

**YAŞLANDIRILAN AA7075 ALÜMİNYUM  
ALAŞIMLARININ YORULMA  
DAVRANIŞLARININ  
İNCELENMESİ**

**2012  
YÜKSEK LİSANS TEZİ  
METAL EĞİTİMİ**

**Avni FAKIOĞLU**

**YAŞLANDIRILAN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YORULMA  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Avni FAKIOĞLU**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalında  
Yüksek Lisans Tezi  
Olarak Hazırlanmıştır**

**KARABÜK**

**Ocak 2012**

Avni FAKIOĞLU tarafından hazırlanan “YAŞLANDIRILAN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK



Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile Metal Eğitimi Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 13/ 01/ 2012

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Doç. Dr. Ramazan YILMAZ (SAÜ)



Üye : Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK (KBÜ)



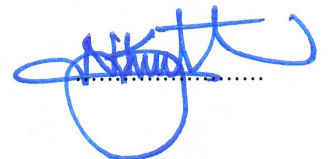
Üye : Yrd. Doç. Dr. Melik ÇETİN (KBÜ)



...../...../2012

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

Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN



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.”*

Avni FAKIOĞLU

## **ÖZET**

**Yüksek Lisans Tezi**

### **YAŞLANDIRILAN AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ YORULMA DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ**

**Avni FAKIOĞLU**

**Karabük Üniversitesi  
Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metal Eğitimi Anabilim Dalı**

**Tez Danışmanı:  
Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK  
Ocak 2012, 93 sayfa**

Bu çalışmada, AA7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan farklı ısı işlemlerin yorulma davranışı üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışma iki aşamada yapılmıştır. Birinci aşamada yeniden çözeltiye alma ve yeniden yaşlandırma ısı işlemleri uygulanmıştır. Yeniden çözeltiye alma ve yeniden yaşlandırma işleminde yeniden yaşlandırma sıcaklıkları ve sürelerinin etkisi incelenmiştir. Bunun için numuneler 220 °C' ta 1 saat yeniden solüsyona alındıktan sonra farklı sıcaklıklarda (100, 110, 120, 130, 140 °C) 24 saat yeniden yaşlandırılmıştır. Yorulma özellikleri için ideal yeniden yaşlandırma süresinin belirlenmesi amacıyla 120 °C' ta (15, 20, 24, 30, 35 saat) sürelerde yeniden yaşlandırılarak Wöhler tipi yorulma test cihazında test edilmiştir. İkinci aşamada ise AA7075 alüminyum alaşımına tavlama (O), yüksek sıcaklıkta ön çökelek oluşturma (HTPP), sunni yaşlandırma (T6), yeniden çözeltiye

alma ve yeniden yaşlandırma (RRA) ısıl işlemleri uygulanmıştır. Standartlara uygun olarak hazırlanan yorulma numuneleri 500 °C' ta 2 saat süre ile tavlansak fırına soğutulmuştur. Sunni yaşlandırma (T6) işleminde numuneler 500 °C' ta 2 saat solüsyona alındıktan sonra oda sıcaklığına hızla soğutulması sonrasında 120 °C' ta 24 saat yaşlandırılmıştır. Yeniden çözeltilmeye alma ve yeniden yaşlandırma işleminde ise numuneler T6 işleminden sonra 220 °C' ta 1 saat çözeltilmeye alındıktan sonra tekrar 120 °C' ta 24 saat yeniden yaşlandırılmıştır. Yüksek sıcaklıkta ön çökelek oluşturma ısıl işleminde 450 °C' ta 30 dakikada ön çökelek oluşturulmuş ve sonrasında 120 °C' ta 24 saat yaşlandırılmıştır. Çalışmada kullanılan farklı ısıl işlemlerin ve yeniden çözeltilmeye alma ve yeniden yaşlandırma parametrelerinin yorulma davranışı üzerine etkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Karakterizasyon çalışmalarında optik mikroskop, tarama elektron mikroskobu (SEM+EDS) X-ışını kırınım (XRD) teknikleri kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar sonucunda, yapılan SEM ve EDS incelemelerinde HTPP, RRA ve T6 ısıl işlemleri sonrasında mikroyapıda  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) fazının oluştuğu görülmüştür. XRD incelemelerinde  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ile birlikte  $MgAl_2O_4$ ,  $(Mg_{0.76}Zn_{0.025})O$ ,  $Mg_{0.971}Zn_{0.025}$  ve  $Mg_2Si$  intermetalik fazlarında bulunduğu gözlenmiştir. RRA ısıl işlemlerinde ise sıcaklık parametreleri dikkate alındığında en yüksek sertlik değerinin 120 °C' ta 24 saat yeniden yaşlandırılan numunelerin sahip olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yeniden yaşlandırma işleminde süre parametreleri dikkate alındığında en yüksek sertlik 24 saat yaşlandırılan numunelerde ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler** : AA7075 alaşımı, ısıl işlem O, T6, RRA, HTPP, yorulma, sertlik, mikroyapı.

**Bilim Kodu** : 10.1.194

## **ABSTRACT**

**M.Sc. Thesis**

**Avni FAKIOGLU**

**Karabuk University**

**Graduate School of Natural and Applied Sciences**

**Department of Metallurgy Education**

**Thesis Advisor:**

**Assoc. Prof. Dr. Dursun OZYUREK**

**January 2012, 93 pages**

In this study, the effects of the heat treatments on the fatigue behavior of AA7075 aluminum alloys were investigated. The studies were carried out in two stages. In the first stage, retrogression and re-aging heat treatments were applied. The fatigue samples which were prepared according to standards were heat treated at 500 °C for 2 hours and later it is cooled down to the room temperature in the furnace. For T6 aging T6 processes, samples were rapidly cooling down after solution in 2 hours at 500 °C. Then, samples were aged at 120 °C for 24 hours. In the retrogression and re-aging process, after T6 heat treatment, the samples were retrogressed at 220 °C for an hour and then re-aged 120 °C for 24 hours. High temperature pre-precipitate was carried out at 450 °C for 30 min. After pre-precipitate forming process, samples were aged at 120 °C for 24 hours. The second stage of experimental study, the ageing parameters such as temperature and time were determined for retrogression and re-aging process. Because of this samples were retrogression heat treated at 220 °C for an hour and then re-aged at various temperatures such as 100, 110, 120, 130 and 140

°C for 24 hours. In order to determine ideal re-aging times, for fatigue resistance samples re-aged at 120 °C for various of times 15, 20, 24, 30 and 35 hours. Those aged samples were tested using at Wöhler test machine to determine fatigue behaviors. There for, the effect of different types of heat treatment and retrogression aging process on the fatigue behavior was investigated. In the second stage of the study, a number of characterization techniques were applied on the samples (RRA) heat treatments were applied. Optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM + EDS), X-ray diffraction (XRD) techniques were used for characterization. As a result of microstructure Mg<sub>2</sub>Si phases were formed after HTPP, RRA, T6 heat treatment in the matrix.  $\eta$  (MgZn<sub>2</sub>) with MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, (Mg<sub>0.76</sub>Zn<sub>0.025</sub>) O, Mg<sub>0.971</sub>Zn<sub>0.025</sub>, and Mg<sub>2</sub>Si intermetallic phases were also found by XRD investigation. Maximum hardness values obtained from the samples at aged 120 °C for 24 hours in samples aged 120 °C. In addition the time parameters taken into account re-aging process, while the maximum hardness was measured in samples aged 24 hours.

**Key Word** : AA7075 alloys, heat treatment, O, T6, RRA, HTPP, fatigue, hardness, microstructure.

**Science Code** : 710.1.194



## TEŞEKKÜR

Bu tez çalışmasının planlanmasında, araştırılmasında, yürütülmesinde ve oluşturulmasında ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve tecrübelerinden yararlandığım, yönlendirme ve bilgilendirmeleriyle çalışmamı bilimsel temeller ışığında şekillendiren çok değerli danışman hocam sayın Doç. Dr. Dursun ÖZYÜREK' e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalar sırasında yardımlarını esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Ramazan KAÇAR, Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ, Doç. Dr. Halil DEMİR, Doç. Dr. İbrahim ÇİFTÇİ, Doç. Dr. Nizamettin KAHRAMAN, Doç. Dr. Hüseyin KURT, Doç. Dr. Mehmet ÖZKAYMAK, Yrd. Doç. Dr. Melik ÇETİN, Arş. Gör. Musa YILDIRIM, Arş. Gör. Hayriye ERTEK EMRE' ye ve deneysel numunelerin talaşlı imalatı sırasında yardımcı olan Abdullah ELİĞÜR' e çok teşekkür ederim.

Beni yalnız bırakmayan her konuda destekleyen değerli arkadaşlarım Mahir PALABIYIK, İhsan Can YILMAZ' a ve Mustafa YİĞİT' e, yorulma testlerinin yapılmasında yardımlarını gördüğüm Mustafa KAYA ve Özkan ACAR' a çok teşekkür ederim.

Bu Yüksek Lisans Tez Çalışması, Karabük Üniversitesi Rektörlüğü BAP Komisyonu tarafından KBÜ-BAP-C-11-Y-006 numaralı proje ile desteklenmiştir.

Hayatım boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgmeden hep yanımda oldukları için sevgili aileme tüm kalbimle teşekkür ederim.

## İÇİNDEKİLER

	<b><u>Sayfa</u></b>
KABUL.....	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER.....	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xvi
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xvii
BÖLÜM 1.....	1
GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.....	3
ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI.....	3
2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI.....	5
2.1.1. Dövme (İşlem) Alüminyum Alaşımları.....	5
2.1.1.1. Al-Cu Alaşımları (2xxx serisi).....	6
2.1.1.2. Al-Mn Alaşımları (3xxx serisi).....	7
2.1.1.3. Al-Si Alaşımları (4xxx serisi).....	7
2.1.1.4. Al-Mg Alaşımları (5xxx serisi).....	7
2.1.1.5. Al-Mg-Si Alaşımları (6xxx serisi).....	8
2.1.1.6. Al-Zn Alaşımı (7xxx serisi).....	8
2.1.2. Döküm Alüminyum Alaşımları.....	9
2.1.2.1. Al-Cu Alaşımları (2xx.x serisi).....	11
2.1.2.2. Al-Si-Mg Alaşımı (3xx.x serisi).....	11
2.1.2.3. Al-Si Alaşımları (4xx.x serisi).....	11
2.1.2.4. Al-Mg Alaşımları (5xx.x serisi).....	11
2.1.2.5. Al-Mg-Zn Alaşımları (7xx.x).....	12
2.1.2.6. Al-Sn Alaşımları (8.xx.x serisi).....	12

	<u>sayfa</u>
2.1.3 7075 Alüminyum Alaşımı.....	12
<b>BÖLÜM 3</b> .....	<b>16</b>
<b>ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ VE ISIL İŞLEM KODLARI</b> .....	<b>16</b>
3.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ .....	17
3.1.1. Homojenizasyon İşlemi .....	18
3.1.2. Tavlama.....	19
3.1.3. Gerilim Giderme Tavlaması.....	19
3.2.. ÇÖKELTME SERTLEŞMESİ ISIL İŞLEMİ.....	19
3.2.1. Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşleminin Aşamaları .....	20
3.2.1.1. Çözeltiye Alma İşlemi.....	20
3.2.1.2. Su Verme .....	21
3.2.1.3. Su Verme Ortamı ve Soğuma Hızı .....	22
3.2.1.4. Kritik Sıcaklık Aralığı.....	23
3.3. YAŞLANDIRMA İŞLEMİ.....	26
3.3.1 Çökeltme Sertleşmesi Sürecinde Oluşan Dönüşümler .....	27
3.3.2 Al–Zn–Mg Alaşımlarında Meydana Gelen Dönüşümler .....	29
3.3.2.1. GP Bölgeleri (Zonları).....	30
3.3.2.2. $\eta'$ Fazı .....	30
3.3.2.3. $\eta$ ve T Kararlı Fazları.....	31
3.3.3. Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi ile Mukavemet Artışı.....	31
3.4. YENİDEN ÇÖZELTİYE ALMA VE YENİDEN YAŞLANDIRMA (RRA) İŞLEMİ.....	32
3.4.1 Retrogression İşlemi Sırasında Oluşan Dönüşümler .....	33
3.5. HTPP (HIGH TEMPERATURE PRE–PRECIPITATION) ISIL İŞLEMİ....	35
<b>BÖLÜM 4</b> .....	<b>36</b>
<b>YORULMA</b> .....	<b>36</b>
4.2. MALZEMELERDE YORULMA OLAYI .....	37
4.2.1 Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Özellikleri.....	39
4.3. YORULMA MUKAVEMETİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER.....	40
4.3.1. Parçanın Yüzey Kalitesi .....	40

	<b>Sayfa</b>
4.3.2. Sıcaklık .....	40
4.3.3. Çevrenin Kimyasal Etkisi.....	41
4.3.4. Frekans (Deney Hızı) .....	42
4.3.5. Gerilme Sistemi .....	43
4.3.6. Çentik hassasiyeti.....	44
4.3.7. Mikroyapı Etkisi .....	44
4.4. YORULMA TESTLERİ.....	45
4.5. YORULMA TÜRLERİ .....	48
4.5.2. Çatlaksız Malzemelerde Yorulma.....	49
4.5.2. Çatlaklı Malzemelerde Yorulma.....	50
4.6. YORULMA TESTLERİNDE KULLANILAN CİHAZLAR.....	50
4.6.1 Eksenel Gerilmeli Yorulma Test Cihazları.....	51
BÖLÜM 5 .....	52
MALZEME VE METOT .....	52
5.1. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN MALZEME .....	52
5.2. TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI .....	53
5.3. AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER ..	53
5.4. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN YORULMA TEST CİHAZI.....	56
5.5. YORULMA TESTLERİNİN YAPILMASI.....	59
5.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ .....	59
5.7. OPTİK MİKROSKOP İNCELEMELERİ.....	60
5.8. SEM VE EDS ÇALIŞMALARI .....	61
5.9. X-RAY DİFFRACTION (XRD) İNCELEMELERİ.....	61
BÖLÜM 6 .....	62
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	62
6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ.....	62
6.2. SEM VE EDS İNCELEMELERİ .....	65
6.3. XRD İNCELEMELERİ.....	69
6.4. SERTLİK SONUÇLARI.....	72

	<b><u>Sayfa</u></b>
6.6. YORULMA TEST SONUÇLARI .....	75
6.7. KIRIK YÜZEY İNCELEMELERİ .....	79
BÖLÜM 7 .....	86
SONUÇ VE ÖNERİLER .....	86
KAYNAKLAR .....	89
ÖZGEÇMİŞ .....	93

## ŞEKİLLER DİZİNİ

### Sayfa

Şekil 2.1. Al–Zn denge diyagramının şematik görüntüsü.....	9
Şekil 3.1. Çözündürme ve yaşlanma aşamalarını içeren çekelme şartleşmesi işleminin şematik gösterimi .....	21
Şekil 3.2. Çözeltiye alınan alüminyum alaşımı levha ve saclara su verildiğinde parça merkez hattında ortalama soğuma hızı .....	23
Şekil 3.3. Çökeltme hızını tayin eden faktörler üzerinde sıcaklığın etkisi.....	24
Şekil 3.4. Al–Zn–Mg (7xxx serisi) alüminyum alaşımının C–eğrisi.....	25
Şekil 3.5. Çeşitli alüminyum alaşımlarında soğuma hızının mukavemete etkisi ....	26
Şekil 3.6. Aşırı doymuş katı eriyikten ayrışma modelleri.....	28
Şekil 3.7. Al–Cu sisteminde oluşan bazı ara fazların şematik gösterimi a) Katıçözetli b) GP-1 zonları c)GP-2 zonları d) $\theta_1$ fazı e) $\theta_2$ fazı .....	29
Şekil 3.8. Al–Zn–Mg alaşımlarında göreceli yüksek yaşlandırma sıcaklıklarında mikroyapı bileşenlerinin oluşum sırası.....	30
Şekil 3.9. Orowon mekanizması ile çökeltilerin ayrılması a) Çökeltiler arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar b) aşırı büyük çökeltilerin dislokasyonlar tarafından kesilmesi .....	32
Şekil 3.10. RRA işlemi esnasında sertlik değişimi.....	33
Şekil 3.11. AA7075 alaşımının; a)T6 işlemi b) retrogreyon c) retrogresyon ve yeniden yaşlandırma sonrası şematik mikroyapısı .....	34
Şekil 4.1. Yorulma sonucu oluşan kırılma yüzeyleri a) yorulma testlerindeki kırık yüzey görünümü b) Yorulma sonucu kırılan bir malzemenin kırılma yüzeyinin şematik gösterimi .....	38
Şekil 4.2. Korozif ortamın S–N diyagramına ve çatlak ilerleme hızına etkisi.....	42
Şekil 4.3. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği .....	44
Şekil 4.4. Mikro boşlukların oluşumu ve birleşmesi .....	45
Şekil 4.5. Wöhler tipi yorulmatest cihazının şematik olarak gösterimi .....	46
Şekil 4.6. Yorulma test numunesi geometrisi.....	46
Şekil 4.7. Herhangi iki malzemeye ait Wöhler eğrisi a) demir ve alaşımları b) Demir dışı metal ve alaşımları için .....	48
Şekil 4.8. Yorulma türlerinin şematik gösterimi .....	49
Şekil 5.1. Yorulma numunesi ölçüleri .....	53

Şekil 5.2. Isıl işlem uygulamalarında kullanılan Protherm marka ısıl işlem fırını ...	54
Şekil 5.3. Wöhler tipi yorulma test cihazının şematik görüntüsü.....	57
Şekil 5.4. Deneysel numunenin tutuculara bağlanma şeklinin şematik görüntüsü ...	58
Şekil 5.5. Yorulma cihazında numuneye uygulanan gerilmenin hesaplanması .....	59
Şekil 5.6. AFFRI SYSTEM marka ve VRSD-251 model universal makro sertlik cihazı .....	60
Şekil 6.1. Farklı sıcaklıklarda ve 24 saat RRA ısıl işlemi uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri a) 100 °C, b) 110 °C, c) 120 °C, d) 130 °C, e) 140 °C .....	62
Şekil 6.2. 120 °C' ta farklı sürelerde RRA ısıl işlemi uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri a) 15 saat, b) 20 saat, c) 24 saat d) 30 saat d) 35 saat.....	63
Şekil 6.3. Farklı ısıl işlemler uygulanan AA7075 alaşımının optik mikroskop görüntüleri a) O, b) T6, c)HTPP, d)RRA .....	64
Şekil 6.4. Farklı sıcaklıklarda ve 24 saat RRA ısıl işlemi uygulanan numunelerin SEM görüntüleri a) 100 °C, b) 110 °C, c) 120 °C, d) 130 °C, e) 140 °C ..	65
Şekil 6.5. Farklı sürelerde ve 120 °C ' ta uygulanan ısıl işlem çalışmalarının SEM görüntüleri a)15 saat, b) 20 saat, c) 24 saat, d) 30 saat, e) 35 saat ...	66
Şekil 6.6. Farklı ısıl işlemler uygulanan numunelerin SEM görüntüleri a) O, b) T6, c) HTPP, d) RRA.....	67
Şekil 6.7. 220 °C' ta 1 saat çözeltiye alınan RRA ısıl işleminin EDS analizi .....	68
Şekil 6.8. RRA ısıl işleminde farklı sıcaklıklarda a) ve sürelerde b) yeniden yaşlandırılan numunelerin XRD analizi sonuçları.....	70
Şekil 6.9. HTPP, T6, RRA ısıl işlemlerinin XRD analizi sonuçları .....	71
Şekil 6.10. RRA ısıl işleminde farklı sıcaklıklarda a) ve sürelerde b) yeniden yaşlandırılan numunelerin sertlik sonuçları .....	73
Şekil 6.11. Farklı ısıl işlem uygulanan (O, T6, HTPP, RRA) AA7075 alaşımının sertlik sonuçları .....	75
Şekil 6.12. RRA ısıl işleminde farklı sıcaklıklarda a) ve sürelerde b) yeniden yaşlandırılan numunelerin (S-N) diyagramı .....	76
Şekil 6.13. O, T6, HTPP, RRA ısıl işlemi uygulanmış numunelerin (S-N) diyagramı.....	78
Şekil 6.14. RRA ısıl işleminin farklı yeniden yaşlandırma sıcaklıkları kullanılarak yorulma testi yapılan numunelerin kırık yüzeylerinin SEM Görüntüleri a)100 °C, b) 110 °C, c) 120 °C, d) 130 °C, e) 140 °C ..	80
Şekil 6.15. RRA ısıl işleminin farklı yeniden yaşlandırma süreleri kullanılarak yorulma testi yapılan numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri a) 15 saat, b) 20 saat, c) 24 saat, d) 30 saat, e) 35 saat .....	82

Şekil 6.16. O, T6, RRA ve HTPP ısıı işlemler uygulanmış yorulma numunelerinin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri a, b) O, c, d) T6, e, f) RRA, g, f) HTPP .....84



## ÇİZELGELER DİZİNİ

	<b><u>Sayfa</u></b>
Çizelge 2.1. Saf alüminyumun özellikleri.....	4
Çizelge 2.2. Dövme (işlem) alüminyum alaşımlarının gösterimi .....	5
Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimi .....	10
Çizelge 2.4. Ticari AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	12
Çizelge 2.5. AA7075 alüminyum alaşımının bazı fiziksel özellikleri .....	13
Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler ve ısı işlem kodları..	16
Çizelge 5.1. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi .....	52
Çizelge 5.2. Deneysel çalışmanın birinci kısmında kullanılan ısı işlem parametreleri.....	55
Çizelge 5.3. Deneysel çalışmanın ikinci kısmında kullanılan RRA ısı işlem parametreleri.....	56

## SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

### SİMGELER

MPa : Mega Paskal

Gr : Gram

$\sigma$  : Gerilme Kuvveti

N : Çevrim

F : Kuvvet

L : Numune Boyu

d : Numune Çapı

### KISALTMALAR

AA : Alüminyum Alaşımı

ASTM: American Society for Testing and Materials

GP : Guiner-Preston

ANSI : American National Standards Institute

YMK : Yüzey Merkezli Kübik

HMK : Hacim Merkezli Kübik

HV : Vickers Sertlik Değeri

HB : Brinell Sertlik Değeri

RRA :Yeniden Çözeltiye Alma ve Yeniden Yaşlandırma

HTPP : Yüksek Sıcaklıkta Ön Çökelek Oluşturma

XRD : X-Işını Difraksiyonu

SEM : Tarama Elektron Mikroskobu

EDS : Enerji Yayınım Spektrometresi

SCC :Stres Korozyon Çatlağı

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

Teknolojinin gelişmesiyle birlikte alüminyum ve alüminyum alaşımları günümüzde en çok kullanılan metalik malzemeler arasına girmiştir. Bu durum dahilinde, alüminyum ve alaşımlarının teknolojik açıdan büyük önem taşır. Yer kabuğunda yaklaşık % 8 oranında bir varlığa sahip olan alüminyum, diğer metallerle bileşik halinde bulunur. XIX. yüzyılın ikinci yarısından itibaren endüstriyel çapta üretilmeye başlayan alüminyum ve alüminyum alaşımları, çok yeni bir metal olmasına rağmen, günümüz sanayisinde bakır ve bakır alaşımları, kurşun, kalay ve çinko gibi diğer demir dışı metallerin toplamından daha fazla kullanılmaktadır [1].

Alüminyum, özgül dayanımının (dayanım/ağırlık) fazla olması, ısı ve elektrik iletkenliğinin yüksek olması, korozyon direncinin iyi olması, kolay işlenebilmesi, kolay dövülebilmesi, ısıl işlemlerle dayanımının artırılabilmesi gibi pek çok özelliğinden dolayı endüstriyel amaçlı kullanılmaktadır. Bu özellikleri nedeniyle uzay ve havacılık, uçak, otomotiv, silah, inşaat, eşya, ısıtma-soğutma gibi sektörlerde tercih edilmektedir [2, 3, 4, 5]. Bu nedenlerden dolayı kullanımı endüstriyel alanlarda artmaktadır ve demir esaslı malzemelerle neredeyse yarışır hale gelmiştir [6]. En yaygın kullanım alanları; taşımacılık ve paketleme (meşrubat kutuları, folyo, açılır kapanır tüpler), taşıma (otomotiv motor blokları, uçak, tekne, demiryolu, tren vagonları), yapı ve konstrüksiyon (pencere çerçeveleri, mimari paneller, çatı kaplamaları, köprüler), elektrik (tevzi çubukları, havai kablolar, kapasitörler), makineler ve ekipmanları (ısı değiştiricileri, baskı plakaları, kimyasal ekipmanlar, tanklar), dayanıklı tüketim eşyaları (mutfak kapları, mobilya, buzdolabı) olarak gösterilebilir.

