightweight.html (2010).
25. Pekguleryuz, M. O., Kainer, K. U., and Kaya, A. A., “Fundamentals of Magnesium Alloy Metallurgy”, *Woodhead Publishing Limited*, New Delhi, Daryaganj, 302 (2013).

26. Scott, W. W. Jr., and DeHaemer, M. J., "ASM Handbook Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials" *ASM International Handbook Committee* (1997).
27. Correa, B. A. M. "Effect Of Solute elements on the lattice parameters of magnesium", Yüksek Lisans Tezi, *McGill University Department of Mining, Metals, and Materials Engineering*, Montréal, 3-35 (2006).
28. Polmear, I. J., "Magnesium alloys and application", *Materials Science and Technology*, 10 (1): 1-16 (1994).
29. Polmear, I., "Light Alloys from Traditional Alloys to Nanocrystals", *Elsevier*, Amsterdam (2006).
30. Scheme, K. and Hornbogen E., "Rapidly Solidified Mg-Li base superlight alloys", *International Conference on Light Metals*, Amsterdam, 797-803 (1990).
31. Raynor, G.V., "The Physical Metallurgy of Magnesium and its Alloys", *Pergamon Press*, New York (1959).
32. Matucha, K.H., "Structure and Properties of Non Ferrous Alloys", *Materials Science and Technology: A Comprehensive Treatment*, 8 (1996).
33. Powell, B., Luo, A., Rezhets, V., Bommarito, J., and Tiwari, B., "Development of creep-resistant magnesium alloys for powertrain applications: Part 1", *PA: Society of Automotive Engineers*, Warrendale (2001).
34. İnternet: Kopeliovich D., Substances and Technologies, "Sand Casting", http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=sand_casting (2012).
35. İnternet: Kopeliovich D., Substances and Technologies, "Die Casting", http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=die_casting&DokuWiki=069d6f5fc9d8ac8cb589e15052a43043 (2012).
36. Chawla, N. and Chawla, K. K., "Metal Matrix Composites", *Springer*, New York, (2006).
37. İnternet: Kopeliovich D., Substances and Technologies, "Squeeze Casting", http://www.substech.com/dokuwiki/doku.php?id=squeeze_casting (2012).
38. Rohatgi, P. K., "Metal-matrix composites", *Defence Science Journal*, 43 (4): 323–349 (1993).
39. Hryn, J. N., "Magnesium Technology", Warrendale, *PA:TMS*, 155–159 (2001).
40. Kaufmann, H. and Uggowitzer, P. J., "Fundamentals of the new rheocasting process for magnesium alloys", *Advanced Engineering Materials*, 3 (12): 963–967 (2001).

41. Fan, Z., "Development of the rheo-diecasting process for magnesium alloys", *Materials Science and Engineering A*, 413–414: 72–78 (2005).
42. Fleming, M. C., "Behavior of metal alloys in the semisolid state", *Metallurgical Transactions A*, 22: 957–981 (1991).
43. Kirkwood, D. H., "Semisolid metal processing", *International Materials Review*, 39 (5): 173–189 (1994).
44. Internet: Rheomet Light Metal Co. Ltd., "Semi Solid Metal Casting", <http://www.rheomet.com/technology-en.asp> (2012).
45. Buschow, K. H. J., Cahn, R. W., Flemings, M. C., Ilshner, B., Kramer, E. J., Mahajan, S., and Veyssiere, P., "Encyclopedia of Materials: Science and Technology", *Elsevier*, New York, 8432–8437 (2008).
46. Zhang, M.X. and Kelly, P.M., "Crystallography of Mg₁₇Al₁₂ precipitates in AZ91D alloy", *Scripta Materialia*, 48: 647–652 (2002).
47. Zhang, Z., "Development of magnesium-based alloys for elevated temperature applications", Doktora Tezi, *Faculte Des Sciences Et De Genie Universite*, Quebec-Canada, 2-75 (2000).
48. Celotto, S., "TEM study of continuous precipitation in Mg–9 wt%Al–1 wt%Zn alloy", *Acta Materialia*, 48 (8): 1775-1787 (2000).
49. Zhang, Z., Couture, A. and Luo, A., "An investigation of the properties of Mg-Zn-Al alloys", *Scripta Materialia*, 39: 45-53 (1998).
50. Thomaz, T., R., Weber, C., R., Pelegrini Jr., T., Dick, L., F., P. and Knörnschild, G., "The negative difference effect of magnesium and of the AZ91 alloy in chloride and stannate-containing solutions", *Corrosion Science*, 52: 2235–2243 (2010)
51. Brace, A., W. and Allen, F., A., "Magnesium Casting Technology", *Reinhold Publishing Corporation*, New York, 104, 116 (1957).
52. Foerster, G. S., "Proceeding of the IMA 33rd annual meeting", *IMA 33rd Annual Meeting*, Montreal, Quebec, Canada, 35-39 (1976)
53. ASM Handbook Committee, "Metals Handbook vol.09 – Metallography and Microstructures", *ASM International*, Materials Park, OH (1998)
54. ASM Committee B07, "ASTM B557-10 Standard Test Methods for Tension Testing Wrought and Cast Aluminum- and Magnesium-Alloy Products", *ASTM International*, Materials Park, OH (2010)

ÖZGEÇMİŞ

Alper İNCESU, 1986 yılında Nazilli’de doğdu; ilk ve orta öğrenimini aynı şehirde tamamladı. Nazilli Anadolu Lisesi’nden 2005 yılında mezun oldu. 2006 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümünde lisans öğrenimine başlayıp 2012 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Mühendislik Fakültesi’nde Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2012 yılında Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda başlamış olduğu yüksek lisans öğrenimine halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Karabük Üniversitesi
Demir Çelik Enstitüsü
Statik Testler Laboratuvarı
Balıklarkayası Mevkii / 78050 KARABÜK

Tel : (551) 4457275

E-posta : alperincesu@karabuk.edu.tr