Alüminyum ve alaşımlarının kullanıldığı alanlar özellikle hafifliğin önemli olduğu sektörlerdir. Bu alaşımların otomotiv ve uçak sanayileri ile türbin ve fan kanatlarının çalışma sırasında çoğunlukla tekrarlı gerilmelere maruz kaldıkları bilinmektedir [7, 8].

Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik malzemelerde, uygulanan gerilmeler parçanın akma dayanımından küçük olmasına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda genellikle yüzeyde bir çatlama ve bunu takip eden kopma olayına neden olurlar. Yorulma kırılması denilen bu olay gevrek türde olduğu için nerede ve ne zaman olacağını önceden belirlemek zordur. Yorulma kırılmaları, parça içerisindeki hesaplanan gerilmeler elastik bölgede bulunmasına rağmen meydana gelmektedir. Ancak bu olay genellikle düzensiz bir gerilme söz konusu olduğu durumlarda görülür. Yorulma kırılmasına uğrayan parçalara örnek olarak miller, bağlantı çubukları ve dişliler gibi hareketli parçalar gösterilebilir. Makinalardaki hasarların yaklaşık % 80' inin yorulma kopmalarından kaynaklandığı savunulmaktadır [7].

Malzemelerin kullanılabilirliğine daha iyi karar verilebilmek için yorulma özellikleri incelenmelidir. Malzemelerin yorulma özelliklerinin belirlenmesinde genellikle S-N diyagramları (Wöhler eğrileri) kullanılmaktadır [1].

Bu çalışmada; Yeniden çözültüye alınan ve yeniden yaşlandırılan (RRA) ısıtılma işleminde sıcaklık ve süre gibi parametrelerin AA7075 alüminyum alaşımının yorulma davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Ayrıca alaşıma uygulanan farklı ısıtılma işlem şartlarının yorulma özellikleri üzerindeki etkilerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Farklı yaşlandırma ısıtılma işlemleri ile yapıda oluşturulan ikinci faz çökeleklerinin, alaşımın yorulma davranışına etkisi incelenerek, alaşımın yorulma performansı belirlenmeye çalışılmıştır. Yorulma testlerinde dönen eğmeli yorulma test cihazı (Wöhler tipi) kullanılmıştır.

## BÖLÜM 2

### ALÜMİNYUM VE ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum, periyodik cetvelde III. Periyot IIIA grubunda bulunan, yoğunluğu 2,7 gr/cm<sup>3</sup>, ergime sıcaklığı 658 °C' olan bir metaldir. Isı ve elektrik iletkenliği bakırın % 65' i kadardır. Yüzeyinde meydana gelen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (alümina) tabakası sayesinde havadan ve sudan etkilenmeyen alüminyum, sülfürik asit, hidroklorik asit ve hidroksitlerden etkilenmektedir. Çekme dayanımı 70–100 N/mm<sup>2</sup> arasındadır. Yumuşak ve sünek olduğu için, tel ve levha haline getirilebilir. Çekme, haddeleme, dövme, presleme gibi mekanik işlemlerle şekillendirilebilir. Çizelge 2.1' de saf alüminyumun özellikleri verilmektedir. Bu özelliklerinden dolayı, endüstride kullanılan önemli metaller arasına girer. Alüminyum doğada serbest halde değil, bileşikler halinde bulunur. Doğada en çok bulunan alüminyum bileşikleri şunlardır: Feldspatlar, mikalar ve killer. Alüminyumun, üretimde kullanılan en önemli filizi, boksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>H<sub>2</sub>O)' tir [9]. Boksitin içinde, alüminyum oksit ile birlikte silis, demir oksit ve bazı elementler bulunur. Alüminyum oksidin (alümina), diğer oksitlerle yaptığı bileşikler değerli taşlar olarak kullanılmaktadır.

Çizelge 2.1. Saf alüminyumun özellikleri [10].

Atom numarası	13
Atom ağırlığı	26,97 gr/mol
Kristal yapısı	Yüzey Merkezli Kübik (YMK)
Yoğunluğu	2,7gr/cm <sup>3</sup>
Ergime noktası	658 °C
Yeniden kristalleşme sıcaklığı	150–300 °C
Buharlaşma noktası	2450 °C
Özgül ısısı	0,224 cal/gr (100 °C)
Elastisite modülü	72x10 <sup>3</sup> MPa
Poisson oranı	0.33
Kayma modülü	27x10 <sup>3</sup> MPa
Çekme mukavemeti	40–90 MPa
Akma mukavemeti	10–30 MPa
Kopma uzaması	% 30–40

Alüminyuma bakır, çinko, silisyum, magnezyum, mangan, demir, nikel, titanyum gibi elementler ilave edilerek elde edilen alüminyum alaşımları; hafiflik, yüksek ısı ve elektrik iletkenliği, ısı işlemlere elverişliliği ve bazı kimyasal etkilere dayanıklılık gibi özelliklere sahiptir. Döküm yoluyla üretime elverişli olmalarının yanında, dövme, çekme, haddeme gibi işlemlere de oldukça elverişlidirler. Alüminyum alaşımları, özellikle hafif olmaları nedeniyle uçak, gemi, tren, otomobil gibi taşıma araçlarında ve konutlarda geniş kullanım alanı bulmuştur [11]. İletkenlik bakımından bakırdan sonra geldiği için elektrik endüstrisinde de geniş kullanım alanına sahiptir. Ancak alüminyum alaşımlarının iletkenlikleri saf alüminyuma göre daha azdır. Sertliklerinin ve dayanımlarının düşük olması, kolay aşınmaları, önemli korozyonlara dayanıksız olmaları ve maliyetinin yüksek olması gibi özellikleri ise alüminyum alaşımlarının istenmeyen özelliklerindedir.

## 2.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ SINIFLANDIRILMASI

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması üretim metotları esas alınarak yapılır. Üretim metotlarına göre alüminyum alaşımları: dövme (mekanik işlem) alüminyum alaşımları ve döküm alaşımları olmak üzere iki ana gruba ayrılırlar. Plastik deformasyonla şekillendirilen dövme alüminyum alaşımlarının mikroyapısı ve kimyasal içeriği döküm alaşımlarından oldukça farklıdır. Her ana grup içindeki alaşımlar, ısıl işlem yapılabilir ve ısıl işlem yapılamaz alaşımlar olmak üzere, iki alt grupta incelenir. Isıl işlem yapılabilen alaşımlarda, mukavemet artışı yaşlandırma işlemi ile sağlanabilirken, ısıl işlem özelliği göstermeyen alaşımlar ise katı eriyik, pekleşme, dağılım mukavemetlenmesi ile mukavemetlendirilir [12].

### 2.1.1. Dövme (İşlem) Alüminyum Alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları dört basamaklı bir sayı notasyonu ile tanımlanırlar. Binler basamağındaki rakam ana element grubu gösterirken 2xxx serisinden 7xxx ana grubuna kadar her grup en büyük alaşım elementine göre adlandırılır. Örnek olarak; 3xxx gurubunda en önemli alaşım elementi mangandır. Bu tanıma uymayan grup serisi 6xxx serisidir. 6xxx grubuna giren alaşımlarda magnezyum ve silisyum birlikte bulunur. Bu iki element birleşerek magnezyum–silisit ( $Mg_2Si$ ) oluşturur [12]. Çizelge 2.2’ de dövme alüminyum alaşımlarının gösterimi verilmektedir.

Çizelge 2.2. Dövme (işlem) alüminyum alaşımlarının gösterimi[12].

Dövme (işlem)Alüminyum Alaşımları	
1xxx	Ticari saflıkta Al (>%99Al) – Yaşlandırılmaz.
2xxx	Al-Cu alaşımları – Yaşlandırılabilir.
3xxx	Al-Mn alaşımları – Yaşlandırılmaz.
4xxx	Al-Si alaşımları –Eğer Mg varsa yaşlandırılabilir. Mg yoksa yaşlandırılmaz.
5xxx	Al-Mg alaşımları – Yaşlandırılmaz.
6xxx	Al-Mg-Si alaşımları – Yaşlandırılabilir.
7xxx	Al-Mg-Zn alaşımları – Yaşlandırılabilir

1xxx, 3xxx ve 5xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ısıtılma işlemi uygulanmasına elverişli olmayan gruplardır ve mukavemetleri yalnızca şekil değiştirme ile (deformasyonla) arttırılır. 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisi dövme alüminyum alaşımları ise ısıtılma işlemi uygulanmasına elverişli olan gruplardır. 4xxx serisi alüminyum alaşımları hem ısıtılma işlemi uygulanabilir hem de ısıtılma işlemi uygulanamaz çeşitleri içermektedir. 4xxx serisi alaşımlarının ısıtılma işlemi özelliği magnezyum elementine göre belirlenir. Eğer magnezyum eklenirse ısıtılma işlemi yapılabilir. Magnezyum eklenmezse ısıtılma işlemi özelliği ortadan kalkar. ısıtılma işlemi uygulanabilen alaşımlarda, en yüksek mekanik özelliklerini genel olarak çözeltiye alma ısıtılma işlemi ile kazanırlar. ısıtılma işlemi uygulamayan alaşımlar ise en yüksek mekanik özelliklerini, soğuk şekillendirme yoluyla, sertleştirme ve mukavemeti artırma yöntemi olan şekil değiştirme sertleştirme ile kazanırlar [13].

Alüminyuma ilave edilen alaşım elementlerinin mukavemeti arttırma mekanizması iki şekilde gerçekleşir:

- 1- Katı eriyik olarak çözünürler ve deformasyon ile sertlik arttırılır. (deformasyon sertleşmesi sonucunda oluşan alaşımlar)
- 2- Yüksek sıcaklıkta katı eriyik çözünüp ve düşük sıcaklıkta ince parçacık halinde çökelirler (yaşlanma sonucunda mukavemeti artan alaşımlar) [12].

#### **2.1.1.1. Al-Cu Alaşımları (2xxx serisi)**

Temel alaşım elemanı bakır olan 2xxx serisi alüminyum alaşımları en uygun özelliklerini çökelme sertleşmesi ısıtılma işlemi ile alırlar. Al-Cu alaşımlarının yaşlanma sırasında meydana gelen karmaşık yapısal değişimlerine rağmen Al-Cu alaşımları diğer sistemlerden daha detaylı incelenmiştir. İyi işlenme özelliklerinin gerektiği yerlerde, bağıl olarak artan sıcaklıklarda, sürünme dayanımının fazla olmasıyla birlikte oda sıcaklığında yüksek çekme mukavemetine ve çok düşük sıcaklıklarda yüksek dayanıma sahip olması istenen yerlerde, yaygın olarak kullanılmaktadır. Korozyona karşı direnci, diğer alaşım grupları kadar yüksek değildir ve kaynak edilebilme kabiliyeti sınırlıdır. Çoğunluk olarak araçların ve uçakların tekerlerinde,



araçların süspansiyon parçalarında, uçak gövdelerinde ve 150 °C' a kadar olan sıcaklıklara kadar dayanım gerektiren parçaların üretiminde kullanılır [7].

#### **2.1.1.2. Al–Mn Alaşımları (3xxx serisi)**

3xxx serisi dövme alüminyum alaşımlarında temel alaşım elementi mangan olarak belirlenmiştir. Genel olarak 3xxx serisi işlem alüminyum alaşımlarının sahip olduğu dayanım orta derecede bir dayanımdır. Yüksek yumuşaklık özelliği ve üstün korozyon direnci sağlanacak yerlerde kullanılır. 3xxx serisi alüminyum alaşımlarının içerisinde yaygın olarak kullanılan 3003 alaşımıdır. 3xxx grubundaki alaşımlar meşrubat kutuları, mutfak gereçleri, ısı dönüştürücüleri, depolama tankları, mobilya, otoyol işaretleri, çatı ve kenar kaplamalar ile diğer mimari uygulamalarda kullanılmaktadır [7].

#### **2.1.1.3. Al–Si Alaşımları (4xxx serisi)**

4xxx serisi alüminyum alaşımlarında alaşım elementi silisyumdur. Silisyum alüminyuma yeterli miktarlarda (yaklaşık olarak % 12' ye kadar) ilave edilirse alaşımı gevrekleştirmeden ergime derecesinin azalmasına neden olur. Al–Si alaşımları alüminyum birleştirmede ana metalin ergime sıcaklığından daha düşük sıcaklıklarda sert lehim alaşımı olarak ve kaynak telinde oldukça fazla kullanılırlar. 4xxx serisi alüminyum alaşımlarının çoğunlukla ısıl işlem kabiliyeti yoktur. Al 4032 alaşımı düşük ısıl genleşme katsayısına ve yüksek aşınma direncine sahiptir. Bu nedenle bu Al 4032 alaşımı dövme motor pistonlarının üretiminde kullanılmaktadır [7].

#### **2.1.1.4. Al–Mg Alaşımları (5xxx serisi)**

Temel alaşım elementi magnezyum olan 5xxx serisi alüminyum alaşımlarında, alüminyum içerisinde Mg % 0,8' den % 5' e kadar artan oranlarda çözünmektedir. Tavlama ısıl işlemi uygulanmamış durumda olan dayanım değerleri (Örneğin: % 0,8 Mg içeren Al 5005 alaşımı için 40 MPa akma dayanımı ve 125 MPa çekme dayanımı, Al 5456 alaşımı için 160 MPa akma dayanımı ve 310 MPa çekme

dayanımı) değişmektedir. Uzama oranları bağıl olarak oldukça yüksektir ve genel olarak % 25' ten fazla bir orana sahiptir. Korozyon ortamlarında gerilmeli korozyon çatlaması riski ve deformasyon işlemleriyle sertleştirilmiş alaşımlarda yaşlanma yumuşaması olarak bilinen bir sorun oluşur. Al–Mg alaşımları genel olarak kaynaklı uygulamalarda kullanılırlar. Damperli kamyon gövdelerinde, petrol, süt ve tahıl taşımak için geniş tanklar ve özellikle düşük sıcaklıklarda depolamaya gerek duyulan basınçlı tanklarda oldukça sık kullanılmaktadır [7].

#### **2.1.1.5. Al–Mg–Si Alaşımları (6xxx serisi)**

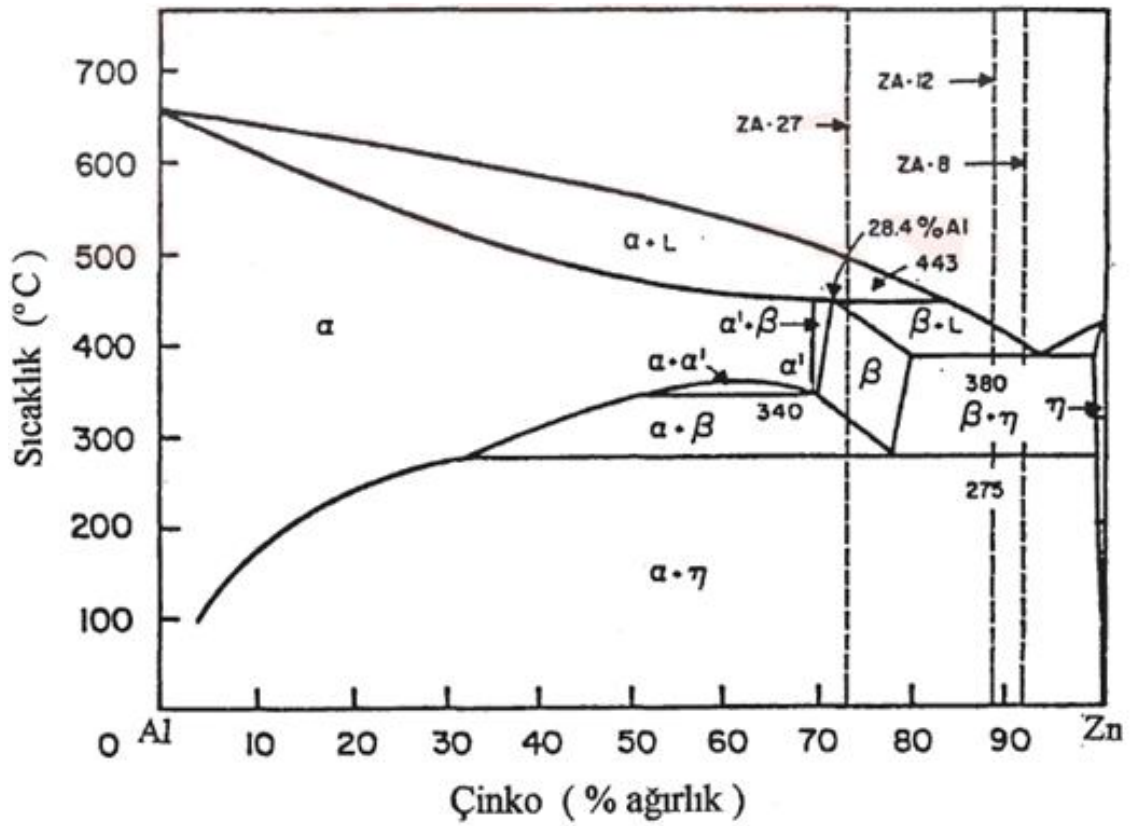
6xxx serisinin temel alaşım elementleri olarak magnezyum ve silisyum belirlenmiştir. Al–Mg–Si alaşımlarının orta düzeyde bir dayanıma sahip olmasının yanı sıra iyi kaynak edilebilme kabiliyetinin olması, korozyona dirençli ve gerilim korozyon çatlağına (SSC) dayanıklı oldukları için yaygın olarak kullanılırlar. Mimari uygulamalarda, ulaşım endüstrisinde, köprüler ve kaynaklı yapılarda bu alaşımlar kullanılmaktadır [7].

#### **2.1.1.6. Al–Zn Alaşımları (7xxx serisi)**

Çinko, 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında (% 1–8 arasında) en önemli alaşım elementidir. Magnezyum ile birlikte kullanılırsa oldukça yüksek bir dayanıma sahip olur ve ısıtılma kabiliyeti olan alaşım elde edilir. Çoğunlukla, az miktarda bakır ve krom gibi diğer elementler de ilave edilebilir. 7xxx serisi alüminyum alaşımları uçakların gövde yapılarında, yüksek gerilme altında çalışan mekanik parçalarda kullanılmaktadır [7]. Magnezyum ve çinko içeren alaşımlar ısıtılma uygulanabilen alaşımlardır ve genel olarak uçak sanayinde kullanılan Al–Mg–Zn–Cu alaşımları olarak ifade edilmektedir [14, 15, 16]. Bu alaşımlarda çinko ve magnezyum oranı % 1' den fazladır ( $Zn/Mg > 1$ ). Örneğin, % 2–8 Zn, 0,5–4 Mg, 0–3 Cu gibi oranlarda kullanılmaktadır. Şekil 2.1' de Al–Zn alaşımının denge diyagramı verilmektedir. Al–Zn alaşımının denge diyagramına göre 7xxx serisi alüminyum alaşımları yaşlandırma ısıtılma işlemi yolu ile sertlik değerleri arttırılabilir. Al–Zn alaşımına az miktarda magnezyum elementi eklenirse malzemenin dayanımında artış gözlenir. Ayrıca Al–Zn alaşımına bakır ve krom ilave edilerek yeni alaşımlar geliştirilmiştir. AA7178

alüminyum alaşımında dayanımı en yüksek değerlerde belirlenen alüminyum alaşımıdır. Al-Zn alaşımlarında gerilim korozyon direncinin düşük olduğu belirlenmiştir.

Gerilim korozyonun meydana geldiği alanlarda çalışacak olan mekanik parçalarda çatlak oluşmaması için o mekanik parçanın biraz daha aşırı yaşlandırma yapılması gerekmektedir. Bu işlem sayesinde arttırılan mukavemet-kırılma tokluğu-korozyon direnci kombinasyonu elde edilir [12].



Şekil 2.1. Al-Zn Denge Diyagramı [12].

### 2.1.2. Döküm Alüminyum Alaşımları

Alüminyumun, silisyum ve magnezyum gibi elementlerle beraber yaptığı alaşımlar, uygulamada en fazla kullanılan alaşımlardır. Alüminyumun bu elementler ile yaptığı alaşımlar, mekanik özelliklerini iyileştirilmesi açısından oldukça önem taşımaktadır [1].

Döküm yöntemi ile şekillendirilen alüminyum alaşımları ANSI tarafından üç haneli bir sayı ile tasnif edilmiştir. Bu sayının ilk hane dövme alüminyum alaşımlarında olduğu gibi alaşım elementini ifade etmektedir. Çizelge 2.3’ de döküm alüminyum alaşımlarının gösterimi verilmektedir.

Çizelge 2.3. Döküm alüminyum alaşımlarının gösterimi [12].

Döküm Alüminyum Alaşımları	
1xx.x	Ticari saflıktaki Alüminyum – Yaşlandırılmaz.
2xx.x	Al-Cu alaşımları – Yaşlandırılabilir.
3xx.x	Al-Si-Cu veya Al-Mg-Si alaşımları – Biraz yaşlandırılabilir.
4xx.x	Al-Si alaşımları – Yaşlandırılmaz.
5xx.x	Al-Mg alaşımları – Yaşlandırılmaz.
7xx.x	Al-Mg-Zn alaşımları – Yaşlandırılabilir.
8xx.x	Al-Sn alaşımları – Yaşlandırılabilir.

1xx.x serisi döküm alüminyum alaşımları minimum alüminyum oranı % 99,0 oranındadır. 3xx.x serisi döküm alüminyum alaşımlarında ise silisyum ana alaşım elementi olarak belirtilmiştir. Ayrıca bakır ve magnezyum gibi alaşım elementleri de 3xx.x serisi döküm alüminyum alaşımlarında alaşımda yer almaktadır. Üç haneli rakamdan sonra nokta konur ve noktayı takip eden sayı dökümü veya ingot mu olduğunu göstermektedir. 0 sayısı varsa döküm olduğunu, 1 veya 2 sayısı varsa ise ingot olduğunu ifade eder. Örneğin Al 356,0 kum veya kokil kalıba dökülmüş alaşımı ifade ederken 356.1 ve 356.2 ingot yapılar olduğunu ifade etmektedir. Döküm alüminyum alaşım gruplarından bazılarında yaşlandırma sertleştirme uygulanarak mekanik özellikler artırılır. Döküm alüminyum alaşım gruplarından bazılarında ise sadece tavlama ısıl işlemi yapılarak sünekliği artırılabilir [12].

#### **2.1.2.1. Al–Cu Alaşımları (2xx.x serisi)**

Duralüminyum olarak da adlandırılan alaşımlar 2xx.x serisi döküm alüminyum alaşımları içerisinde değerlendirilmektedir. Bakır oranı % 2–6 seviyesinde olan bu alaşımlar en yaygın kullanılan alüminyum alaşımlarıdır. 2xx.x serisi döküm alüminyum alaşımları diğer alaşım grupları ile karşılaştırılacak olursa korozyon direnci, diğer alaşım gruplarına göre düşük seviyededir. Kaynak edilebilme yetenekleri sınırlıdır (Örneğin, Al 2024, Al 2025) [1].

#### **2.1.2.2. Al–Si–Mg Alaşımları (3xx.x serisi)**

Al–Si–Mg Alaşımları, iç yapılarında % 1.3' e kadar eşit oranlarda silisyum ve magnezyum içerir. Yaşlandırma ısıl işleminde içerisine miktarda bakır, krom ya da kurşun ilave edilirse korozyon direncini ve dayanımı arttırılabilir. Vidalar, makine parçaları, mobilya ve köprü taşıma elemanlarının üretiminde bu alaşım kullanılmaktadır [1].

#### **2.1.2.3. Al–Si Alaşımları (4xx.x serisi)**

4xx.x serisi döküm alüminyum alaşımları tuz bulunan ortamlarda ortaya çıkan korozyon olayına karşı korozyon dirençlerinin yüksek olması sebebiyle deniz ulaşımında kullanılan taşıtların yapımında kullanılmalarına olanak sağlamıştır. Bilinen en yaygın kullanılan 4xx.x döküm alaşımlarıdır (Örneğin, Al 413.0, Al 443.0) [1].

#### **2.1.2.4. Al–Mg Alaşımları (5xx.x serisi)**

Döküm alaşımı olarak da bilinen 5xx.x serisi alüminyum alaşımları, korozyon dirençlerinin yüksek olması nedeniyle otomotiv ve uçak üretim sektöründe kullanılırlar. 5xx.x serisi alüminyum alaşımları iç yapılarında % 10' a kadar magnezyum (Mg) ihtiva ederler (Örneğin, Al 512.0) [1].

### 2.1.2.5. Al–Mg–Zn Alaşımları (7xx.x serisi)

Mikro yapılarında % 1–7.5 çinko ve % 3.3 magnezyum bulundurlar. Dayanımını artırmak için bu alaşıma krom (Cr) ve bakır (Cu) ilave edilmektedir. Bu son eklene metallerin etkileri kaynak yeteneğini olumsuz yönde etkiler. En yüksek dayanımda olan alüminyum alaşımları 7xx.x serisi içerisinde ele alınmaktadır. Uçak yapımda yapısal malzeme olarak kullanılırlar (Örneğın, Al 7055, Al 7075) [1].

### 2.1.2.6. Al–Sn Alaşımları (8xx.x serisi)

Alaşımın oluşumu için kullanılan kalay (Sn) miktarı % 20–30 civarında değişmektedir. Yorulma dayanımlarının fazla olmasından dolayı yüksek yük taşıma yetenekleri fazladır. Bu özellikleri sayesinde otomotiv sektöründe bağlama elemanı ve ambalaj sektöründe konserve kutusu olarak kullanılmaktadır (Örneğın, Al 821.0, Al 832.0) [1].

### 2.1.3. AA7075 Alüminyum Alaşımı

AA7075 alüminyum alaşımları, hafif olmaları ve T6 ısıl işlem şartlarında yüksek dayanım özellikler sağlamaları nedeniyle uçak, uzay endüstrisinde ve otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılan bir yapısal malzemedir [17]. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi izelge 2.4’ de verilmiştir. AA7075 alüminyum alaşımı ilk olarak 1943 yılında geliştirilmiştir. Diğer 7xxx serisi alaşımlarında olduğu gibi dayanımı çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi ile arttırılır. Genel olarak levha şeklinde üretilir. Kullanım alanının yaygınlaşması üzerine dövme, ekstrüzyon ve kalın levha şeklinde üretimi de yaygınlaşmıştır [18].

Çizelge 2.4. Ticari AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi [18].

Alaşım Elementi	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
% Ağ.	5,1–6,1	2,1–2,9	1,2–2,0	Max 0,5	Max 0,4	Max 0,3	0,18–0,28	Max 0,2	Kalan

AA7075 alüminyum alaşımı diğer alüminyum alaşımlarına göre daha yüksek dayanıma sahiptir. AA7075 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri Çizelge 2.5' te verilmektedir.

Çizelge 2.5. AA7075 alüminyum alaşımının fiziksel özellikleri [18].

Özgül Ağırlık	2,81 gr / cm <sup>3</sup>
Elastik Modülü	7300 kg / mm <sup>2</sup>
Rijitlik Modülü	2750 kg / mm <sup>2</sup>
Ergitme Sıcaklığı Aralığı	477– 635 °C
Özgül Isı (0–100 °C arasında)	0,23 cal/gr °C
Lineer Genleşme Katsayısı (20–100 °C, T6 için)	24–10–6 mm/°C
Özgül Elektrik Direnci (20 °C, T6 için)	0,058 Ohm.mm <sup>2</sup> /m

AA7075 alüminyum alaşımının yüksek mekanik özelliklerine rağmen, atmosfer ortamı gibi düşük aktiviteli ortamlarda bile gerilim korozyon çatlamaına hassas olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle ticari AA7075 alüminyum alaşımı levhalar genel olarak her iki tarafına korozyona dayanıklı bir alüminyum alaşımı olan "Alclad" denilen metal ile kaplanmış şekilde piyasaya sunulur. AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini arttırmak için T6 yapay yaşlandırma ısıl işlemi uygulanmaktadır [18].

Plaka ve sac gibi şekillerde üretilen AA7075 alüminyum alaşımlarına, alaşım elementlerinin çok küçük oranlarda katılması yoğunluğunun çok az arttırmasına karşılık olarak, mekanik özellikleri ile dökülebilirlik özeliğinde önemli artışlar gözlenmektedir. Yüksek mukavemet ile ortalama tokluk ve en önemli özelliklerinden biri olan hafifliği nedeniyle uzay ve havacılık sektöründe yoğun olarak kullanılmaktadır. Alüminyum kaplanan saclar, 101,6 mm kalınlığa kadar olan yapısal levha bileşenleri alüminyumun genel olarak uzay ve havacılık uygulamalarında kullanılır. Günümüzde kullanılmakta olan birçok askeri ve ticari amaçlı uçakların üst kanat panelleri ile alt yatay dengeleyici panellerinde, gövde kirişleri ve gövde omurga kirişlerinde ekstrüzyon yöntemiyle üretilen malzemeler kullanılır. Hafif olması nedeniyle tercih edilen diğer kullanım alanlarından biri de piston ve piston

kolları ve motor gövdeleridir. Isı iletiminin yüksek olması sebebiyle, AA7075 alüminyum alaşımlarının piston şeklinde kullanılması durumunda daha yüksek sıkıştırılarak uygulanabilir halinde kullanılmasını sağlar. Silah donanımlarında, mermi yapımında, uçakların iniş takımlarının çalıştırılması için kullanılan silindirlere ve bu silindirlerin yapısal parçalarında, basıncı yüksek şartlar altında çalışan alanlarda v.b. yerlerde kullanılırlar [18].

T6 ısıtma işlemi, 7xxx serisi alüminyum alaşımları için en yüksek dayanım değerini sağlayan ticari bir ısıtma işlemi türüdür. Geleneksel olarak T6 ısıtma işlemi, çözündürme ısıtma işleminin malzemeye uygulandıktan sonra su verilerek 120 °C' de 24 saat yaşlandırma ile elde edilmektedir. T6 ısıtma işlemi, AA7075 alüminyum alaşımına uygulandığı zaman ısıtma işlem sürelerine göre mekanik özellikleri şu değerlere kadar arttırmaktadır. Çekme dayanımı 228 MPa' dan 572 MPa' a yükselir. Akma dayanımı 103 MPa' dan 503 MPa' a değişir. Sertliği 60 BSD' nden 150 BSD' ne kadar çıkabilmektedir. Ayrıca AA7075– T6 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri ele alınacak olursa, ortalama olarak bir yay çeliğinin mekanik özelliklerine kadar ulaşabilmektedir [18].

En yüksek mukavemet şartlarına kadar yaşlandırılan (T6 ısıtma işlemi) AA7075 alüminyum alaşımlarının taneler arası gerilim korozyon çatlağına hassas olduğu belirtilmektedir (özellikle klorür içeren ortamlarda daha fazladır) [18].

Çökme sertleşmesi ısıtma işlemi uygulanmış alüminyum alaşımlarında, çökelekler veya çökeleklerin etrafında, alaşım elementlerinin etki etmediği bölgeler, belirli korozyon ortamlarında matrise ve etraflarındaki bu elementçe fakir olan bölgeye göre elektrokimyasal potansiyel farktan dolayı anodik olarak davranırlar. Bu çökeleklerin tane sınırları boyunca korozyona uğramaları sonucunda tane sınırlarına yakın olan seri olarak bir boşluklar oluşacaktır. Tane sınırlarına dik gelen gerilmelerin etkisi ile burada oluşan oyuklar büyüyüp birleşerek oyuklanmaya sebep olmaktadır [18].

AA7075 alüminyum alaşımlarının istenilen en yüksek dayanımı T6 ısıtma işlem koşullarında sağladığı belirlenmiştir. Ancak korozyon direncinin düştüğü; 7xxx serisi



alüminyum alaşımlarının mukavemet özelliklerinde azalma olmadan yüksek bir oyuk korozyon direncinin kazandırılabilmesi için yapılan çalışmaların çoğu ısıl işlem şartları ve çökelek özellikleri üzerinde yoğunlaşmaktadır. Dayanım özellikleri ve korozyon direnci gibi özellikler alaşımın çökelek yapısı ile (tür ve dağılımları ile birlikte) çok yakından ilgilidir. Çökelti yapıları alaşımın metalürjik şartlarını, mekanik özelliklerini ve korozyon davranışını belirler [18].

### BÖLÜM 3

#### ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMLERİ VE ISIL İŞLEM KODLARI

Döküm yöntemi veya dövme yoluyla üretilen alüminyum alaşımlarının ısı işlem uygulamaları, bir veya birkaç harf ile tanımlanmaktadır. Temel olarak 4 çeşit ısı işlem gösterimi kullanılmaktadır. Bu gösterimlerden (O) tavlı; (F) fabrikasyondan sonraki hali; (H) rekristalizasyon sıcaklığının altındaki sıcaklıklarda yapılan plastik şekillendirme sonucunda sertlik ve mukavemetin artışı, (T) ısı işlem durumundaki metal veya alaşım göstermektedir. (W) solüsyona alma ısı işleminden sonraki malzemede kalıcı olmayan yapıyı göstermekle birlikte, eğer belirli bir süre verilirse o zaman belirli bir ısı işlem ifadesi olarak kullanılır. Çizelge 3.1’ de alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler ve ısı işlem kodları verilmektedir.

Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısı işlemler ve ısı işlem kodları [19].

Isıl İşlem Kodu	Uygulanan Isıl İşlem
<b>F</b>	Fabrikasyon hali
<b>O</b>	Tavlınmış (En yüksek süneklik, en düşük dayanım)
<b>H</b>	Soğuk şekillendirilmiş
<b>H1</b>	Sadece soğuk şekillendirilmiş
<b>H2</b>	Soğuk şekillendirilmiş ve kısmen tavlınmış
<b>H3</b>	Soğuk şekillendirilmiş ve kararlı hale getirilmiş
<b>T</b>	Yaşlandırılmış
<b>T1</b>	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
<b>T2</b>	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
<b>T3</b>	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış
<b>T4</b>	Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış

Çizelge 3.1 (devam ediyor).

<b>T5</b>	İmalat sıcaklığından soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
<b>T6</b>	Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış
<b>T7</b>	Çözeltiye alınmış ve aşırı yaşlanma ile kararlı hale getirilmiş
<b>T8</b>	Çözeltiye alınmış, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
<b>T9</b>	Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş
<b>T10</b>	İmalat sıcaklığından soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış
<b>T351</b>	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış. Hadde ürünleri uygulamaları için geçerlidir.
<b>T3510</b>	T351 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için.
<b>T352</b>	Çözeltiye alınmış, sıkıştırma ile gerilim giderilmiş ve doğal yaşlandırılmış.
<b>T651</b>	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve yapay olarak yaşlandırılmış. Levhalar için geçerlidir.
<b>T6510</b>	T651 için uygulanan işlemler. Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için geçerlidir.
<b>T73</b>	Çözeltiye alma ve korozyon dayanımını arttırmak için aşırı yapay yaşlandırma uygulanmış
<b>T7651</b>	Çözeltiye alınmış, kontrollü miktarda germe ile gerilim giderilmiş ve korozyon dayanımını arttırmak için yapay olarak yaşlandırılmış. Levhalar için geçerlidir.
<b>T76510</b>	T7651 için uygulanan işlemler Ekstrüzyonla üretilmiş boru, çubuk vb. profilleri için geçerlidir.

### 3.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ ISIL İŞLEMİ

Isıl işlem, genel olarak metal veya metal alaşımlarının mekanik ve fiziksel özelliklerini geliştirmek amacıyla yapılan katı halde uygulanan, kontrollü bir şekilde uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanmaktadır [20].

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtma işlem çeşitleri genel olarak şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Döküm yoluyla üretilen yapılarda kimyasal segregasyonu azaltmak için ve işlenebilirlik özelliğini kolaylaştırmak için yapılan ön ısıtma veya homojenleştirme işlemi,
- 2- Deformasyon sertleşmesi (pekleşme) ve ısıtma işlem görmüş alaşımlı yapıları yumuşatmak, gerilimleri ortadan kaldırmak, tanecikli yapının özelliklerini ve boyutlarını sabit hale getirmek için tavlama ısıtma işlemi,
- 3- Alaşım elementlerinin katı çözeltilerini oluşturmak ve malzemenin mekanik özellikleri geliştirmek için çözelti oluşturma ısıtma işlemi,
- 4- Katı çözeltiden tanelerin çökmesiyle sertleşme sağlamak için çökeltme ısıtma işlemleri [7].

### **3.1.1. Homojenizasyon İşlemi**

İngotlara yarı bitmiş şekillerde üretilmeden önce yaklaşık 450–600 °C sıcaklık aralıklarında homojenizasyon işlemi uygulanır. Homojenizasyon işlemindeki amaçlar şu şekilde sıralanabilir:

- 1- Mikrosegregasyonun etkilerini azaltmak,
- 2- Malzemenin gerilme altında çalışması sırasında çatlak oluşumuna neden olan, kararsız, düşük ergime noktasına sahip olan ötektik yapıyı ortadan kaldırmak için kaldırmak,
- 3- Malzemenin katılaşması sırasında içerisinde çözülmüş olan elementlerin yüksek konsantrasyonlarının çökmesini kontrollü olarak sağlamak,

Homojenizasyon işlemi, alaşım elementlerinin tane sınırlarından ve diğer çözeltiler açısından zengin olan bölgelerden tanelerin merkezlerine difüzyon yolu ile gerçekleşir. Bu işlem tane boyutu (veya dentritlerin kol boşluğu) ve alaşım elementlerinin difüzyon hızına bağlı olarak değişen gerekli sürelerden etkilenmektedir [7].

### **3.1.2. Tavlama İşlemi**

Tavlama işlemi, ısıtma işlemi uygulanabilen ve uygulanamayan alüminyum alaşımlarında soğuk deformasyon etkisini sonlandırmak amacıyla 300–450 °C sıcaklıkları arasında uygulanan bir ısıtma işlemidir. Malzemenin yumuşama sıcaklığı, ilk olarak tavlama sıcaklığına bağlı olduğundan, malzemenin yumuşaması için gerekli olan süre; düşük tavlama sıcaklıklarında saatlerle, yüksek sıcaklıklarda dakikalarla ifade edilebilir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan tavlama işlemleri amaçlanan özelliklere göre değişiklik gösterebilir. Tavlama süresi ve tavlama sıcaklığı malzemenin ilk aşamada oluşan içyapısı ve uygulanan ısıtma işlemine göre değişebilir veya alaşımın çeşidine göre de farklılık göstermektedir [7].

### **3.1.3. Gerilim Giderme Tavlaması**

Gerilim giderme tavlaması, ısıtma işlemi uygulanabilen dövme (işlem) alaşımlarında sadece deformasyon sertleşmesi işleminde meydana gelen etkileri ortadan kaldırmak için uygulanır. Gerilim giderme tavlamasında tavlama sıcaklığı 345 °C' ye kadar çıkabilir. Gerilim giderme tavlaması işleminin sonucunda sadece toparlanma, kısmi rekristalizasyon veya tamamen rekristalizasyon da meydana gelebilir [7].

## **3.2. ÇÖKELTME SERTLEŞMESİ ISIL İŞLEMİ**

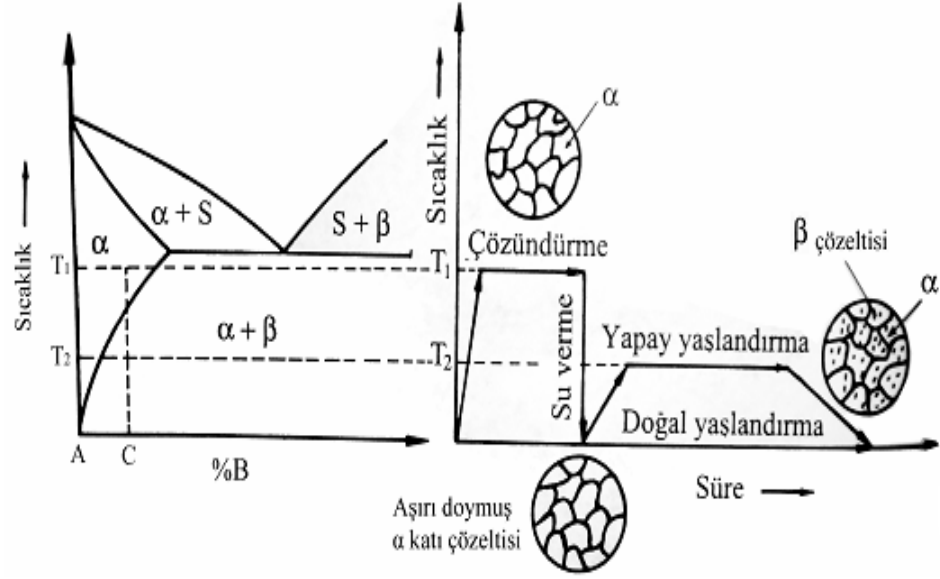
Alüminyum alaşımlarında ısıtma işlemi süresi boyunca meydana gelen yapı ve özellik değişimleri, çözünme ve belirli alaşım elementlerinin çökmesi ile oluşur. Çökme sertleşmesi, aşırı doymuş katı fazdan zaman ve sıcaklığın etkisiyle yeni bir fazın çökmesi sonucu malzemenin sertlik ve mukavemetinin artmasıdır. Çökme sertleşmesi, denge diyagramlarında doygunluk eğrisi içeren alaşım sistemlerinde ve sadece doygunluk eğrisinin sınırladığı katı eriyik bileşimlerinde oluşabilir. Yani, alaşım elementinin çözünme miktarı sıcaklık arttıkça artmalıdır. Isıtma işlemi uygulanabilen alüminyum alaşımlarından 2xxx, 7xxx serisi alaşımlar ve bunlara son yıllarda rağbet gören Al–Li alaşımları özellikle havacılık endüstrisinde kullanıldığı için 2xxx ve 7xxx alaşımların ısıtma işlemi teknolojik olarak oldukça önemlidir. 2xxx

ve 7xxx alaşımlarının kullanımında mukavemet, tokluk, yorulma gibi mekanik özellikleri ve gerilim korozyon dayanımı gibi özellikler ortaya çıkmaktadır [19].

### **3.2.1. Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşleminin Aşamaları**

#### **3.2.1.1. Çözeltiye Alma İşlemi**

Çözeltiye alma işlemi Cu, Mg, Si ve Zn gibi sertleştirmeyi sağlayan, çözünen element atomlarının katı çözelti içindeki konsantrasyonunu artırmak için yapılmaktadır. Bu nedenle daha sonra yapılacak olan çökeltme (yaşlandırma) işlemine bir zemin hazırlanmış olur. Bu elementlerin çözünürlükleri sıcaklıkla birlikte oldukça fazla artmaktadır. Ayrıca difüzyon hızı arttığı için çözünme hızı da sıcaklıkla birlikte artar. Bu sebeple en yüksek oranda çözünmenin olduğu sıcaklık ergime sıcaklığına çok yakındır. Fakat ergitme sıcaklığından kaçınılmalıdır. Ticari alaşımların çözüldürme ısıl işlemi için belirlenen sıcaklıklar ötektik sıcaklığın sadece 10–15 °C altında olduğundan, ısıl işlem fırınlarında ısıl işlem sıcaklığının çok iyi kontrol edilmesi ve üniformluğunun sağlanması gerekmektedir [9]. Çözeltiye alma sıcaklığı normalden düşük olduğunda, ikincil faz parçacıklarının tamamen çözünmesi mümkün değildir. Bu nedenle malzemenin sertlik değeri düşer [10]. Çözüldürme sıcaklığında beklenmesi gereken süre malzemenin şekline, alaşım türüne, kullanılan döküm veya plastik şekil verme yöntemine ve kesitin kalınlığına bağlı olarak değişir. Bu faktörler çözelti içindeki veya dışında kalmış alaşım atomu oranını ve çökelen fazların boyut ve dağılımını belirler. Dövme alaşımlarında, kalınlıklarının her 25 mm' si için en az 1 saat ısıtılmaları gerekir. Alüminyum alaşımlarında çözeltiye alma sıcaklığı 465–564 °C' dir. Örneğin; AA7075 alüminyum alaşımında çözeltiye alma sıcaklığı 460–473 °C' dir[10]. Şekil 3.1' de çözüldürme ve yaşlandırma ısıl işlem aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesi işlemi şematik olarak verilmektedir.



Şekil 3.1. Çözündürme ve yaşlandırma aşamalarını içeren çökeltme sertleşmesi işleminin şematik görüntüsü [10, 16, 21].

### 3.2.1.2. Su Verme İşlemi

Su verme işlemi, çökeltme sertleşmesi ısıl işleminin en kritik aşaması olarak değerlendirilmektedir. Su verme işleminin amacı, çözeltiye alma aşamasında oluşan mikro yapının oda sıcaklığına getirilmesidir [12, 16, 21].

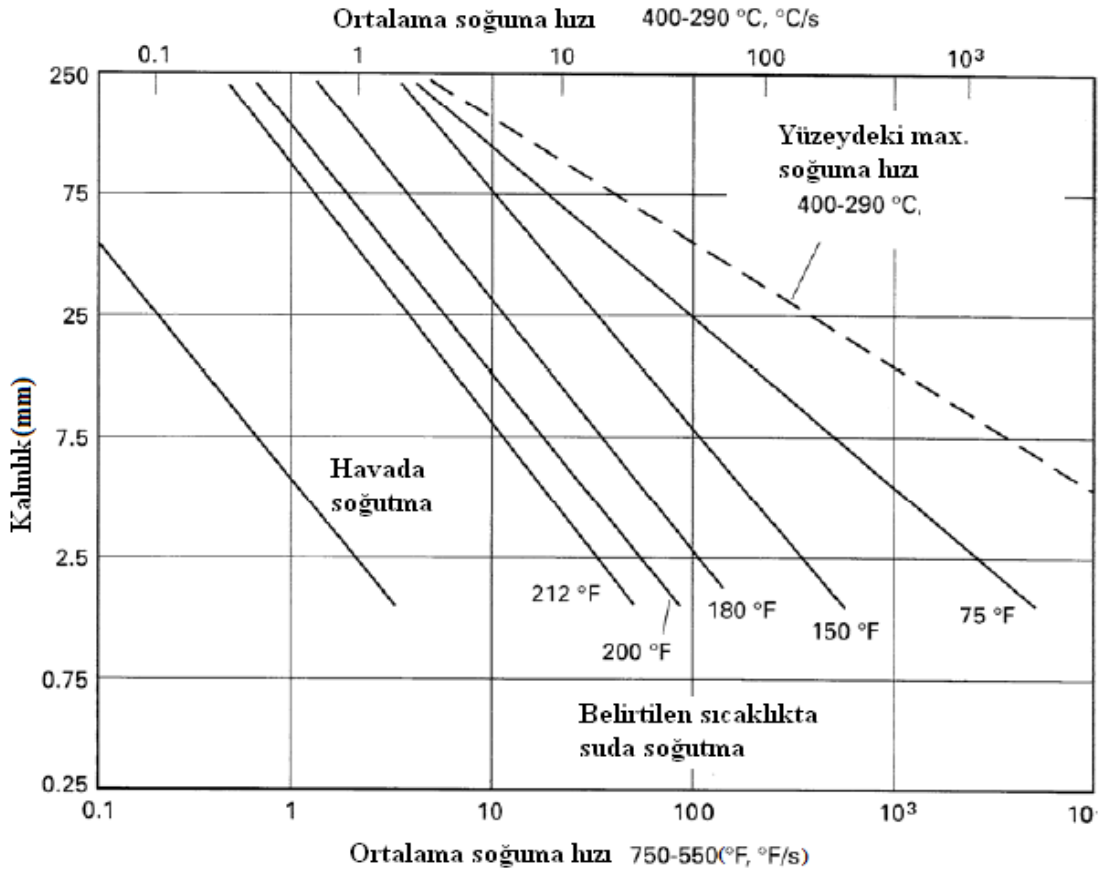
Alaşımın çözeltiye alma sıcaklığından oda sıcaklığına veya oda sıcaklığına yakın bir sıcaklığa hızlı bir şekilde soğutulduğu bu aşamada, çözeltiye alma sırasında meydana gelen tek fazlı katı çözelti yapısının korunması amaçlanmıştır. Su verme işlemi sırasında meydana gelen diğer bir durum ise atomlar arası boşlukların konsantrasyonu ile ilgilidir. Malzemenin yapısında bulunan atomsal boşluklar, sıcaklığın artışıyla beraber artar. Buna bağlı olarak, çözeltiye alma sıcaklığında dengede olan atomsal boşluklarının konsantrasyonu, oda sıcaklığındaki konsantrasyon değerinden oldukça yüksektir. Bu durum dahilinde, ani soğuma sonucu, malzemenin yapısında büyük miktarda atom boşluğu oluşmaktadır. Su verilmiş haldeki malzemede oluşan atomsal boşluklar, bir sonraki yaşlanma aşamasında atom yayınmasını kolaylaştıran bir faktör olarak belirlenen çökelti fazlarının çekirdeklenme hızını ve büyüme hızını arttırmaktadır.

Genel olarak malzemenin soğuk suya daldırılmasıyla uygulanan su verme işlemi, sürekli olarak ısıtma işlemiyle üretilen, sac, levha veya ekstrüzyon ürünlerinde çözeltiye alma safhasında ortaya çıkan ürünlerin yüzeyine yüksek hızda su püskürtülerek uygulanmaktadır. Farklı su verme ortamlarının oluşturduğu farklı su verme hızlarının etki ettiği mekanik özellikler alaşımdan alaşıma farklılık göstermektedir. Genel olarak en yüksek dayanım ve tokluk değerleri, en yüksek su verme hızlarında meydana gelir. Korozyon ve gerilim korozyon çatlak direnci, su verme hızının artışına orantılı olarak etki etmektedir [18].

### **3.2.1.3. Su Verme Ortamları ve Soğuma Hızı**

Su verme ortamı olarak genellikle su ve hava-su karışımı ortamlar olarak uygulanır. Ya iş parçası su ortamına daldırılır veya iş parçası üzerine (su, hava-su) püskürtülür. Kullanılan ortamın türü, sıcaklığı ve hareket hızı su verme aşamasını etkiler. Şekil 3.2' de su sıcaklığının ve parça kalınlığının soğuma hızı üzerindeki etkisi verilmektedir. Su sıcaklığı kaynama sıcaklığından (100 °C) itibaren düşüldükçe soğuma hızı artar. Parça kalınlığı arttıkça soğuma hızı yavaşlamaktadır [11]. Şekil 3.2' de çözeltiye alınan malzemede su verme esnasında oluşan soğuma hızı farklılıkları gösterilmiştir.





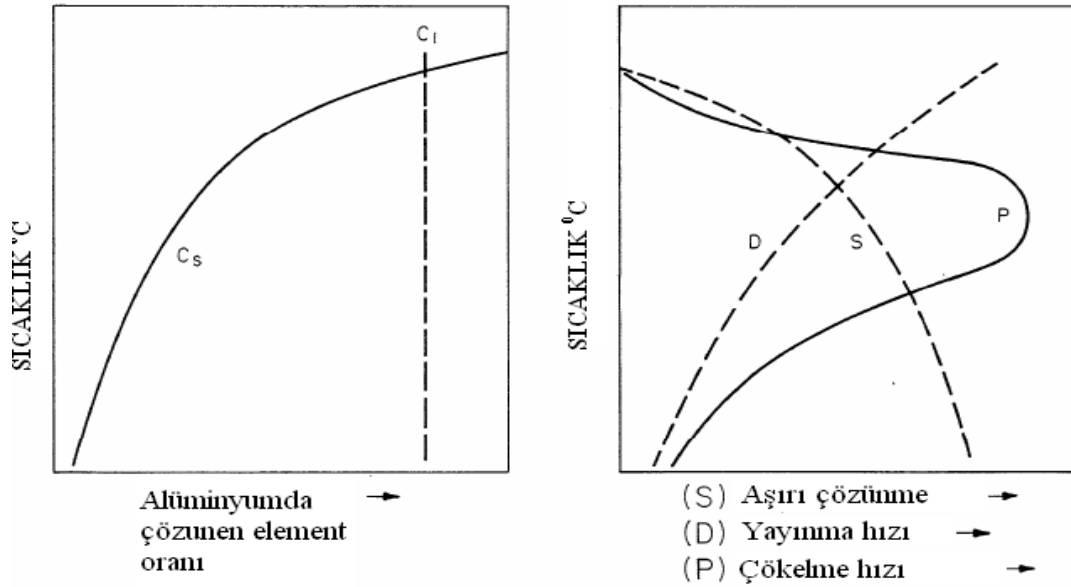
Şekil 3.2. Çözeltiye alınan alüminyum alaşımı levha ve saçlara su verildiğinde parça merkez hattında ortalama soğuma hızı [12, 22].

Su verilecek parçalar, çözeltiye alma fırınında ısıtılmasından sonra manuel veya mekanik olarak fırından alınır ve su verme sistemine taşınır. Parçanın fırından çıkarılıp, su vermenin başlamasına kadar geçen süre maksimum gecikme süresinden en az olmalıdır. Su verilen parçaların yüzey özellikleri soğuma hızını etkilemektedir. Yüzeyi temizlenmiş, kumlanmış parçalarda soğuma hızı daha düşük olur [12].

#### 3.2.1.4. Kritik Sıcaklık Aralığı

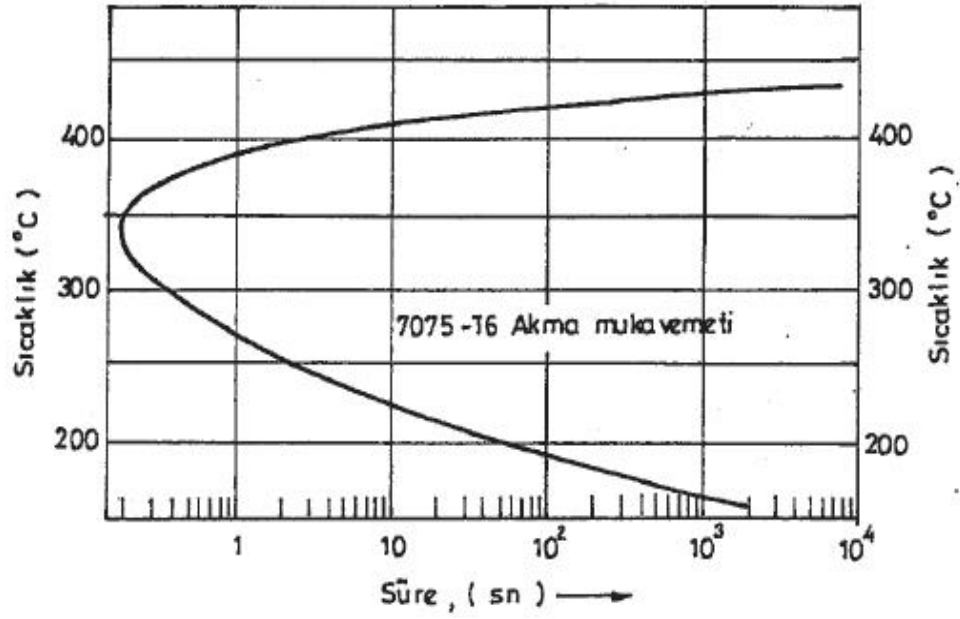
Çökeltme ısıl işlemi ile sertleştirilen alaşımlarda, çökeltme yapılan mikro yapıdaki aşırı çözünürlük oranı ve difüzyon hızı oldukça önemli bir etkidir. Bu iki faktör sıcaklık ile değişir. Çökeltme sıcaklığı azaldıkça aşırı çözünürlük oranı ve difüzyon hızı azalır. Şekil 3.3' te C1 kimyasal bileşiminde ve CS solvüs eğrisi verilen bir alüminyum alaşımı görülmektedir. Çözeltiye alma işleminden sonra mikro yapıdaki aşırı çözünürlük oranı (C1-CS) şeklinde S eğrisi ile gösterilmiştir. Sıcaklık azaldıkça

S artmaktadır. D eğrisi ise alaşım elementi atomlarının alüminyum matris içerisindeki difüzyon hareket hızını göstermektedir. Sıcaklık azaldıkça atom yayınma hızı azalır. P eğrisi ise çökeltme hızını göstermektedir. Düşük ve yüksek sıcaklıklarda çökeltme hızı düşüktür. Orta sıcaklıklarda ise etkin olan faktörler uygun hale geldiğinden dolayı çökeltme hızı artar. Yüksek sıcaklıklarda çökeltinin çekirdek oluşumu oldukça yavaştır. Yüksek sıcaklıklarda atomların yayınması fazla olsa da aşırı çözülmüş atom oranı çok az olur. Bu nedenden dolayı çökeltme hızı çok yavaş olur. Düşük sıcaklıklarda ise difüzyon hızı çok düşük olduğu için, aşırı çözünme oranının yüksek olmasına rağmen çökeltme hızı yavaş olur. Orta sıcaklıklarda etkin faktörler devreye girer ve maksimum çökeltme hızına ulaşır. Sonuç olarak aynı miktarda çökelti oluşturmak için gerekli olan sıcaklık ve süreler C şeklinde bir eğri oluştururlar [12].



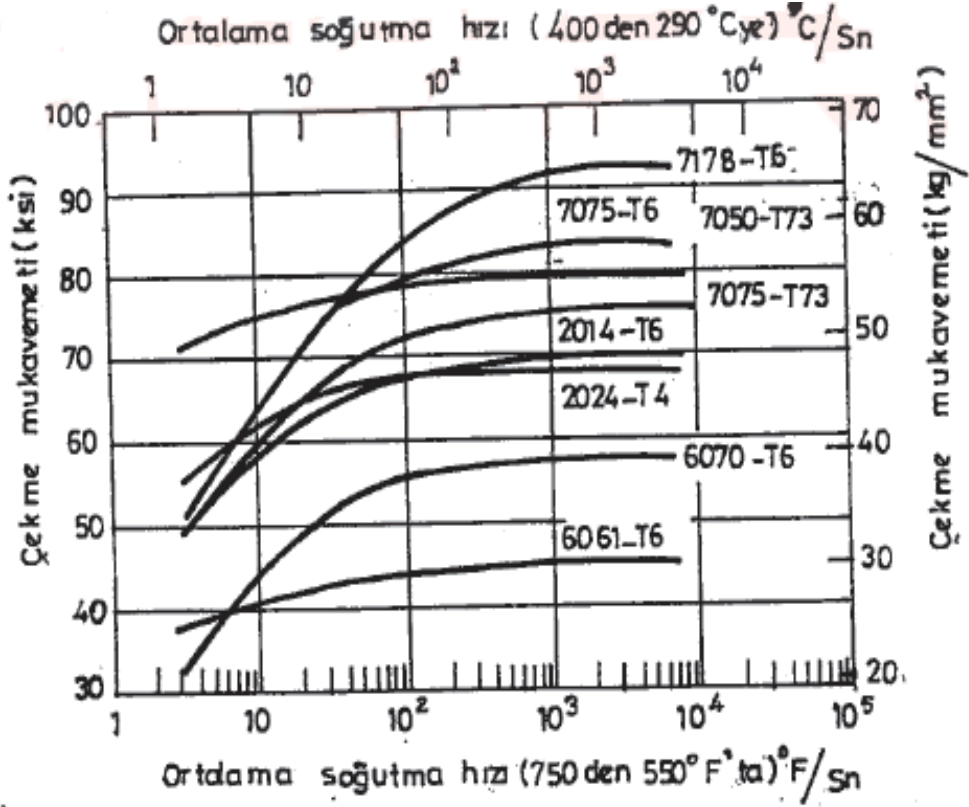
Şekil 3.3. Çökeltme hızını tayin eden faktörler üzerinde sıcaklığın etkisi [7].

Şekil 3.4' te Al-Zn-Mg (7xxx serisi) alüminyum alaşımının C eğrisi görülmektedir. Bu diyagramda belli bir mukavemet seviyesini elde etmek için yeteri kadar meydana gelen çökeltmenin sıcaklık-süre kombinasyonu görülmektedir. Bu C eğrileri her alaşımın belli bir mukavemet değeri için gerekli yaşlandırma şartlarını verir [12, 22].



Şekil 3.4. Al-Zn-Mg (7xxx serisi) alüminyum alaşımının C-egrisi [22, 23].

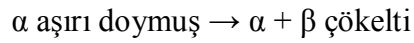
Birçok alüminyum alaşımında yaşlanma işlemi sonrası elde edilen mukavemet üzerinde su verme hızının etkisi ortaya çıkmıştır. Bu eğrileri ortaya çıkarmak için kalınlıkları farklı parçalara, farklı ortamlarda su verilerek kritik sıcaklık aralığından farklı soğuma hızları elde edilmiştir. 400–290 °C sıcaklıkları arasındaki soğuma süreleri alaşımların çekme mukavemeti değeri üzerinde etkili olmaktadır. Bu sıcaklıklar kritik sıcaklıklar arasındaki sıcaklıklardır [7]. Şekil 3.5’ te çeşitli alüminyum alaşımlarında soğuma hızının mukavemete etkisi verilmiştir. C eğrilerinin dirsek noktası en yüksek çökme hızının oluştuğu bölgeyi gösterir, yani bu bölge kritik sıcaklık aralığını gösterir.



Şekil 3.5. Çeşitli alüminyum alaşımlarında soğuma hızının mukavemete etkisi [22, 23].

### 3.3. YAŞLANDIRMA İŞLEMİ

Aşırı doymuş katı çözelti içerisinde bulunan çözünmüş ikinci faz partikülleri, sıcaklık ve zamanın etkisiyle kararlı bir faz olarak çökeler ve bu dönüşüm;



şeklinde gösterilir [19].

Bu dönüşümün oluşması için önce  $\beta$  fazının çekirdeklenmesi ve sonra difüzyon (yayınma) yolu ile büyümesi gerekir. Eğer alaşım ani bir soğumadan sonra oda sıcaklığında tutulursa yayınma hızı çok yavaş olduğu için  $\beta$  fazı genellikle oluşmaz veya oluşması uzun zaman alır ve doğal yaşlanma olarak belirtilir. Difüzyon hızını arttırmak amacı ile ani soğutulmuş olan alaşım, yüksek bir sıcaklıkta tutulursa

çökme daha kısa bir zamanda oluşur. Buda yapay yaşlanma olarak bilinmektedir [19].

Oda sıcaklığında çökme çok yavaş ilerlediğinden dolayı, doğal yaşlandırma sonucu alaşımın mekanik özelliklerinin yüksek ve kararlı bir hale gelmesi için oldukça uzun bir süre gerekmektedir. Bu süre, alaşımdan alaşıma değişmekle birlikte, birkaç günden birkaç yıla kadar çıkabilmektedir. Bu tür alaşımlara, bazı durumlarda yapay yaşlandırma uygulanarak yüksek sertlik ve dayanım değerlerinin daha kısa sürede elde edilmesi amaçlanmaktadır. Çökmenin düşük hızlarda oluştuğu, bundan dolayı da kısa doğal yaşlandırma sürelerinde kararlı mekanik özellik değerlerinin sağlanamadığı alaşımlar, her zaman yapay yaşlandırma uygulanarak kullanılmaktadır. Yapay yaşlandırma işlemi, çözeltiliye alma ve su verme işlemlerinin ardından, alaşımı 115–190 °C gibi nispeten düşük sıcaklıklarda uzun süre (5–48 saat) tutma şeklinde uygulanmaktadır. Yapay yaşlandırma ısıl işlemi AA7075 alüminyum alaşımı için 120 °C' de 24 saat olarak belirlenmiştir. Alaşımlar, yapay yaşlandırma sonunda genellikle en yüksek dayanım değerlerine ulaşmaktadır [18].

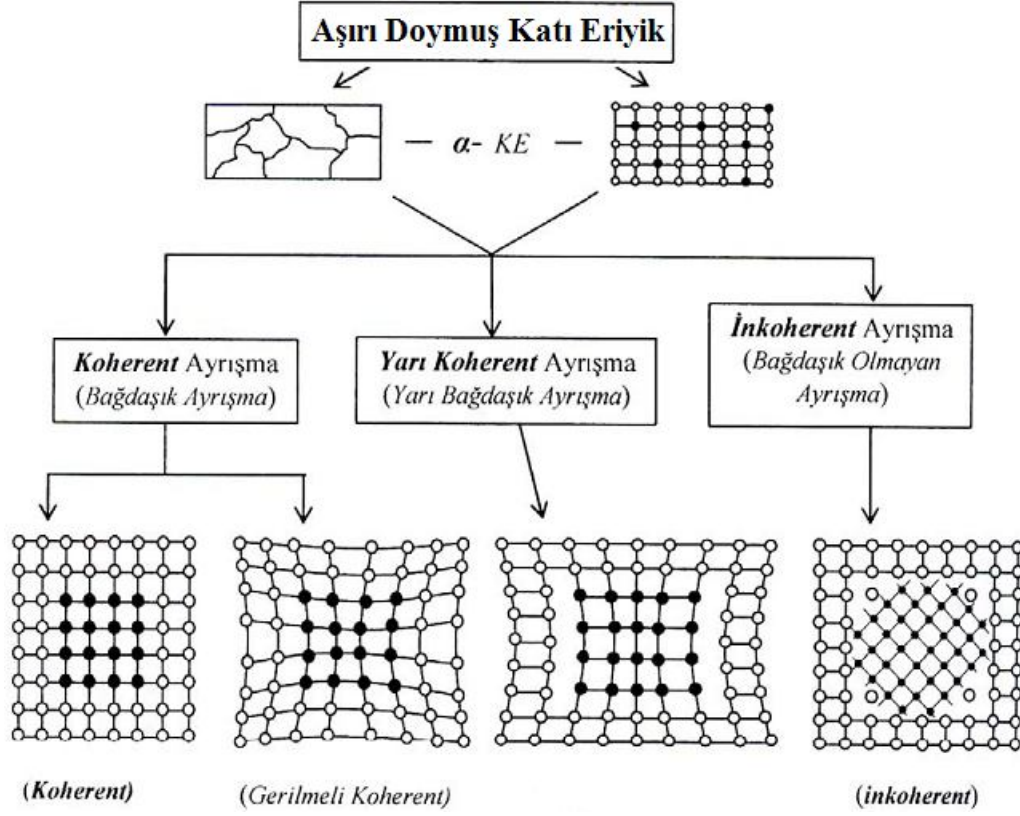
### **3.3.1. Çökeltme Sertleşmesi Sürecinde Oluşan Dönüşümler**

Çözeltiliye alma ve ani soğutma işlemlerinden sonra alaşım aşırı doymuş hale gelir ve oda sıcaklığında veya daha yüksek bir sıcaklıkta yapılan yaşlandırma ısıl işlemi sırasında, bu aşırı doymuş katı faz içerisinde yeni fazlar çökeltmektedir. Yaşlanma sürecinde meydana gelen yarı kararlı ya da kararlı çökelti fazlarının oluşum sırası genel olarak;

Aşırı doymuş katı çözeltili → Yarı kararlı geçiş fazları → Kararlı denge fazı

şeklinde sıralanır.

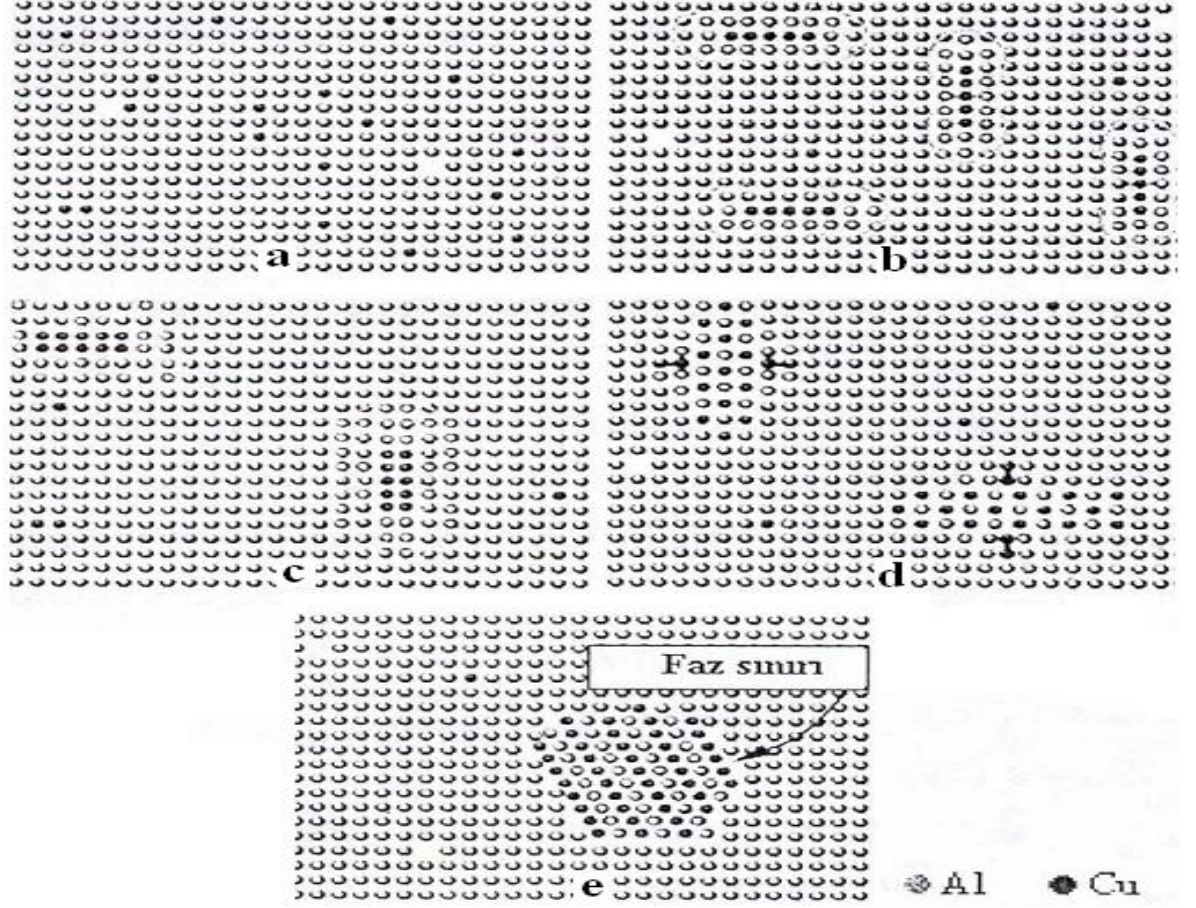
Şekil 3.4' te yaşlanma sürecinde oluşan yarı kararlı ya da kararlı çökelti fazlarının oluşumu sırası ile belirtilmektedir.



Şekil 3.6. Aşırı doymuş katı eriyikten ayrışma modelleri [19].

Yaşlandırma işlemi sırasında oluşan çökelti fazları, matrisle uyumlu, yarı uyumlu veya uyumsuz olabilmektedir. Katı çözelti içinde çözünen atomlar tek fazlı bir yapı içerisinde dağılmışlardır. Uyumluluk, çökeltinin ve matrisin kafes düzlemlerinin bire bir karşılık gelmesidir. Yaşlandırma süresi arttıkça, uyumluluk korunmakla birlikte, oluşan yeni fazın etrafındaki atomlar bir miktar distorsiyona uğrar. Bu sırada uyumluluk deformasyonu sebebiyle bir deformasyon bölgesi oluşur. Çökeltinin partikülü büyüdükçe, dislokasyonların oluşumu, kafes etrafındaki deformasyon alanını ve buna bağlı olarak her iki kafes düzlemi arasındaki bire bir uyumu belirli bir miktar azaltır. Bu durum, yarı uyumluluk olarak bilinmektedir. Şekil 3.7' de görülen küçük boyutlu matrisle uyumlu olan  $\theta''$  çökelti fazı (bazen GP-2 zonu olarak da adlandırılmaktadır.) kafes etrafındaki deformasyonun yarattığı gerilme alanı dislokasyon hareketlerini engellemekte oldukça etkilidir. Uyumsuzluk, iki kafes düzleminin bire bir karşılıklı olarak yönlenmemesidir. Aşırı yaşlanma sonucu oluşan  $\theta$  çözelti fazı, boyutlarının büyümesine bağlı olarak matrisle uyumsuzdur ve kafes

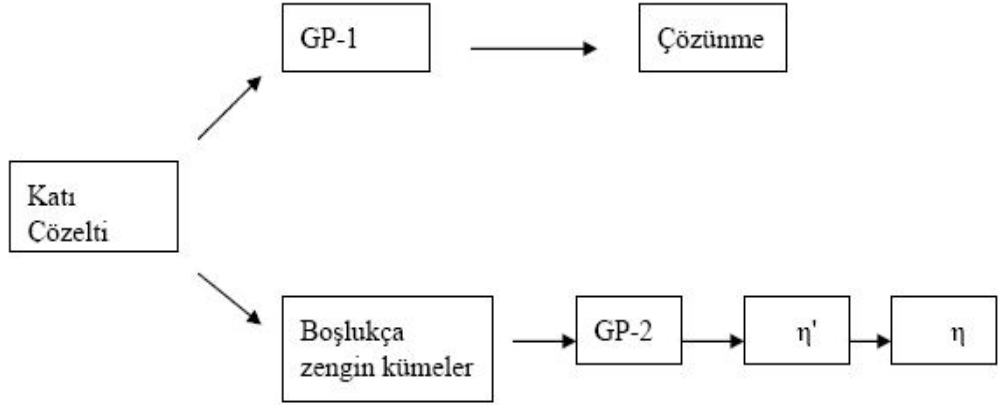
etrafındaki deformasyon alanının azalmasından dolayı dislokasyon hareketlerini engellemede  $\theta''$  fazı kadar etkili değildir [19].



Şekil 3.7. Al-Cu sisteminde oluşan bazı ara fazların şematik gösterimi a) Katı çözeltili, b) GP-1 zonları, c) GP-2 zonları, d)  $\theta_1$  fazı, e)  $\theta$  fazı [19].

### 3.3.2. Al-Zn-Mg Alaşımlarında Meydana Gelen Faz Dönüşümleri

Yaşlandırma işlemi sırasında Al-Zn-Mg içeren 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında oluşan çökelti fazlarının sırası ve türü, alaşımın bileşimine, soğuma ortamlarına ve yaşlandırma sıcaklığına bağlıdır. Şekil 3.8' de Al-Zn-Mg alaşım sisteminde genel olarak meydana gelen dönüşüm sırası gösterilmektedir.



Şekil 3.8. Al-Zn-Mg alaşımlarında göreceli yüksek yaşlandırma sıcaklıklarında mikroyapı bileşenlerinin oluşum sırası [19].

### 3.3.2.1. GP Bölgeleri (Zonları)

GP zonları, yaşlandırmanın ilk aşamasında oluşan çok küçük (<3 nm), çözünen element zengini kümeciklerdir. GP zonlarının bileşimi, alaşımın bileşiminden bağımsızdır ve GP zonları yarı kararlı bir faz olarak oluşmaktadırlar. AA7075 alüminyum alaşımında, GP zonları düşük sıcaklıklarda ( $T \leq 75^\circ\text{C}$ ) aşırı yaşlandırma sonucunda ilk ayrışmada ortaya çıkan üründür. Al-Zn-Mg alaşımlarında bileşimi Al-MgZn<sub>2</sub> faz alanı içindedir. Küreseldir ve YMK yapıya sahiptir [19].

### 3.3.2.2. η' Fazı

Oluşan alaşım içerisinde GP zonları, yaşlandırma ısı işlemi sıcaklığında daha uzun süre tutulursa yeni bir çökelti oluşur. Oluşan bu çökelti çekirdeklenerek ve büyür. En az bir yüzeyi matrisle uyumlu olan (yarı uyumlu) aradaki bu çökelti Al-Zn-Mg (7xxx serisi) alaşımlarında η' olarak isimlendirilmektedir. Oluşan bu yeni çökelti geçiş fazlarıdır. Bu çökelti kristal yapıları matrisin kristal yapısından farklıdır. η' fazları GP zonlarından daha büyük olsalar da alaşımın sertliğini alaşım içindeki GP zonlarından daha fazla artırır [19].



### 3.3.2.3. $\eta$ ve T Kararlı Fazları

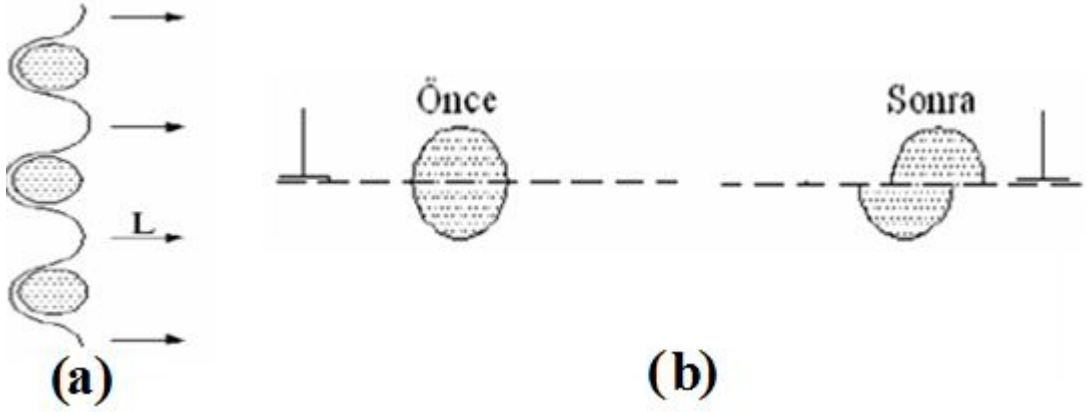
Al–Zn–Mg (7xxx) alaşımlarında kararlı faz olarak belirlenen  $MgZn_2$  formülü ile belirtilen  $\eta$  fazı, hegzagonal kristal yapısına sahiptir. Kafes parametresi  $a= 5,16\text{--}5,21$  Å,  $c=8,49\text{--}8,55$  Å arasındadır.  $\eta$  fazı uyumsuz bir fazdır ve genel olarak uyumsuz veya yarı uyumlu bir ara yüzeyde çekirdeklenme oluşur.  $\eta$  fazı alüminyum matris ile uyumsuz sınırlar oluşturmaktadır. Kararlı faz olan T fazı, yüksek sıcaklıklarda oluşur ve bileşimi çok yüksek çinko ve magnezyum elementi içerir. Bileşimi % 20–35 Mg, % 22–65 Zn ile geniş bir aralıktadır. T fazı  $(AlZn)_{49}Mg_{32}$  veya  $Mg_3Zn_3Al_2$  formülü ile ifade edilmektedir. Yaklaşık  $190$  °C’ nin üzerindeki sıcaklıklarda oluşur ve kübik sistemde bulunur. Al–Zn–Mg alaşımlarında düşük sıcaklıklarda T fazının oluşum aralığı azalmakta ve  $200$  °C’ den yüksek sıcaklıklardaki yaşlandırma ısıl işlemlerinde oluşmaktadır. Bu yüzden bazı araştırmacılar düşük sıcaklıklarda oluşan  $\eta$  fazına ara faz adını vermektedirler. T fazının çekirdeklenme boyutu oldukça büyüktür. Bu sebepten dolayı iri çökelti yapısına uygun şekilde büyük partiküllü olarak aşırı yaşlandırılmış alaşımlarda bulunmaktadır. T fazının alaşım sisteminin mukavemet artışında önemli bir rolü yoktur [19].

### 3.3.3. Çökeltme Sertleşmesi Isıl İşlemi ile Mukavemet Artışı

Çökelen parçacıklar dislokasyon hareketine engel oldukları zaman malzemenin sertliği artar. Çökelti parçacıkları genel olarak matrisin sertliğinden daha fazladır ve deformasyon esnasında dislokasyon hareketi engellenir. Bu durum dahilinde de çökelti arasında kalan dislokasyon parçaları çökelti parçacıklarını geçmek için uygulanan gerilmeye bağlı olarak hareket eder ve parçacıkları içine alır. Dislokasyonlar her yönde hareket ettiğinden dolayı çökelti çevresindeki halka sayısı çoğalır ve malzemede dislokasyon yoğunluğunu arttırır. Şekil 3.9’ da Orowon mekanizması ile iri çökeltilerin ayrılması şematik olarak gösterilmektedir.

İnce çökelti fazı içeren malzemede dayanım veya sertliğin artmasının başlıca iki sebebi vardır bunlar;

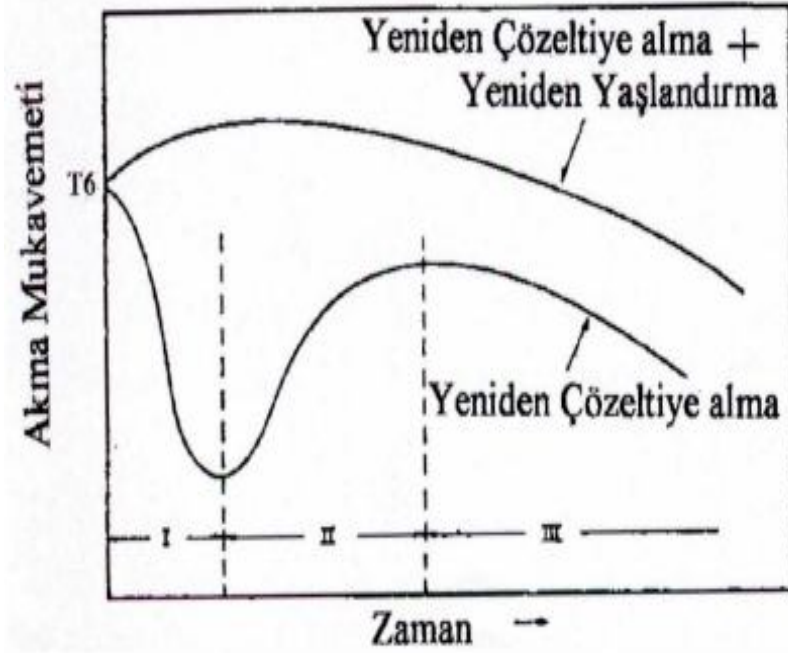
- 1- Dislokasyon yoğunluğunda artış olması,
- 2- Dislokasyon hareketlerinin zorlanması,



Şekil 3.9. Orowon mekanizması ile çökeltilerin ayrılması a) Çökeltiler arasında oluşan yarım halka şeklindeki dislokasyonlar. b) Aşırı büyük çökeltilerin dislokasyonlar tarafından kesilmesi [24].

#### 3.4. YENİDEN ÇÖZELTİYE ALMA VE YENİDEN YAŞLANDIRMA (RRA) İŞLEMİ

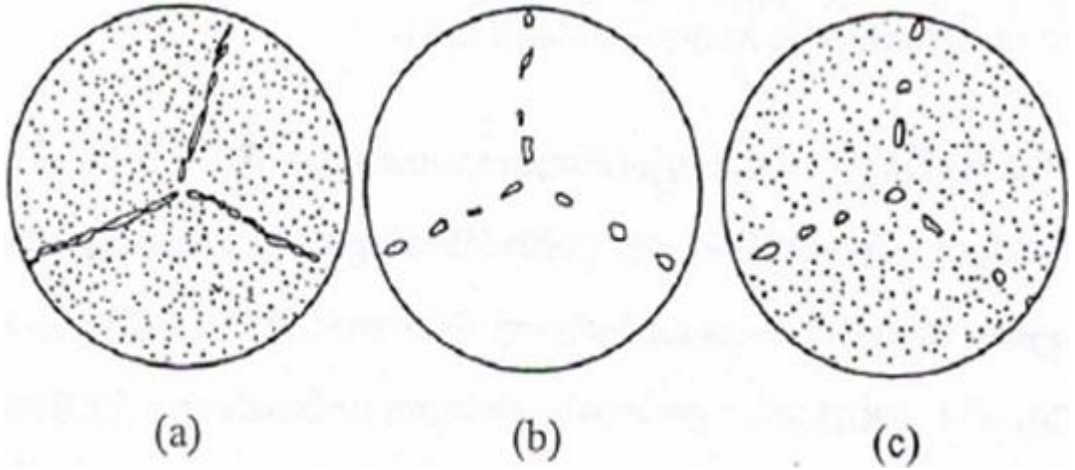
RRA ısıtıl işlemi, T6 ısıtıl işlemi uygulanmış malzemeye, 180–280 °C sıcaklıkları arasında başlangıçta kısa süreli bir yeniden çözeltiye alma işlemi ve daha sonra orijinal T6 ısıtıl işleminde uygulanan sıcaklıklar ve sürelerde yeniden yaşlandırma ısıtıl işlemidir. RRA ısıtıl işlemi sonucunda, malzemenin dayanımında artış sağlandığı gibi, gerilim korozyon çatlağına (SCC) karşı direnci T73 ısıtıl işlemindeki dayanımını korumaktadır. Böylece, T6 ve T73 ısıtıl işlem özellikleri bir arada sağlanmış olur. Şekil 3.8’ de, AA7075 alüminyum alaşımında RRA ısıtıl işlemi ile malzemenin sertliğindeki değişim şematik olarak gösterilmiştir. Yeniden çözeltiye alma işleminin başında akma mukavemetindeki azalma (I. Bölge) GP zonlarının kısmi olarak çözünmesinden, bir süre sonra akma mukavemetinde meydana gelen artmanın (II. Bölge)  $\eta'$  fazındaki çökeltilerin oluşumu ve kararlı hale gelmesi, en son ise III. bölgede meydana gelen azalmanın çökeltilerin irileşmesinden kaynaklandığı ileri sürülmüştür. Buna göre; RRA ısıtıl işleminde optimum özellikler yeniden çözeltiye alma eğrisindeki minimum değere karşılık gelmektedir [19]. Şekil 3.10’ da RRA ile meydana gelen şekil değişimi görülmektedir.



Şekil 3.10. RRA işlemi esnasında sertlikteki değişim [19, 23, 25, 26].

### 3.4.1. Retrogression İşlemi Sırasında Oluşan Dönüşümler

Retrogression süreci boyunca malzemenin içyapısında meydana gelen faz dönüşümleri, ilk olarak retrogression sıcaklığı ve retrogression süresi olmak üzere, metal ve alaşımların kimyasal bileşimi ve başlangıçta uygulanan ısı işlem özellikleri gibi pek çok faktörden etkilenebilmektedir. Şekil 3.11’ de, AA7075 kalite alüminyum alaşımının T6 ısı işlem durumu ile retrogresyon ve yeniden yaşlandırma kademelerinden sonraki mikroyapıları şematik olarak verilmektedir. Retrogression işlemi öncesinde T6 temper durumundaki alüminyum alaşımının mikroyapısında, tane içlerine doğru homojen bir şekilde dağılmış 3–4 nm boyutlarında yarı uyumlu  $\eta'$  fazı ile sürekli ve sürekli ya da yarı sürekli bir ağ şeklinde, boyutu daha büyük ve daha uyumsuz  $\eta$  fazı bulunmaktadır.



Şekil 3.11. AA7075 alaşımının; a) T6 işlemi b) retrogresyon c) retrogresyon ve yeniden yaşlandırma sonrası şematik mikroyapısı [19].

Retrogression (yeniden çözeltilmeye alma) işlemi süreci boyunca malzeme içerisinde oluşan yapısal dönüşümler genel olarak üç mertebede incelenir. Retrogression (yeniden çözeltilmeye alma) işlemi sırasında alaşımlar, yaşlandırma sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklıkta yapıldığı için retrogression sürecinin I. Aşamasında birbirine uyumlu bileşenler (GP zonları (bölgeleri) ya da  $\eta'$  parçacıkları) kısmi olarak ya da tamamen çözünmektedir. Bundan dolayı retrogression ve yeniden yaşlandırma (re-aging) süreci özellikle, birbirine uyumlu mikroyapı bileşenleri içeren alaşım sistemleri için önerilmektedir. Kısa süre içinde gerçekleşen retrogression işlemi için GP zonlarının kısmi olarak çözüldüğü öne sürülen çalışmalarda, bu olayı toparlanma mekanizmasına dayandırılmaktadır. Bu çalışmalara göre, GP zonlarının kısmi olarak çözüldüğü bölgelerde,  $\eta'$  fazı için uygun çekirdeklenme merkezi oluşturmaktadır. Ayrıca GP bölgeleri malzeme içerisinde çözüldüğü zaman, matrisin magnezyum ve çinko metallerince zengin duruma gelmesi,  $\eta'$  fazlarının çekirdeklenerek büyümesine neden olmaktadır. Dolayısıyla retrogression sürecinin I. aşamasında, yapıda daha önce var olan  $\eta'$  fazının büyümesi ve çözünen GP zonları üzerinde yeni  $\eta_1$  fazlarının oluşumu aynı anda meydana gelmektedir. Ancak geçirimli elektron mikroskopundaki incelemelerde, retrogression işleminin I. aşamasında  $\eta'$  fazının boyut ve dağılımının T6 ısıtma işlemi durumundaki fazdan çok farklı olmadığı belirlenmiştir. Dolayısıyla kısa süre içinde gerçekleşen retrogression işleminde bu reaksiyonların aynı hızda olmadıkları, GP zonlarının çözünmesi için baskın bir mekanizma olduğu ileri sürülmüştür. Ayrıca  $\eta'$  fazının çözünmesinin 250 °C' a kadar olan sıcaklıklarda

gerçekleşmediği, bunun da I. Aşamada sadece GP zonlarının çözüldüğü görüşünü destekleyen bir sonuç olduğu belirtilmektedir. Diğer çalışmalarda, Al-Zn-Mg alaşımlarında retrogression işleminde GP zonları ile birlikte  $\eta'$  parçacıklarının da kısmi olarak çözüldüğü, çözünmeyen  $\eta'$  parçacıklarının ise büyüdüğü belirtilmiştir. Retrogression işleminin sıcaklığı arttıkça çözünme hızının azalması sonucunda, birbirine uyumlu mikroyapı bileşenlerinin çözünmesi daha kısa sürede gerçekleştiği için, çözünme reaksiyonunun süresi de retrogression sıcaklığı ile kontrol edilebilmektedir [19].

### **3.5. HTPP (HIGH TEMPERATURE PRE-PRECIPITATION) ISIL İŞLEMİ**

HTPP (High Temperature Pre-Precipitation) ısıl işlemi alüminyum alaşımlarına uygulanan, yüksek sıcaklıklarda ön çökelti oluşturarak malzemelerin dayanımını arttırmak için uygulanan bir ısıl işlemdir. Genel olarak HTPP (High Temperature Pre-Precipitation) ısıl işlemi malzemenin, 485 °C' de 2 saat çözeltiye alma, 450 °C' de 30 dakika ön çökelek oluşturma ve 120 °C' de 24 saat fırın ortamında yaşlandırma işlemi ile yapılır [27].

## BÖLÜM 4

### YORULMA

Pek çok makine parçası ve yapı elemanları kullanım sırasında, tekrarlanan yüklere maruz kalır. Sürekli değişen gerilmelerin etkisinde kalan malzemelerde gerilmelerin maksimum değeri yerine bunların tekrarı önemlidir. Tekrarlanan gerilmeler altında çalışan metalik parçalarda, maruz kalınan gerilmeler parçanın akma dayanımından daha düşük olmasına rağmen, belirli bir tekrarlanma sayısı sonunda yüzeyde bir çatlak oluşumu ve bunu takiben kırılmaya sebep olur [28, 29]. Bu olay “Yorulma” olarak tanımlanır.

Yükleme ve boşaltmanın periyodik olarak çok sayıda tekrarlanması sonucunda numune içyapısında oluşan karmaşık termik ve mekanik değişimler nedeniyle, malzemede çözülme, yıpranma ve ayrışmalar meydana gelmektedir. Özellikle metalik malzemelerin yıpranmasının en önemli etkeni olması nedeniyle yorulma olayı çok önemlidir. Makinelerde oluşan hasarların ortalama % 80' nin yorulma kopmalarından kaynaklandığı belirtilmektedir [28].

Malzemelerde yorulmaya neden olan tekrarlı gerilmeler eksensel, kayma, eğilme ve burulma yüklerinden birinin veya birkaçının birlikte etki etmesiyle oluşur. Yorulma kopmasına uğrayan parçalara miller, bağlantı çubukları, dişliler, yataklar, cıvatalar, yaylar, türbin kanatları, motor parçaları ve raylı sistem tekerlekleri gibi hareketli parçalar örnek verilebilir. Bu nedenle bu elemanların tasarımında ve imalatında dikkat edilmesi gereken önemli özelliklerden birisi de yorulmadır. Dinamik yük altında çalışan parçaların yorulma özellikleri hakkında doğru bilgi alabilmek için bu parçaların ya gerçek kullanım şartlarında ya da bu şartlara yakın çalışma koşulları altında test edilmeleri gerekir. Ancak, bu yöntem zaman alıcı ve pahalı olduğu için belirli standartlara göre hazırlanan örneklerle basit laboratuvar testleri yapılarak malzemelerin yorulma davranışları hakkında bazı temel bilgiler elde edilebilir.

Yorulma testleri için yaygın olarak kullanılan cihazların başında Wöhler tipi cihazlar gelir [20].

Yorulma olayı üç aşamada incelenir;

- 1- Çatlak Başlangıcı,
- 2- Çatlak ilerlemesi,
- 3- Kırılma,

Çatlak Başlangıcı; Genel olarak yüksek gerilme yığılmalarının olduğu bölgelerde veya kristal yapıdaki noktasal hatalarda çatlak başlar.

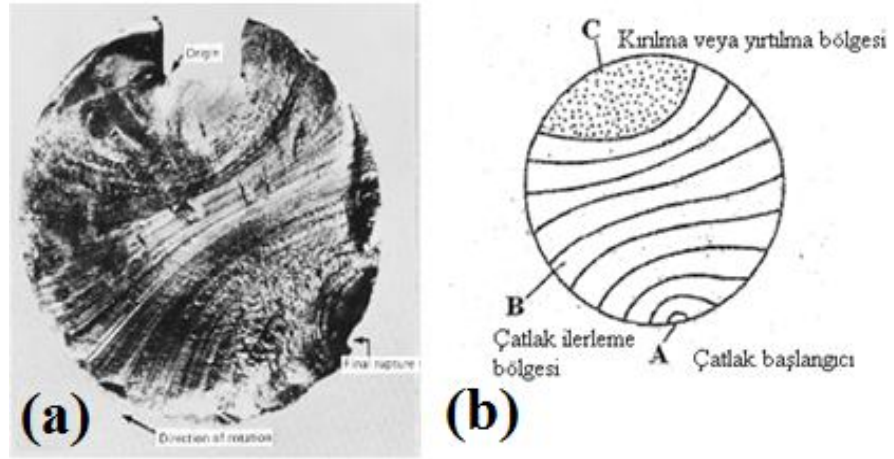
Çatlak ilerlemesi; Çatlaklar genel olarak yüzeyden başlayarak, kayma hatları ile orta kısımlara doğru ilerler. Ayrıca, malzemenin içindeki mikro çatlaklar ve çatlak ucunda oluşan gerilme yığılması çatlak ilerletebilecek seviyede ise çatlak ilerler. Uygulanan gerilme çatlak ilerlemesi için yetersiz ise malzemede yorulma olmaz. Uygulanan gerilme, çatlak ilerlemesine neden olacak kadar büyük ise çatlak malzemenin gevşek yerlerinden ilerlemeye başlar. Böylece yıpranma yavaş yavaş tüm kesite yayılır. Ayrıca büyük ve belirleyici bir uzama veya büzülme görülmez.

Kırılma; Yıpranma sebebiyle ayrışma işlemi yeterli derecede ilerledikten sonra kesitin geri kalan kısmı uygulanan yükü taşıyamaz hale gelir ve malzeme ani bir şekilde kopar. Yorulma olayı malzemede önemli bir plastik şekil değiştirme yapmadığından ve uyarı vermeden elastikiyet limitinin altındaki gerilmelerde malzemenin ani olarak göçmesi sebebiyle çok fazla tehlikelidir. Bu tip gevrek kırılma olayları çelik köprülerde, kötü yolda giden arabalarda, uçak kanatlarında görülebilir [30].

#### **4.2. MALZEMELERDE YORULMA OLAYI**

Tekrarlı gerilmeler altında çalışan malzemelerin mukavemeti azalır, çekme mukavemetinin çok altındaki gerilmelerde ise kırılma dahi oluşabilir. Buna olayın sebebi “yorulma”dır. Yorulma kırılması gevrek türde olduğu zaman nerede ve ne zaman olacağını anlamak zordur. Geçmiş yıllarda birçok kazaya neden olduğu için

yorulma kırılması üzerinde yoğun çalışmalar yapılmış ve daha halen yapılmaktadır. Bununla birlikte çok değişik etkenlerin etki ettiği bu karışık olayı yakından tanımlamakla yorulma kırılmalarını önlemek mümkün olabilir. Yorulma kırılmasının yüzeyin görünüşü çok ilginçtir. Yüzeyde çatlağın başladığı yorulma odağı ile onu çevreleyen midye kabuğunu andıran aynı merkezli eğriler ve bunların yanında taneli bir bölge görülür. Çatlak zamanla yavaş yavaş ilerlerken karşılıklı yüzeylerin sürekli birbirine sürtünmesi sonucunda yorulma kırılması yüzeyi parlak görünür. Çatak ilerleyip geri kalan dolu kesit normal yükü taşıyamaz hale gelince ani kırılma meydana gelir ve kırılma yüzeyi taneli görünüştedir. Şekil 4.1' de yorulma sonucu kırılan bir parçanın kırılma yüzeyi görülmektedir.



Şekil 4.1. Yorulma sonucu oluşan kırılma yüzeyleri a) yorulma deneyinde kırılma yüzey görünümü b) Yorulma sonucunda kırılan bir malzemenin kırılma yüzeyinin şematik gösterimi [20].

Yorulma olayının nasıl oluştuğu tam olarak açıklanamamış olmakla beraber bu konuda bilinenler burada özetlenecektir. Yorulma genellikle mikroyapıdaki mevcut kusurlar civarında oluşan yerel gerilme yığılmalarından kaynaklanır. Bundan dolayı yorulma olayı içyapıya çok bağlıdır. İçyapıdaki çatlak, çentik boşluk sert parçacık ve ani kesit değişimleri civarındaki gerilmeler ortalama gerilmelerden daha büyüktür. Bu gerilmeler etkisinde yerel plastik şekil değiştirme meydana gelir. Diğer taraftan başlangıçta hiçbir bozukluk içermeyen yüzeyi parlatılmış üniform kesitli bir metalde elastik sınır altında da dislokasyonlar yerel olarak hareket ederek kayma bantları oluştururlar. Bu bantlar da yüzeyde çıkıntılar ve çöküntülerin doğmasına dolayısıyla gerilme yığılmalarına neden olurlar. Bütün bu hallerde tekrarlı zorlamalar etkisiyle



oluşan tersinir olmayan plastik şekil değiştirme sonucu malzeme pekleşir, gevrekliği artar ani yorulma kırılması meydana getirir. Yorulma çatlakları genellikle yüzeyde başlar ve içeriye doğru yayılır [31].

#### **4.2.1. Alüminyum Alaşımlarının Yorulma Özellikleri**

Alüminyum ve alüminyum alaşımlarının alaşımların yorulma dayanımlarının düşük olmasının nedeni, tüm metallerdeki etkin faktörlere ilave olarak, alüminyum ve alaşımlarında, tane sınırlarının yakınında bulunan, nispeten sertlik değerleri düşük, çökelti olmayan bölgeler ve yarı kararlı parçacıkların çökmesinden kaynaklanmaktadır. Bu parçacıklarda gerilmeler yoğunlaşmaktadır ve aşırı yaşlandırma ya da çözünme gibi sebeplerle, kayma bantları üzerinde parçacıkların kaybolması, bu bölgelerde gerilmelerin yoğunlaşmasını daha fazla arttırmaktadır. Bu da kırılma sürecini hızlandırıcı bir faktör olmaktadır. Bu sorunu önlemek için, kaymanın, diğer bileşenlerce yapı içinde homojen olarak dağıtılması önerilmiş ve bu öneri ışığında, metaller arası bileşik ya da impürite içeren ticari alüminyum alaşımlarının yorulma dayanımının, yüksek saflıktaki alaşımlardan daha yüksek olacağı belirtilmiştir. Yorulma koşulları altında, yüzeyi giydirilmiş sacların yorulma dayanımı, yüzeyi giydirilmiş saclara göre önemli ölçüde azaldığı belirtilmiştir. Örneğin, 2014 Alclad alaşımının, atmosfer koşullarında yapılan düzlemsel eğme yorulma dayanımı, giydirilmemiş haline göre % 50 daha düşüktür. Bu olumsuz etki, yorulma çatlaklarının, yüzeydeki yumuşak giydirilmiş tabakada kolaylıkla başlamasından kaynaklanmaktadır. Eksenel yorulma koşullarında, ya da bir sistemin alt elemanı olarak çalışan malzemelerde, giydirilmiş tabakanın olumsuz etkisi daha azdır [19].

Bazı alaşım sistemlerinde alaşımın yapısına düşük miktarda (% 0,5 oranında) gümüş ilave edilirse, yaşlandırma işleminden sonra, yapı içerisinde çok ince çökeltiler oluşturarak o alaşımın çekme dayanımını arttırmakta, ancak bu sırada yorulma dayanımını azalmaktadır. Bu alaşımın aynı sıcaklıkta yaşlandırma süresi artar ise, yapıda daha büyük ikinci faz parçacıklar oluşur ve çekme dayanımı bir miktar azalır. Ancak, kaba boyutlu bu ikinci faz parçacıklar, kaymayı yapı içerisine dağıtıcı bir rol üstlenir ve yorulma dayanımını artırır. Dolayısıyla, bu durumda, ince ve nispeten

kaba yapılı iki tip parçacıklar içeren bir yapının, hem çekme hem de yorulma dayanımının yüksek olacağını gösterilmektedir[18].

### **4.3. YORULMA MUKAVEMETİNE ETKİ EDEN FAKTÖRLER**

Bir malzemenin yorulma mukavemetine etki eden başlıca etkenler aşağıdaki şekilde sıralanabilir [31, 32];

- 1- Parçanın yüzey işleme kalitesi
- 2- Sıcaklık
- 3- Çevrenin kimyasal etkisi
- 4- Frekans
- 5- Gerilme koşulları
- 6- Çentik hassasiyeti
- 7- Malzemenin mikro yapısı (Tane boyutu ve malzemenin içyapısı)

#### **4.3.1. Parçanın Yüzey Kalitesi**

Yorulma çatlakları çoğu zaman yüzeyde başlayıp içeriye doğru yayıldığı için yüzey işleme kalitesinin önemi artmaktadır. Yüzeydeki pürüzler çentik etkisi yaratır ve çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yüzey işleme kalitesi arttıkça yorulma mukavemeti de artmaktadır [31].

#### **4.3.2. Sıcaklık**

Sıcaklığın etkisi genellikle malzemenin mukavemetini azaltıcı yönde etkiler. Bu nedenle yorulma mukavemetinde de bir azalma olur. Düşük sıcaklıklarda yorulma dayanımının arttığı bilinmektedir. Bazı durumlar dışında sıcaklık artışı yorulma mukavemetini azaltmaktadır [10].

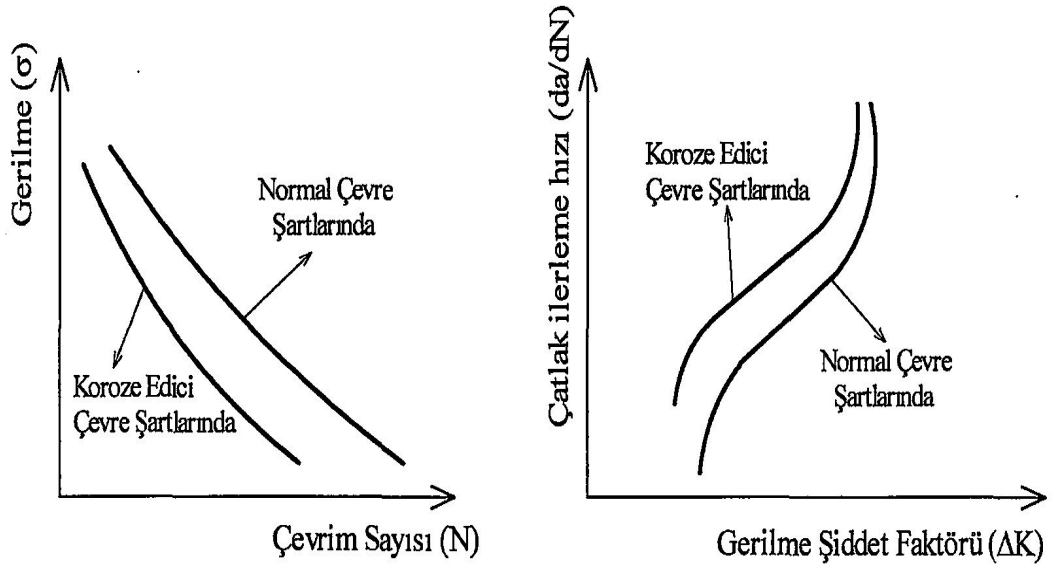
Oda sıcaklığının altında bir sıcaklıkta yapılan testlerde, sıcaklık düştükçe yorulma dayanımı artmaktadır. Sıcaklık çentik hassasiyeti ile ters orantılı olarak değişir. Geçiş sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta ani bir değişim olmaz. Oda sıcaklığının üzerine

çıkıldıkça düşük karbonlu çeliklerde 200–300 °C arasında deformasyon yaşanması, çekme mukavemeti ve yorulma mukavemetinin azalmasına sebep olur. Sıcaklık 400 °C' ye ulaştığında sürünme devreye girer. Oda sıcaklığında tane boyutu küçüldükçe yorulma mukavemeti artar. Sıcaklık değişiminin meydana getirdiği termal gerilmeler yorulma kırılmasına sebep olabilir [19].

#### **4.3.3. Çevrenin Kimyasal Etkisi**

Sürekli değişen gerilme altında yorulma dayanımına çevrenin kimyasal etkisi daha şiddetli olur ve dolayısıyla yorulma ömrü kısalmır. Uygulamada korozyon yorulması önemli bir sorun yaratmaktadır. Ayrıca korozyon etkisi olan bir ortamda demir esaslı alaşımların S-N diyagramlarının sürekli azaldığı ve uygun bir değere ulaşmadığı görülmüştür [31].

Tekrarlı yük uygulanan yüzeylerde korozyon daha çok etkili olur. Kazıma korozyonu ya da kazıma yorulması denen bu olay yorulma dayanımını azalır. Örnek olarak; asma köprülerde çelik kablo ile bağlantı kelepçelerinin temas yüzeylerinde kazıma korozyonu oluşur, bu da köprü ömrünü azaltan en önemli olaydır. Normal şartlar altında, yorulma olaylarında çatlak oluşumu genel olarak yüzeyde başlar. Bu yüzeyin temas ettiği ortam, malzemelerin yorulma özelliklerini önemli ölçüde etkilemektedir. Örneğin: yüzeyi yağ ile kaplanarak hava ile teması kesilen kurşunun yorulma ömrü yaklaşık on kat artmaktadır. Vakumlu ortamda malzemelerin yorulma dayanımları artmaktadır. Vakumlu ortamdaki çatlak oluşum hızı havadaki ile aynı olmasına rağmen vakumlu ortamda daha uzun zamanda ilerledikleri tespit edilmiştir [19]. Şekil 4.2' de korozif ortamın çatlak ilerleme hızına etkisi görülmektedir.



Şekil 4.2. Korozyon ortamının S-N diyagramına ve çatlak ilerleme hızına etkisi [33].

#### 4.3.4. Frekans (Deney Hızı)

Normal koşullar altında frekansın yorulma mukavemetine etkisi önemli değildir. Bu yüzden yorulma testlerinde deney süresini azaltmak için yüksek frekanslı gerilme uygulayan yorulma test cihazları tercih edilir. Hidrolik yorulma test cihazları 50 Hz' i geçmediği halde elektromıknatıslarla kuvvet uygulayan yorulma test cihazlarında bu değer 400 Hz' e kadar çıkarılmıştır. Çok yüksek frekanslarda plastik şekil değiştirme için daha az zaman kaldığı için genellikle yorulma mukavemeti yaklaşık %10 kadar artar. Frekansın yorulma deneyi sonuçlarına etkisi kesin olarak belirlenememiştir. Ancak çok yüksek frekanslarda çelikler, alüminyum alaşımları ve bakır ile yapılan yorulma testleri sonucu frekans arttıkça yorulma ömrünün de arttığı belirlenmiştir. Deney cihazlarında çoğunlukla uygulanan 200–10,000 çevrim/dakika'lık frekansın deney sonuçlarına fazla etki etmediği, daha düşük frekanslarda ise yorulma dayanım sınırının azaldığı kabul görmüştür. Diğer yandan çok yüksek frekanslarda malzemenin önemli miktarda ısınması bazı test sonuçlarının yorumlanmasını güçleştirmektedir [28].

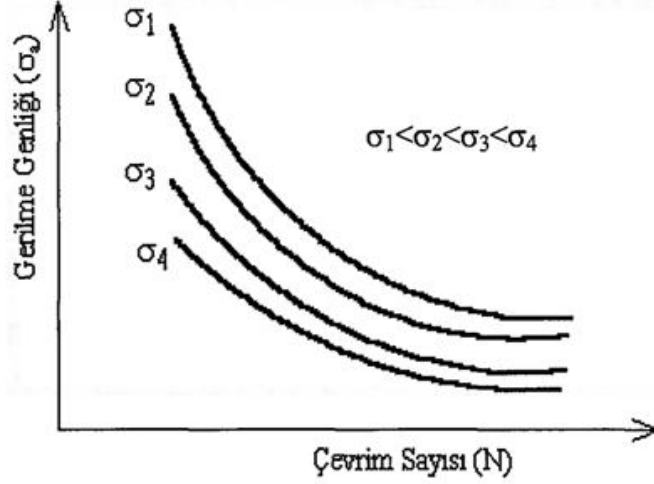
#### 4.3.5. Gerilme Sistemi

Laboratuvar ortamında yorulma testleri gerilme genliği sabit tutularak yapılır. Fakat uygulamada çeşitli farklılıklar söz konusu olabilir. Çekme basma gerilmeleri uygulayan yorulma cihazlarıyla yapılan yorulma testlerinde, çekme gerilmesinin yorulma direncini düşürdüğü, basma gerilmesinin ise arttırdığı tespit edilmiştir [28].

Gerilme koşulları sabit kaldığı zaman yukarıdaki ilk dört etkenin yaratacağı sonuçlar ayrı ayrı saptanabilir. Bunların yanında ayrıca gerilme koşulları da yorulma mukavemetine etkir. Özellikle çok eksenli gerime hallerinin getireceği şekil değiştirme kısıtlamaları malzeme ömrünü arttırıcı yönde etkiler.

Yorulma çatlağı pek çok zaman yüzeyde başlayıp içeriye doğru yayıldığından yüzey işleme kalitesinin önemi büyüktür. Yüzeydeki pürüzler çentik etkisi yaparak çatlak oluşumunu kolaylaştırır. Yüzey işleme kalitesi arttıkça yorulma mukavemeti büyür. Gerilme durumunun yorulma mukavemetine etkisini incelemek için önce ortalama gerilme ele alınacaktır. Yapı elemanlarına kendi ağırlığından dolayı bir ön statik yük etkir ve elemanın taşıyacağı tekrarlı yük buna eklenir [31].

Eksenel yorulma testlerinde gerilme genliği hasar oluşturan çevrim sayısının bir fonksiyonu olarak gösterildiğinde, S-N eğrileri uygulanan ortalama gerilme seviyeleri ile değişmektedir. Şekil 4.3' de farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği verilmektedir.



Şekil 4.3. Farklı ortalama gerilme seviyeleri için gerilme genliği-ömür grafiği [33].

#### 4.3.6. Çentik hassasiyeti

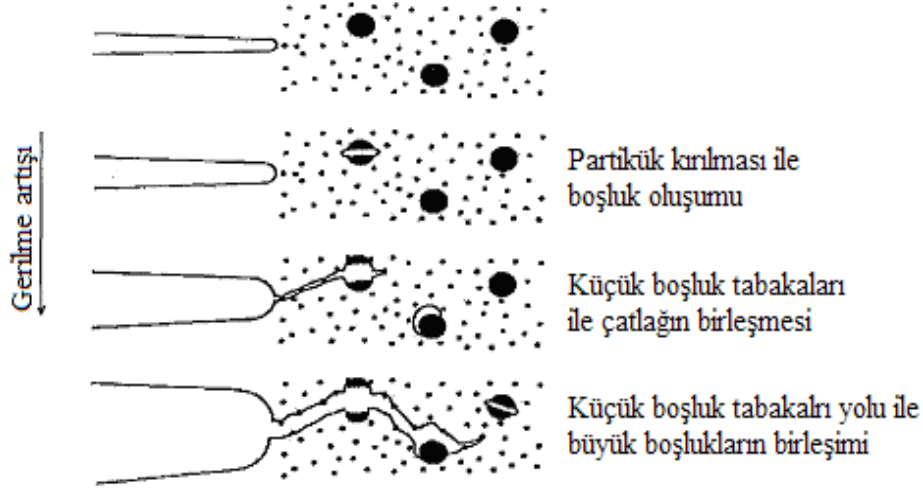
Gerilme altında malzemelerde yorulma çatlakları, gerilmenin en yüksek olduğu bölgelerde başlar. Yüzeyde yapılan herhangi bir tasarım veya üretim hatası gerilmeleri artırır ve yorulma çatlaklarının oluşmasına sebebiyet verir. Bu hassasiyet bir çentikli yorulma numunesi kullanılarak ölçülebilir. Yorulmadan dolayı oluşan kopma olayını en aza indirmek için, bazen yüzeyleri çok iyi parlatılmış numuneler hazırlanır [28].

#### 4.3.7. Mikroyapı Etkisi

Tane yapısı, ortalama tane boyutu ve mikro yapı hataları yorulma ömrünü önemli derecede etkilemektedir. Malzemenin döküm şekli, sıcak ve soğuk şekil verme fazların dağılımı farklı malzeme mikroyapıları oluşturmaktadır. Tane büyüklüğünün uzun ömürlü yorulma koşullarını etkilemesinin değerlendirilmesi zordur. Çünkü tane boyutunu değiştirmek için uygulanacak işlemler malzemenin yorulma özelliklerinde olumsuz bir değişime neden olabilir [33].

Genellikle hata olarak bilinen malzeme içerisindeki kalıntılar ve boşluklar gerilme yığılmalarına sebep olarak malzemenin mukavemetini, bundan dolayı da yorulma dayanımını ve yorulma ömrünü azaltmaktadır. Bu kalıntılar malzemenin yapısına

göre daha kırılğan ve yüklemenin etkisi ile matris gibi kolay şekil değiştiremediğinden kalıntı sınırlarında veya içerisinde mikro boşluklar oluşmaktadır. Bu boşlukların başlaması, ilerleme ve birleşmesi Şekil 4.4' te gösterildiği gibi çatlak uzamasını karakterize edebilmektedir. Büyük kalıntılar küçük kalıntılara göre daha büyük boşluk oluşturmaktadır [22]. Şekil 4.4' de mikro boşlukların oluşumu ve birleşimi görülmektedir.

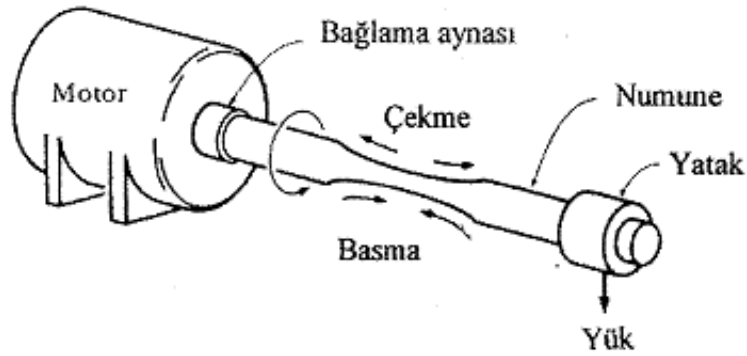


Şekil 4.4. Mikro boşlukların oluşması ve birleşmesi [33].

#### 4.4. YORULMA TESTLERİ

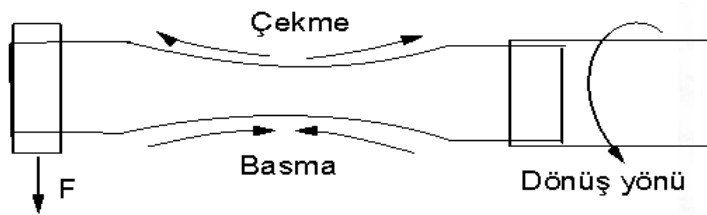
Bir malzemenin kullanılacağı sistemde deformasyona uğramadan çalışması arzu edilir. Bu nedenle bu malzemeyi akma gerilmesinin altında bir gerilmede kullanmak gerekir. Ancak bazı makine ve parçalarında olduğu gibi akma gerilmesinin altında bir gerilmede çalışsa dahi sürekli olarak bir tekrarlı gerilmeye maruz kalabilir. Genel olarak tekrarlı gerilmeler altında çalışan malzemelerde meydana gelen hasarlar, o malzemenin yorulması sonucu ortaya çıkan bir hasardır. Bu yorulma olayı belirtildiği gibi o malzemede herhangi bir plastik deformasyona uğramadan tamamen elastik deformasyon şartları ile meydana gelen bir olaydır. Bu elastik deformasyon sürekli olarak tekrarlandığı zaman o malzemede atomlar arası bağların zayıflamasına neden olmaktadır. Bu durum dahilinde o malzeme belli bir süre sonra plastik deformasyon olmaksızın hasara uğraması kaçınılmazdır. Bu nedenle kritik malzemelerde laboratuvar şartlarında hızlandırılmış yorulma ömürleri ve yorulma dayanımları

belirlenmeye çalışılır. Yorulma testleri için yaygın olarak kullanılan cihazların başında Wöhler tipi yorulma test cihazları gelir. Bu cihazların en çok kullanılanlarından biri de dönen eğmeli yorulma test cihazıdır. Bu cihazlarda kullanılan numunelerin biçim ve boyutları cihazın yükleme şekline göre değişir. Kullanılan numunenin bir ucu bağlama aynası ile motor miline sabitlenir diğer ucuna ise statik yük uygulanır [20]. Şekil 4.5’ te Wöhler tipi yorulma test cihazının şematik görünümü verilmektedir.



Şekil 4.5. Wöhler tipi yorulma test cihazının şematik olarak gösterimi [34].

Yorulma testi için de yine diğer mekanik testlerde olduğu gibi standartlara göre hazırlanan yorulma test numuneleri kullanılmaktadır. Şekil 4.6’ da yorulma test numunesinin şematik görüntüsü verilmektedir.



Şekil 4.6. Yorulma test numunesi geometrisi [35].

Şekil 4.6’ da verildiği gibi bir kesite sahip olan numunenin bir ucu motora bağlanır ve diğer uçtan bir F yükü uygulanır. Numunenin üst yüzeyi çekme gerilmesi alt yüzeyi ise basma gerilmesi altında kalır. Numune 90° döndürüldüğünde ise bu gerilmeler ye değiştirecektir. Ve numunenin ortasında sürekli çekme basma gerilmesi



olacaktır. Uygulanan F kuvvetine bağlı olarak numuneye etki eden gerilmedir. Uygulanacak gerilme miktarı aşağıdaki bağıntı ile belirlenir.

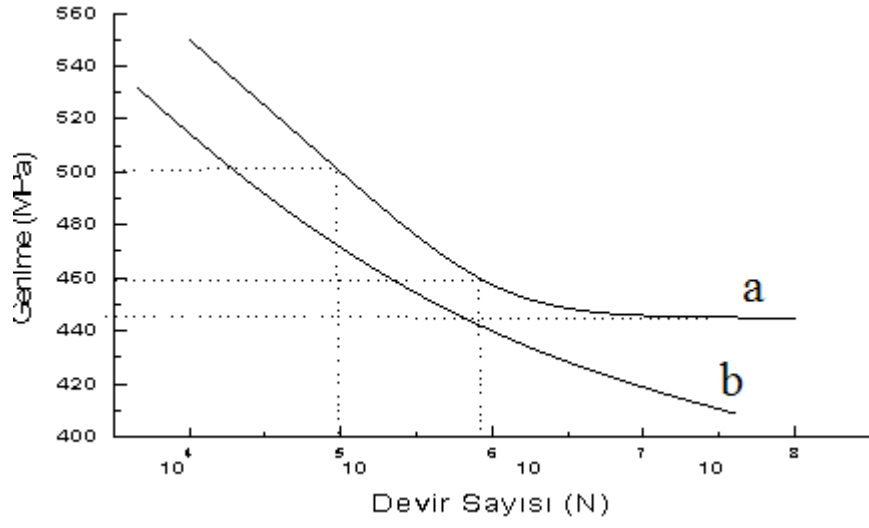
$$\sigma = 10,18 \frac{F.l}{d^3} \quad (4.1)$$

Burada;

- F; numuneye uygulanan kuvvet,
- l; numune boyu,
- d; numunenin çapı olarak belirlenmiştir.

Bir malzemenin yorulma ömrünü ve yorulma sınırını tespit etmek amacıyla birkaç seri numune hazırlanmalıdır. Numuneye uygulanan gerilmeye bağlı olarak numune kopuncaya kadar geçen dönme sayısı devir sayısı olarak grafiğe ilave edilir. Bu uygulamalar sonucunda Wöhler diyagramı oluşturulur.

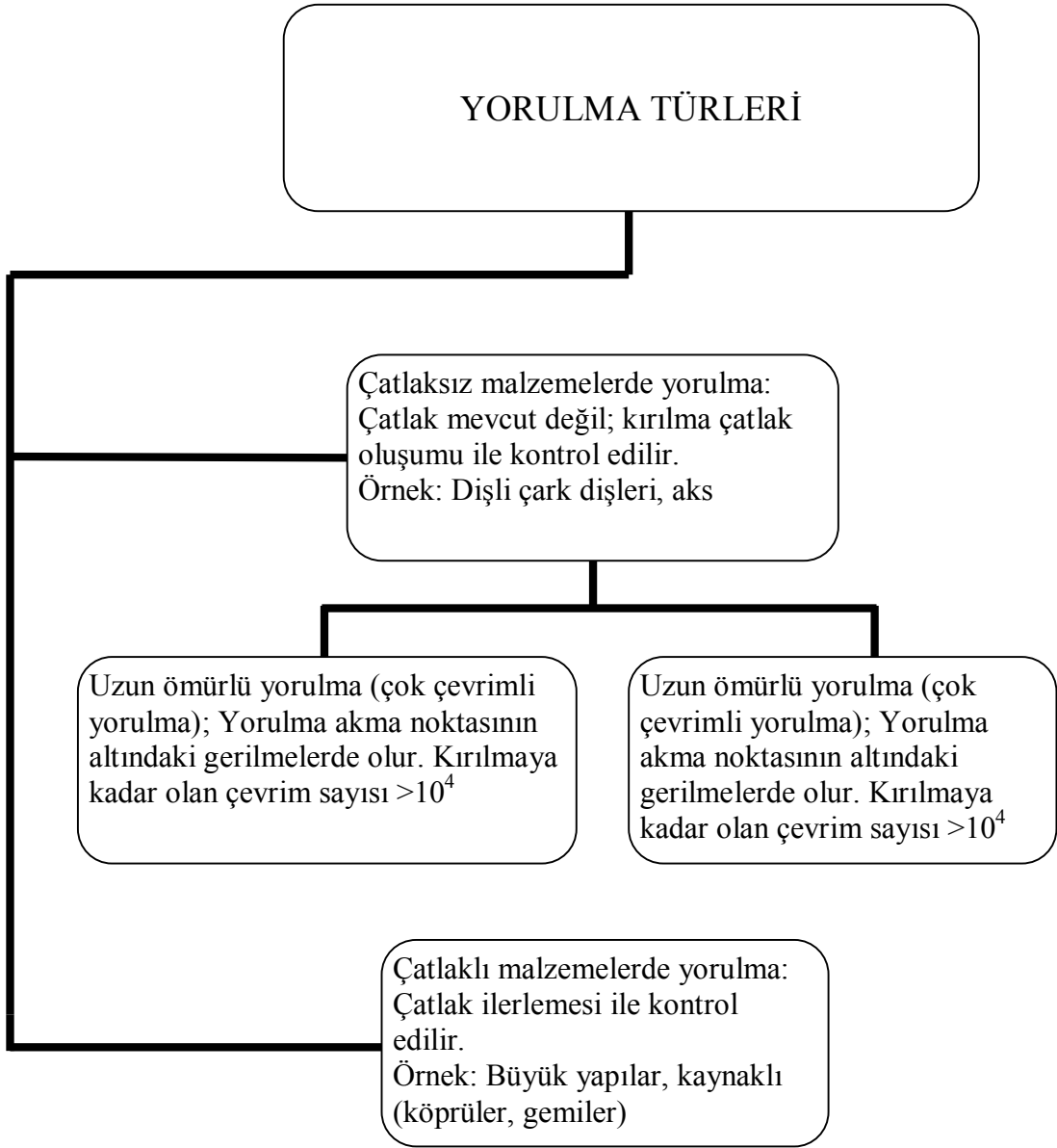
Wöhler diyagramında, dikey eksen gerilme değerinin, yatay ekseninde ise malzemenin kırılıncaya kadar maruz kaldığı yükleme sayısını ifade eder. Wöhler diyagramı, farklı sabit gerilmeler altında malzemenin kaç çevrim sonunda atlayacağını veya kırılacağını gösteren bağıntıyı gösterir. Wöhler diyagramının çizilmesi için genellikle 8 ila 12 adet benzer numune kullanılır. Ortalama gerilme tüm deneylerde sabit olmak üzere numunelerin her birine farklı periyodik gerilmeler uygulanarak numunenin çatlamasına (veya kırılmasına) kadar geçen çevrim sayısı tespit edilir. Şekil 4.7' de herhangi iki malzemeye ait Wöhler Diyagramı verilmektedir.



Şekil 4.7. Herhangi iki malzemeye ait Wöhler Diyagramı a) Demir ve alaşımları, b) Demir dışı metal ve alaşımları için [35].

#### 4.5. YORULMA TÜRLERİ

Yorulma olayı, çatlaklı malzemelerde yorulma ve çatlaksız malzemelerde yorulma olmak üzere iki şekilde gerçekleşmektedir. Çataksız malzeme de kendi içinde uzun ömürlü yorulma ve kısa ömürlü yorulma olmak üzere iki şekilde gerçekleşir. Şekil 4.8' de yorulma türleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.8 Yorulma türlerinin şematik olarak gösterilmesi [28].

#### 4.5.1. Çatlaksız Malzemelerde Yorulma

Çatlağın oluşmadığı malzemelerde kırılma olayı, çatlak oluşumu ile belirlenir. Çatlaksız malzemelerde iki türlü yorulma olayı gerçekleşir; uzun ömürlü yorulma ve kısa ömürlü yorulma.

Uzun ömürlü yorulma; yorulma olayı malzemenin akma dayanımının altında bir gerilme değerinde oluşur. Kırılma  $10^4$ ' ten büyük çevrim sayılarında oluşmaya başlar.

Kısa ömürlü yorulma; yorulma olayı malzemenin akma mukavemetinden büyük gerilmelerde oluşur. Yorulma sırasında malzemede plastik deformasyon meydana gelir ve kırılmaya kadar olan çevrim sayısı  $10^4$ ' ten küçüktür [28].

#### **4.5.2. Çatlaklı Malzemelerde Yorulma**

Yorulma olayı, çatlak içeren malzemelerde çatlağın ilerlemesiyle kontrol edilir. Büyük yapılar, kaynaklı yapılar (köprüler, gemiler) çatlak içerdiği için bu yapılarda yorulma olayı önemli bir hal almaktadır. Bu tip yapılarda çatlakların ilk uzunluğu, yapının incelenmesi sonucu tespit edilen çatlak uzunluğundan kısa olmalıdır. Çatlak içeren malzemelerin yorulma deneyleri için belirli boylara sahip çatlak içeren yorulma numunesi hazırlanarak tekrarlı çekme-basma gerilmelerine maruz bırakılır [28].

#### **4.6. YORULMA TESTLERİNDE KULLANILAN CİHAZLAR**

Yorulma deneyinde kullanılan cihazlar çok çeşitli olmalarına rağmen, bu cihazları numuneye uyguladıkları gerilme türü açısından 4 ana grupta toplamak mümkündür [34];

- 1- Eksenel çekme - basma gerilmeleri uygulayan yorulma cihazları
- 2- Eğme gerilmeleri uygulayan yorulma cihazları
  - Düzlemsel eğme gerilmesi uygulayan yorulma cihazları
  - Dönen eğme gerilmesi uygulayan yorulma cihazları
- 3- Burma gerilmesi uygulayan yorulma cihazları
- 4-Bileşik gerilme uygulayan yorulma cihazları [36]

#### **4.6.1. Eksenel Gerilmeli Yorulma Test Cihazları**

Eksenel çekme-basma gerilmeleri uygulayan yorulma test cihazları

Yukarıda belirtilen her grup yorulma cihazı için değişik firma ve araştırma merkezlerince farklı cihazlar geliştirilmiştir. Bu cihaz grupları içinde en çok kullanılanı, çalışma prensibi en basit olan eğme gerilmesi uygulayan yorulma cihazlarıdır. Bunlar içinde düzlemsel eğme gerilmesi uygulayanlar genellikle yassı ürünler için kullanılmaktadır [23, 36].

## BÖLÜM 5

### MALZEME VE METOT

Bu çalışmada AA7075 alüminyum alaşımına dört farklı ısıl işlem uygulanarak alaşımın yorulma davranışları incelenmiştir. Deneysel çalışma 2 aşamada gerçekleştirilmiştir. İlk aşamada ASTM E-606 standartlarına göre hazırlanan yorulma numuneleri farklı yaşlandırma sıcaklıkları (100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C) ve süreleri (15, 20, 24, 30, 35 saat) kullanılarak yeniden çözeltiye alma ve yeniden yaşlandırma ısıl işlemi uygulanarak yorulma testleri yapılmıştır. İkinci aşamada ise O (tavlanmış), T6 (yaşlandırılmış), HTPP (ön çökelek oluşturularak yaşlandırılmış) ve RRA (yeniden çözeltiye alınarak yeniden yaşlandırılmış) şartlarda 120 °C sıcaklıkta 24 saat yaşlandırılarak test edilmiştir. Yorulma testleri, 46 frekans değeri ve (2780 dev./dak.), R=-1 gerilme oranına sahip olan Wöhler tipi yorulma test cihazları model alınarak üretilen yorulma test cihazlarında yapılmıştır. Yorulma testlerinde her parametre için 5 adet yorulma numunesi test edilmiştir.

#### 5.1. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN MALZEME

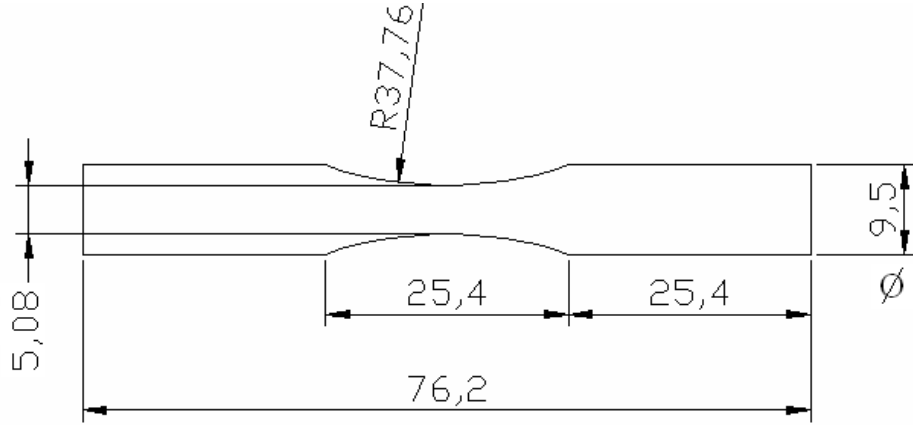
Deneysel çalışmalarda Alkor Döküm Alaşımları ve Mak. San. Tic. Ltd. Şti.' dan temin edilen kimyasal bileşimi Çizelge 5.1' de verilen 10 mm çapında ekstrüzyon AA7075 alüminyum alaşımı malzeme kullanılmıştır.

Çizelge 5.1. AA7075 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.

AA7075 Alüminyum Alaşımı								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
0,17	0,28	1,30	0,15	2,19	5,16	0,19	0,009	Kalan

## 5.2. TEST NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Deneysel çalışmalarda kullanılacak alaşım malzeme temin edildikten sonra çubuklardan hassas torna yardımıyla yarım daire şeklindeki kesici takım kullanılmak suretiyle ASTM E-606 standartlarına uygun bir şekilde Şekil 5.1’ de verilen ölçüler kullanılarak yorulma test numuneleri hazırlanmıştır.



Şekil 5.1: Yorulma numunesi ölçüleri.

## 5.3. AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANAN ISIL İŞLEMLER

Isıl işlem uygulamalarının birinci kısmında deneysel malzemeye farklı sürelerde (15, 20, 24, 30, 35 saat-120 °C) ve farklı sıcaklıklarda (100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C-24 saat) RRA (Retrosgression Re-Aging) ısıl işlemi uygulanmıştır. Başlangıç olarak 500 °C’ de 2 saat tavlanan deneysel numuneler 485 °C’ ta 2 saat çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuş ve 120 °C’ ta 24 saat yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Daha sonra bu işlemi takiben 220 °C’ ta yeniden çözeltiye alınarak tuzlu suda oda sıcaklığında hızla soğutulmuştur. Daha sonra 100 °C’ ta, 110 °C’ de, 120 °C’ de, 130 °C’ de, 140 °C’ ta 24 saat ve 120 °C’ ta 15, 20, 24, 30, 35 saat yeniden yaşlandırma yapılmış ve yorulma dayanımı incelenmiştir. Isıl işlem çalışmaları sırasında kullanılan Protherm marka ısıl işlem fırını Şekil 5.2’ de verilmiştir. Isıl işlem uygulamalarının ikinci aşamasında, 500 °C’ ta 2 saat tavllanmış (O) olan deneysel numuneler T6 ısıl işleminde 485 °C’ ta 2 saat çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuş ve 120 °C’ ta 24 saat yaşlandırılmıştır. RRA (Retrosgression Re-Aging) işleminde T6 işlemini takiben 220 °C’ ta yeniden çözeltiye alınarak tuzlu suda oda sıcaklığında

hızla soğutulmuştur. Daha sonra 120 °C' ta 24 saat yeniden yaşlandırma yapılmıştır. HTPP (High Temperature Pre-Precipitation) ısıl işleminde ise sonra 450 °C' de 30 dakika ön çökelek oluşturulmuş ve 120 °C' de 24 saat yaşlandırma işlemi yapılmıştır.



Şekil 5.2. Isıl işlem uygulamalarında kullanılan Protherm marka ısıl işlem fırını.

DeneySEL çalışmanın ikinci aşamasında yapılan RRA ısıl işlem parametreleri Çizelge 5.2' de verilmiştir.



Çizelge 5.2. Deneysel çalışmanın birinci aşamasında yapılan RRA ısıtma işlem parametreleri.

Isıl işlem	Çözeltiyeye alma	Soğutma ortamı	Yaşlandırma	Yeniden çözeltiyeye alma	Su verme	Yeniden yaşlandırma
T6+RRA	485 °C 2 saat	25 °C Suda soğutma	24 saat 120 °C	220 °C 1 saat	25 °C Tuzlu su	100 °C 24saat
T6+RRA						110 °C 24 saat
T6+RRA						120 °C 24 saat
T6+RRA						130 °C 24saat
T6+RRA						140 °C 24 saat
T6+RRA						120 °C 15 saat
T6+RRA						120 °C 20 saat
T6+RRA						120 °C 25 saat
T6+RRA						120 °C 30 saat
T6+RRA						120 °C 35 saat

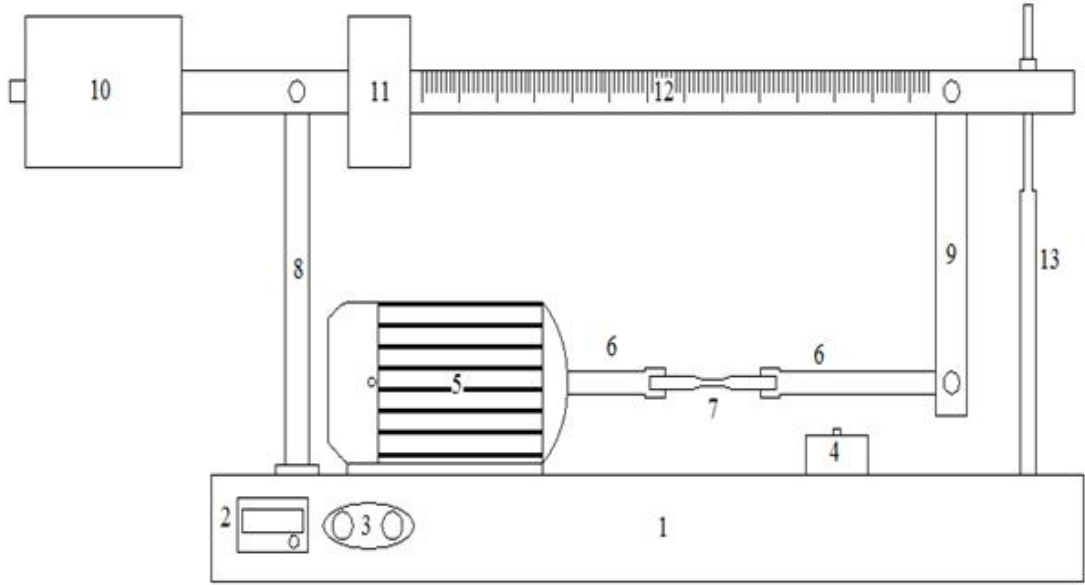
Deneysel çalışmanın ikinci aşamasında yapılan ısıtma işlem çalışmaları ve parametreleri Çizelge 5.3' de verilmiştir.

Çizelge 5.3. Deneysel çalışmanın ikinci kısmında kullanılan ısıtma işlem parametreleri.

Isıl işlem	Çözeltiyeye alma	Soğutma ortamı	Ön çökelek oluşturma	Yaşlandırma	Yeniden çözeltiyeye alma	Su verme	Yeniden yaşlandırma
T6	485 °C 2 saat	25 °C Suda soğutma		120 °C 24 saat			
T6+RRA	485 °C 2 saat			120 °C 24 saat	220 °C 1 saat	25 °C Tuzlu su	120 °C 24 saat
HTPP	485 °C 2 saat	Fırında soğutma	450 °C 30 dakika	120 °C 24 saat			
O	Verildiği gibi						

#### 5.4. DENEYSEL ÇALIŞMALARDA KULLANILAN YORULMA TEST CİHAZI

Dönen eğmeli yorulma test cihazı dönerek eğme şartlarında çalışan yapı elemanlarının ve metalik malzemelerin yorulma davranışlarının belirlenmesi amacıyla üretilen yorulma test cihazlarıdır. Yorulma testlerinde, Wöhler tipi yorulma cihazı kullanılmıştır. Şekil 5.3' te şematik görüntüsü verilen bu Wöhler tipi yorulma test cihazı; alt tabla, aksenal eğme ünitesi, tutucu miline zorlama yükünü ileten elemanlar, numune tutucu, elektrik motoru, start–stop butonu ve elektrikli sayaç devresi olmak üzere toplam 13 kısımdan oluşmaktadır.

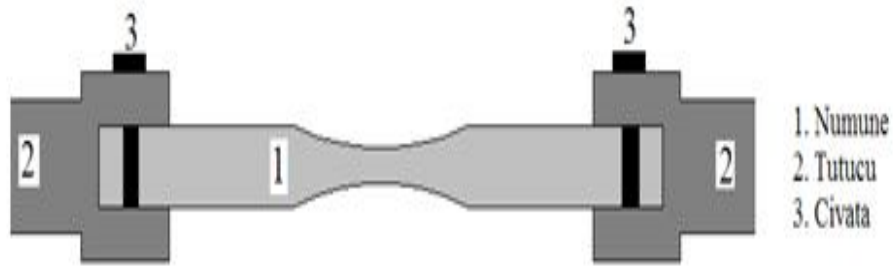


- |                         |                       |
|-------------------------|-----------------------|
| 1- Alt tabla            | 8- Mesnet elemanı     |
| 2- Numaratör (sayaç)    | 9- Dikey yük iletici  |
| 3- Start-stop butonları | 10- Denge ağırlığı    |
| 4- Şwiç anahtar         | 11- Hareketli ağırlık |
| 5- Motor                | 12- Sürgü kolu        |
| 6- Numune tutucular     | 13- Dengeleme çubuğu  |
| 7- Numune               |                       |

Şekil 5.3. Wöhler tipi yorulma test cihazının şematik görüntüsü.

Yorulma test cihazındaki sistemde dönme hareketini sağlamak amacı ile üç fazlı 1,5 KW ve 2820 dev./dak. değerlerine sahip bir elektrik motoru kullanılmaktadır. Deneysel numunenin bağlandığı tutuculardan birisi motor miline diğeri ise yorulma test cihazındaki sistemdeki eğme yükünü ileten dikey elemana rulmanla yataklanmıştır. Rulman yardımıyla dönme hareketi sağlayan tutucu mili aşağı-yukarı serbest hareket edebilecek şekilde dikey elemana yerleştirilmiştir. Ayrıca dikey eleman aksel eğme ünitesine, serbest hareket edebilecek şekilde bağlanmıştır. Aksel eğme ünitesi dengeleme ağırlığı, hareketli ağırlık ve ağırlığın hareket edebileceği sürgü kolundan oluşmaktadır. Eğme ünitesi mesnet noktasına serbest hareketi engellenmeyecek şekilde sabitlenmiştir. Sürgü kolu istenen değerde yük uygulamak amacıyla ölçülendirilmiştir. Bu sistemde, uygulanacak eğme gerilmesi moment yardımıyla hesaplanmaktadır. Alt tabla

titreşim söndürme özelliğinden dolayı lamel grafitli dökme demir malzemeden üretilmiştir. Elektronik donanım alt tablaya yerleştirilmiştir. Alt tablanın üzerinde sistemin çalışmasını sağlayan başla–durdur (start–stop) butonları, deneysel çalışmalardan sonraki çevrim sayısını belirleyebilmeyi sağlayan numarator ve hareketli tutucunun hemen altında, sistemin kontrolu bir şekilde ilerlemesini sağlayan ve denesal çalışmaların daha sağlıklı olmasını sağlayan, numunenin kırılmasıyla birlikte sistemin durmasına yol açan swiç anahtar bulunmaktadır. Buna ilave olarak eğme ünitesinin sağa–sola salınımını engellemek amacıyla dengeleme çubuğu bulunur. Şekil 5.4’ de deneysel numunenin tutuculara bağlanma şeklinin şematik görüntü verilmiştir.



Şekil 5.4. Deneysel numunenin tutuculara bağlanma şeklinin şematik görüntüsü.

Yorulma testi için belirlenen gerilme miktarı hesaplanarak gereken yük eğme ünitesindeki hareketli ağırlık yardımı ile deneysel numuneye uygulanır. Deneysel numune, yorulma dayanımına etki eden faktörlerden bir tanesine veya birkaç tanesine maruz kalır belli bir süre sonra kırılır. Deneysel numune kırıldığı anda tutucu swiç anahtarın üzerine düşer ve sistemi durdurur. Alt tabla üzerindeki numarator yardımı ile kırılma sonucundaki çevrim sayısı hesaplanmaktadır. Bu çalışma değişik gerilmeler altında türdeş numunelere uygulanarak yorulma testleri tamamlanır. Uygulanan gerilmenin hesaplanması aşağıdaki bağıntı ile yapılır:

$$\sigma(\text{N/mm}^2)=32*P*L/(\pi.d^3) \quad (5.1)$$

Burada;

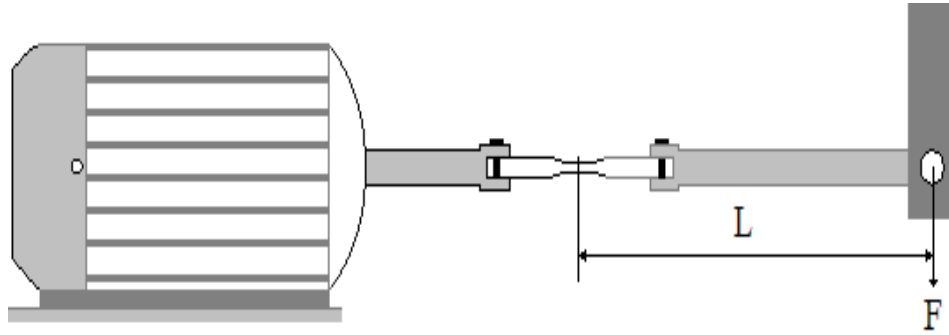
$\sigma$  : Gerilme (N/mm<sup>2</sup>)

P: Uygulanan kuvvet(Newton)

L: Uzaklık (mm)

d: Numune çapı (ince çap) (mm)

Şekil 5.5' te görüldüğü üzere yükün uygulama noktası ile numunenin en ince kesiti arasındaki mesafe ölçülerek gerilme hesabı yapılmaktadır.



Şekil 5.5. Yorulma cihazında numuneye uygulanan gerilmenin hesaplanması.

## 5.5. YORULMA TESTLERİNİN YAPILMASI

Deneysel malzemeye ısıl işlem şartları uygulandıktan sonra Wöhler tipi yorulma cihazında yorulma testine tabii tutulmuştur. Yorulma testlerinde 200, 250, 300, 350, 400 MPa olmak üzere 5 adet yük uygulanmış ve sonuç olarak çevrim sayıları belirlenip S-N diyagramı elde edilmiştir. Yorulma deneyleri sırasında her parametre için 5 adet deneysel numune kullanılmıştır.

## 5.6. SERTLİK ÖLÇÜMLERİ

Sertlik ölçümleri K.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi, Döküm laboratuvarında bulunan ve Şekil 5.6' da görünümü verilen AFFRI SYSTEM marka VRSD-251 model universal makro sertlik cihazında brinell olarak (HB) ölçülmüştür. Her numuneden 5 adet sertlik değeri alınmıştır. Bu sertlik değerlerinin ortalama değeri sertlik değeri olarak

belirtilmiştir. Sertlik ölçümlerinde 2.5 bilye çapı ve 31.25 yük (2.5/31.25) oranı kullanılmıştır.



Şekil 5.6. AFFRI SYSTEM marka ve VRSD-251 model universal makro sertlik ölçüm cihazı.

## 5.7. OPTİK MİKROSKOP İNCELEMELERİ

Isıl işlem yapılmış numuneler, belirli boyutlara getirilerek mikroyapı incelemesi için hazır hale getirilmiştir. Numuneler sırası ile 180–240–320–400–600–1200 kalınlıklarındaki grid zımparalarla zımparalanıp yüzeyindeki pürüzler ortadan kaldırılmıştır. Zıpara işleminden sonra K.Ü. Teknik Eğitim Fakültesi Döküm laboratuvarında bulunan PRESİ marka MECAPOL P 262 model polisaj cihazı kullanılarak zımparalama ve polisaj işlemleri yapılmıştır. Daha sonra 20 ml (HNO<sub>3</sub>), 3 ml (HCl), 2 ml (HF) ve 175 ml (H<sub>2</sub>O) ayırıcı ile 10–15 sn süreyle dağlanmış ve mikroyapı incelemeleri için hazır hale getirilmiştir. Mikroyapı incelemelerinde, K.Ü.

Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Döküm Öğretmenliği Programı laboratuvarında bulunan MEIJI ML 7100 marka optik mikroskop kullanılmıştır.

### **5.8. SEM VE EDS İNCELEMELERİ**

AA7075 alüminyum alaşımının ısıtılma işlemi sonrası içyapıda meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla yüzeyler tarama elektron mikroskopunda (SEM) incelenmiştir. SEM incelemeleri, Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi bünyesinde bulunan “JEOL JSM-6060” tarama elektron mikroskopunda (SEM) yapılmıştır. Aynı cihaza bağlı olan EDS (Enerji dağılım spektrometresi) analiz cihazı ile AA7075 alaşımı deneysel malzemenin yapısında bulunan elementleri ve oranlarını belirlenmiştir.

### **5.9. X-RAY DİFFRACTION (XRD) İNCELEMELERİ**

Isıl işlem çalışmalarında malzemenin yapısında oluşan çökeltileri belirlemek amacıyla XRD incelemeleri yapılmıştır. XRD çalışmalarında “BRUKER” marka X-ışını difraktometresi kullanılmıştır.

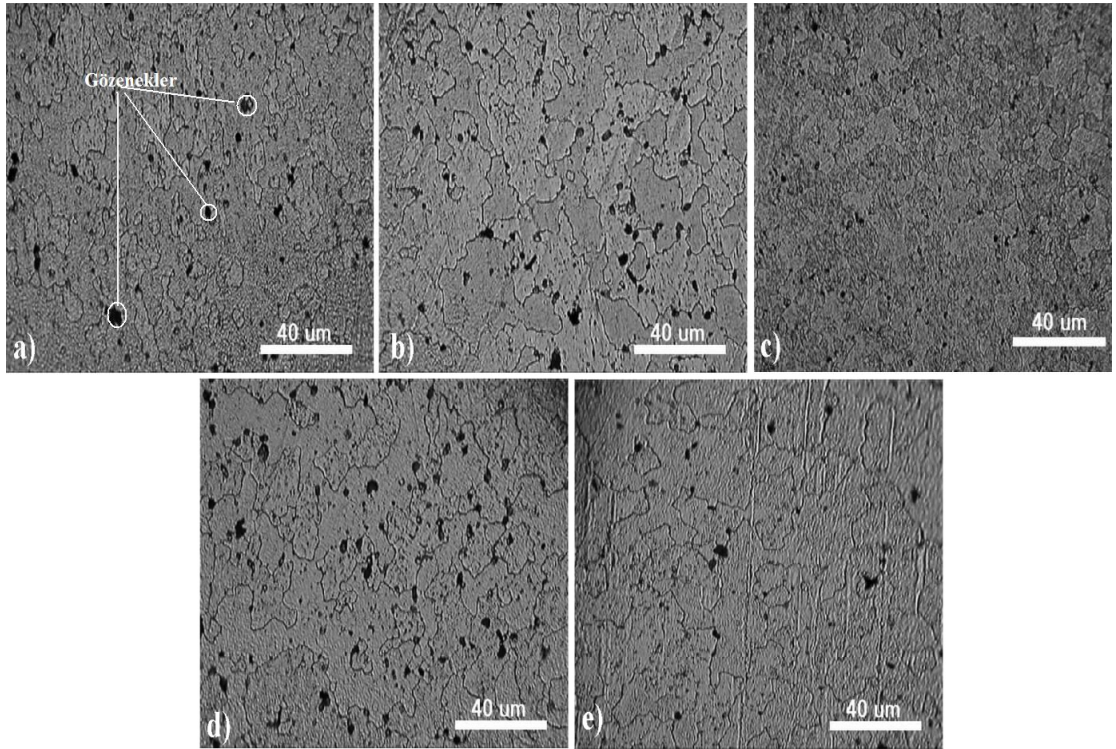
## BÖLÜM 6

### DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada AA7075 alüminyum alaşımında farklı ısıl işlem şartlarının yorulma dayanımı üzerindeki etkisi iki aşamalı olarak araştırılmıştır. Isıl işlem uygulanan numunelerin yorulma testleri sonunda elde edilen S-N diyagramları wöhler tipi yorulma cihazları kullanılarak elde edilmiştir.

#### 6.1. MİKROYAPI İNCELEMELERİ

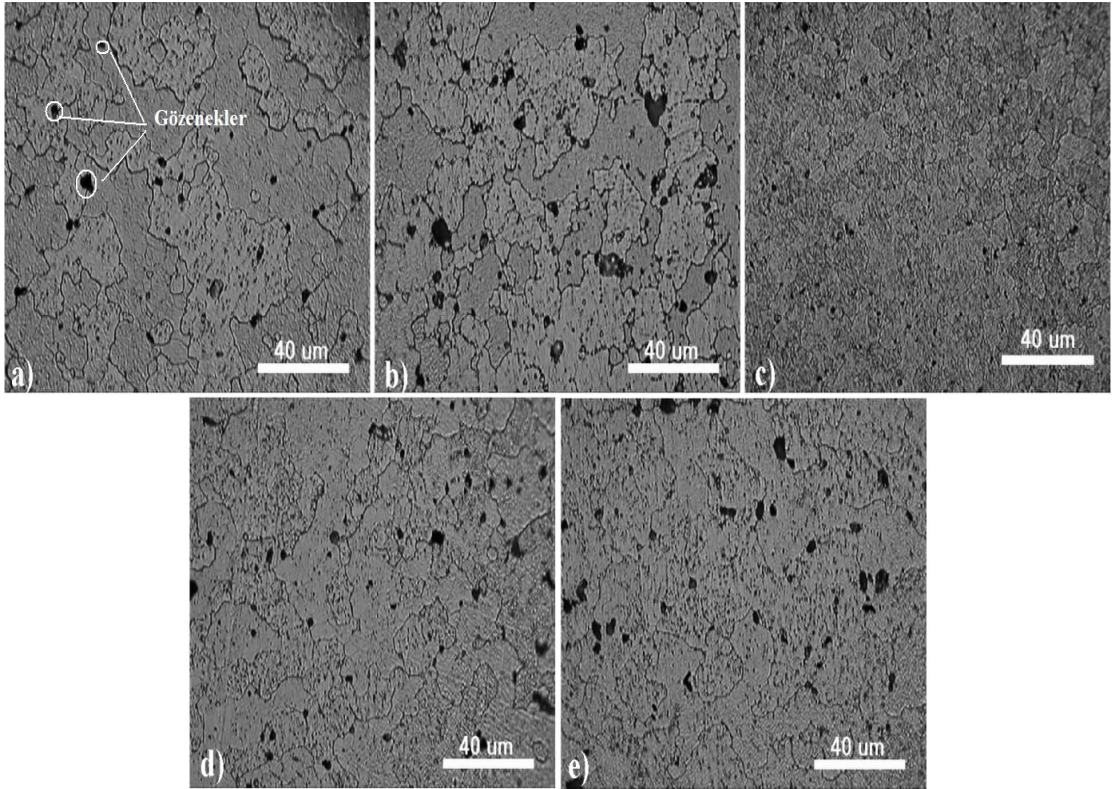
Farklı sıcaklıklarda (100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C) 24 saat RRA ısıl işlemi uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri Şekil 6.1' de verilmiştir.



Şekil 6.1. Farklı sıcaklıklarda ve 24 saat RRA ısıl işlem uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri a) 100 °C, b) 110 °C, c) 120 °C, d) 130 °C, e) 140 °C).

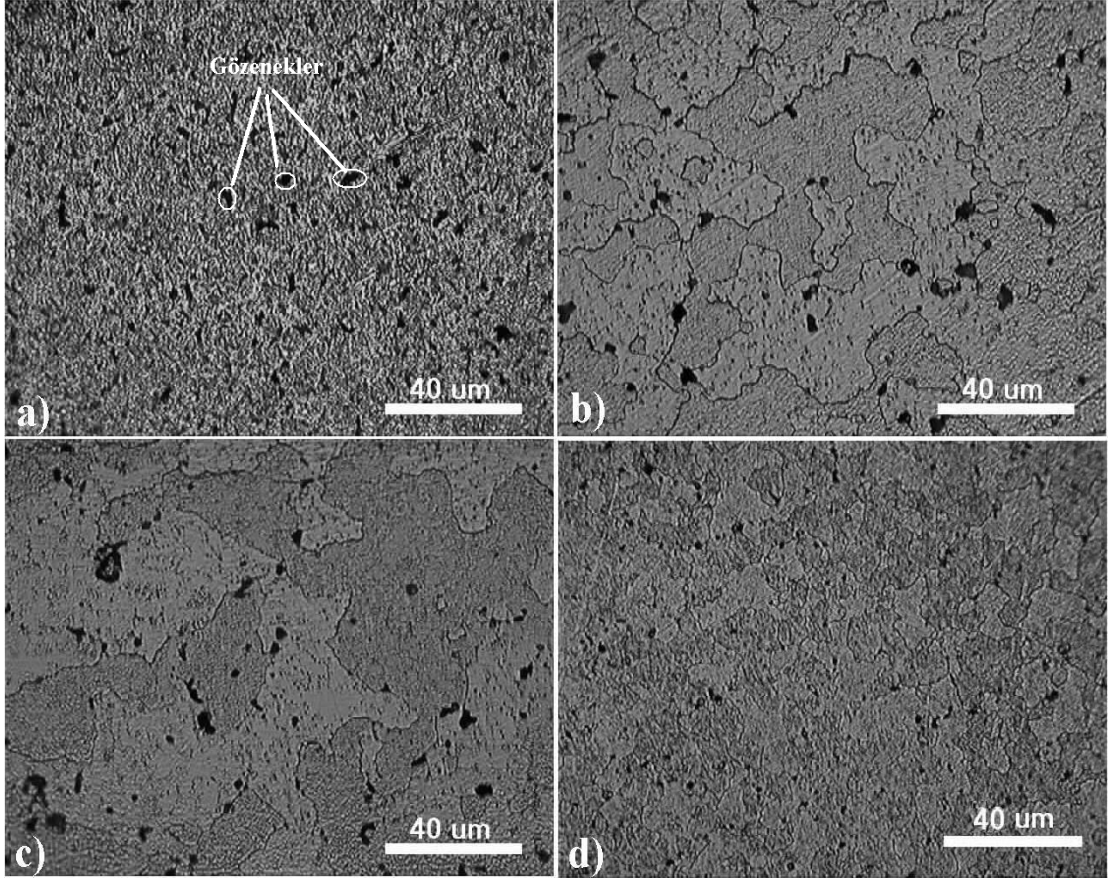


Şekil 6.1' den de anlaşılacağı gibi farklı sıcaklıklarda RRA ısıl işlemi yapılmasına rağmen yapıda çökelekler görülmektedir. RRA ısıl işlemi ile yapıda oluşturulan çökelekler belirlenmesi optik mikroskop görüntüleri ile mümkün olmamaktadır. Ancak yine yapıda gözeneklerin olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 6.2' te 120 °C' de farklı sürelerde (15, 20, 24, 30, 35 saat) RRA ısıl işlem uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.2. 120 °C' da farklı sürelerde RRA ısıl işlemi uygulanan numunelerin optik mikroskop görüntüleri; a) 15 saat, b)20 saat, c) 24 saat, d) 30 saat, e)35 saat.

Burada da Şekil 6.2' deki gibi gözenekler görülmektedir. Fakat yapıda oluşturulan ikinci faz çökelekler görülmektedir. Şekil 6.3' de tavllanmış (O), ön çökelek oluşturulmuş (HTPP), yaşlandırılmış (T6) ve yeniden çözültüye alınarak ikinci yaşlandırma yapılmış (RRA) alaşımın optik mikroskop görüntüleri verilmiştir.

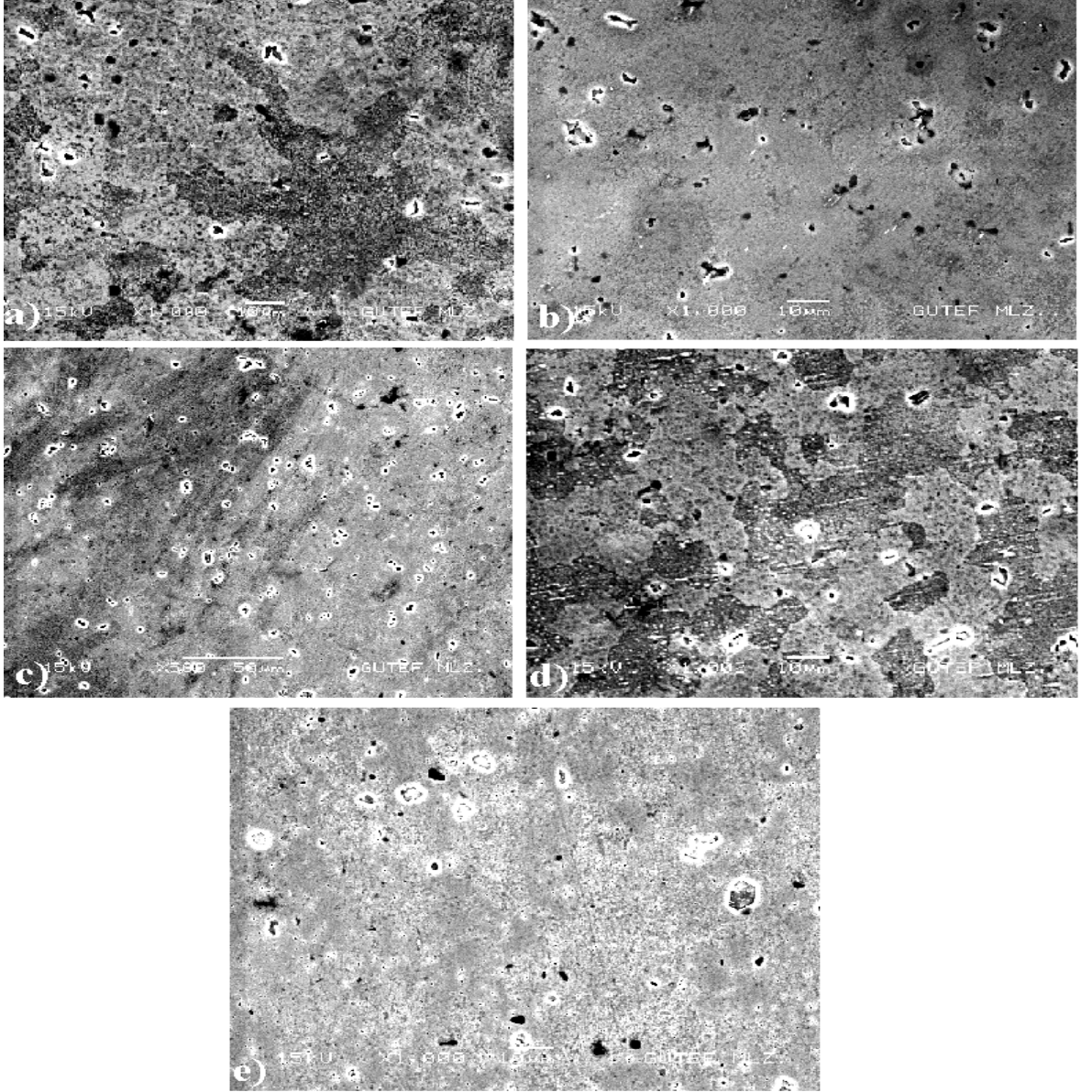


Şekil 6.3. Farklı ısıl işlemler uygulanan AA7075 alaşımının optik mikroskop görüntüleri a) O, b) HTPP, c) T6, d) RRA).

Optik miroskop incelemelerinde tavllanmış numunede (Şekil 6.1.a) tane yapısının belirgin olmadığı ve yapıda mikro boşlukların (gözeneklerin) olduğu görülmektedir. Ön çökelek oluşturulmuş olan numunelerde (Şekil 6.1.b) ise tane yapısında irileşmeler olduğu ayrıca gözeneklerin daha az fakat daha irileştiği anlaşılmaktadır. Bu durum numunelerin tavlama sonrasında tekrar 450 °C' ye çıkılarak bu sıcaklıkta 30 dakika beklenmesinin gözeneklerin birleşerek büyüdüğü söylenebilir. Aynı durum T6 ısıl işlemi yapılan numunede de görülmektedir (Şekil6.1.c). Yeniden çözeltiye alınarak ikinci yaşlandırma uygulanan numunelerden alınan optik mikroskop görüntülerinde ise daha küçük taneli bir mikroyapı oluştuğu görülmektedir (Şekil 6.1.d). Bu durum T6 işlemi sırasında 220 °C' de 1 saat çözeltiye alma işlemi sırasında mikroyapının bozunduğunu ve tekrar yaşlandırma ısıl işlemi sırasında daha küçük taneli bir yapı oluşmasına atfedilmektedir.

## 6.2. SEM VE EDS İNCELEMELERİ

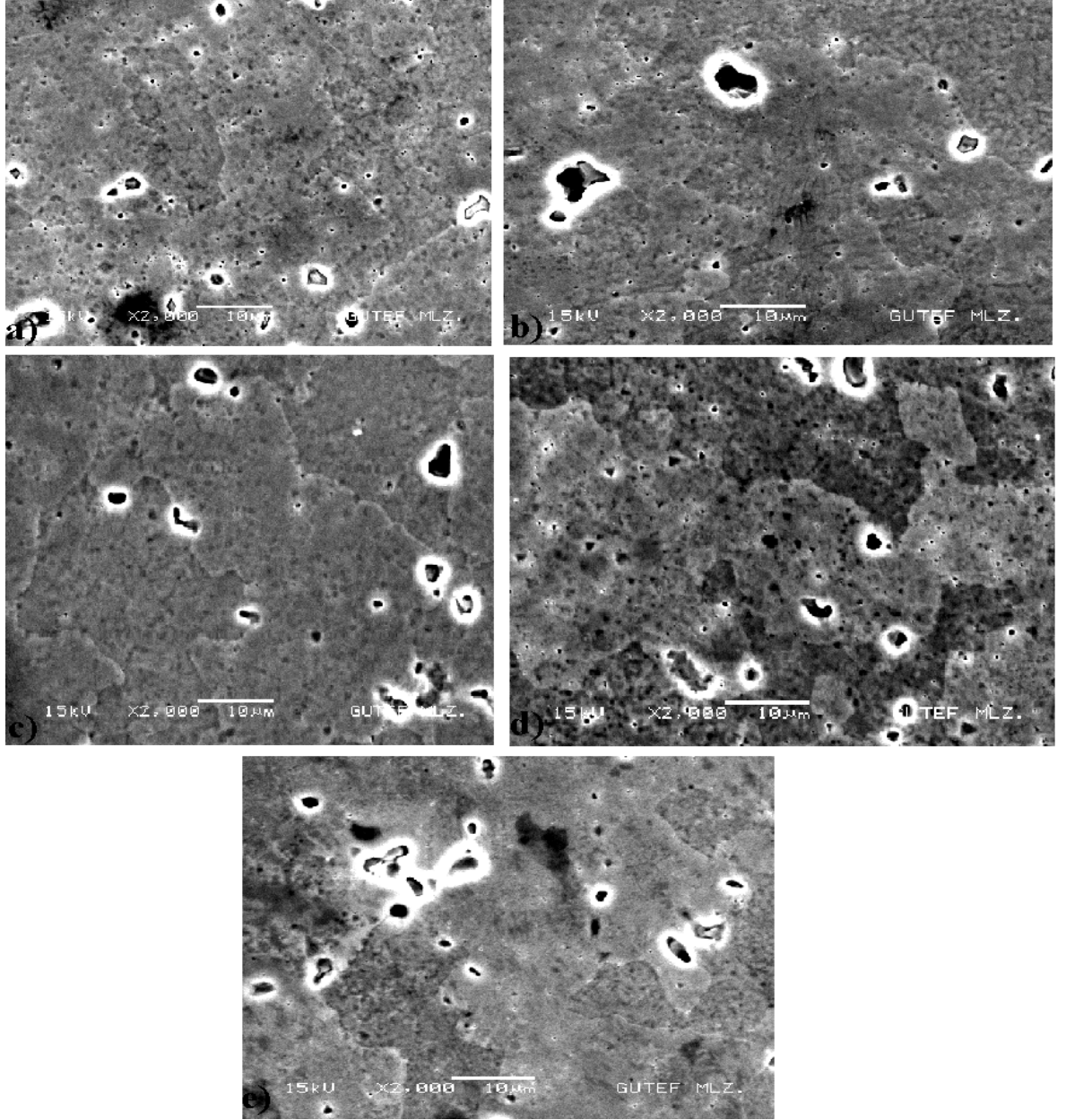
Şekil 6.4' te farklı sıcaklıklarda (100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C) ve 24 saat RRA ısıtma işlemi uygulanan numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.4. Farklı sıcaklıklarda RRA ısıtma işlemi uygulanan numunelerin SEM görüntüleri a) 100 °C, b) 110 °C, c) 120 °C, d) 130 °C, e) 140 °C).

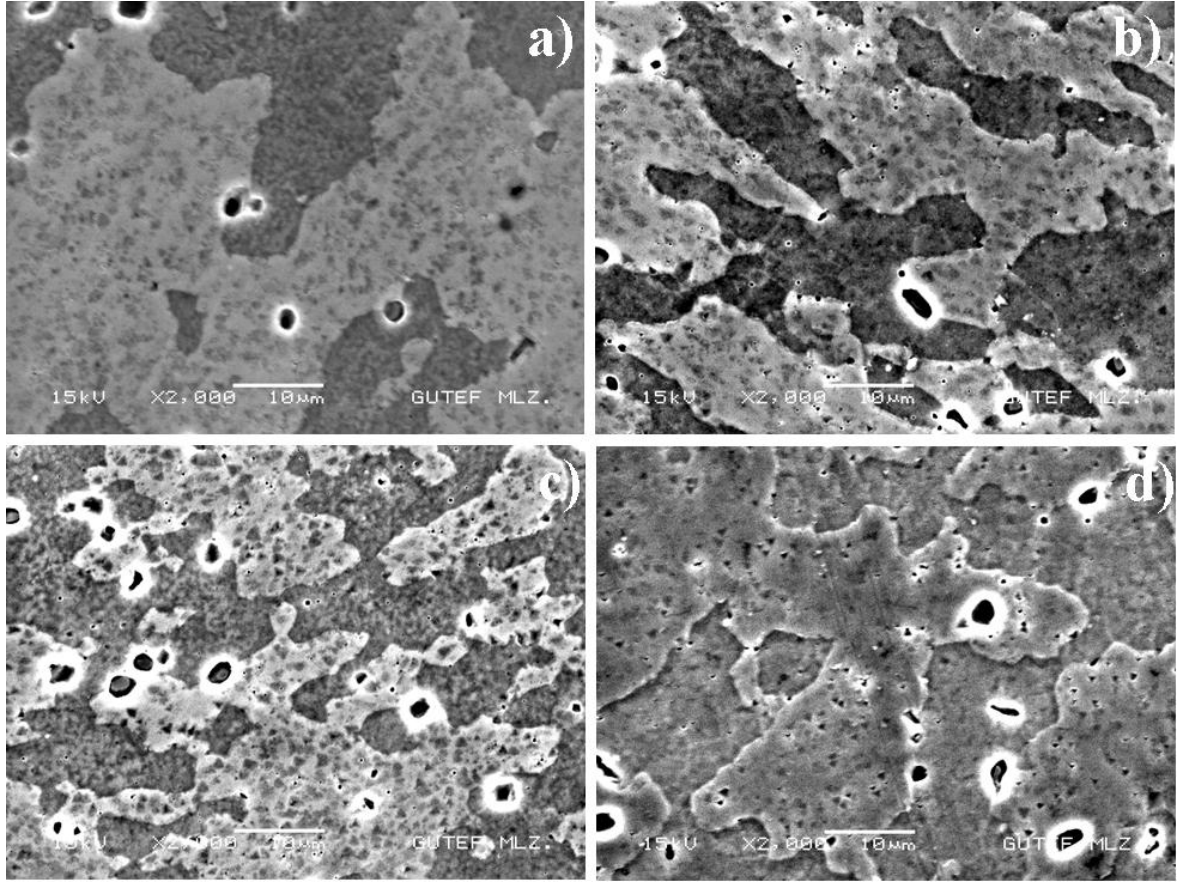
Şekil 6.4' ten de anlaşılacağı gibi beş farklı sıcaklıkta (100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C, 140 °C) RRA ısıtma işlemi uygulanan numunelerin mikroyapılarında çökelekler oluşmasına rağmen çok küçük boyutlu oldukları için zorlukla görülmektedir. Şekil

6.5' te 120 °C' de beş farklı sürede (15, 20, 24, 30, 35 saat) RRA ısıt işlemleri uygulanan numunelerin SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 6.5. Farklı sürelerde ve 120 °C' de uygulanan ısıt işlemlerinin SEM görüntüleri; a) 15 saat, b) 20 saat, c) 24 saat, d) 30 saat, e) 35 saat.

Şekil 6.6' da farklı ısıt işlemleri uygulanan AA7075 alaşımının tavllanmış (O), yaşlandırılmış (T6), yeniden çözeltiye alınmış ve ikincil yaşlandırılmış (RRA), önçökelek oluşturulmuş (HTPP) numunelerden SEM görüntüleri verilmektedir.

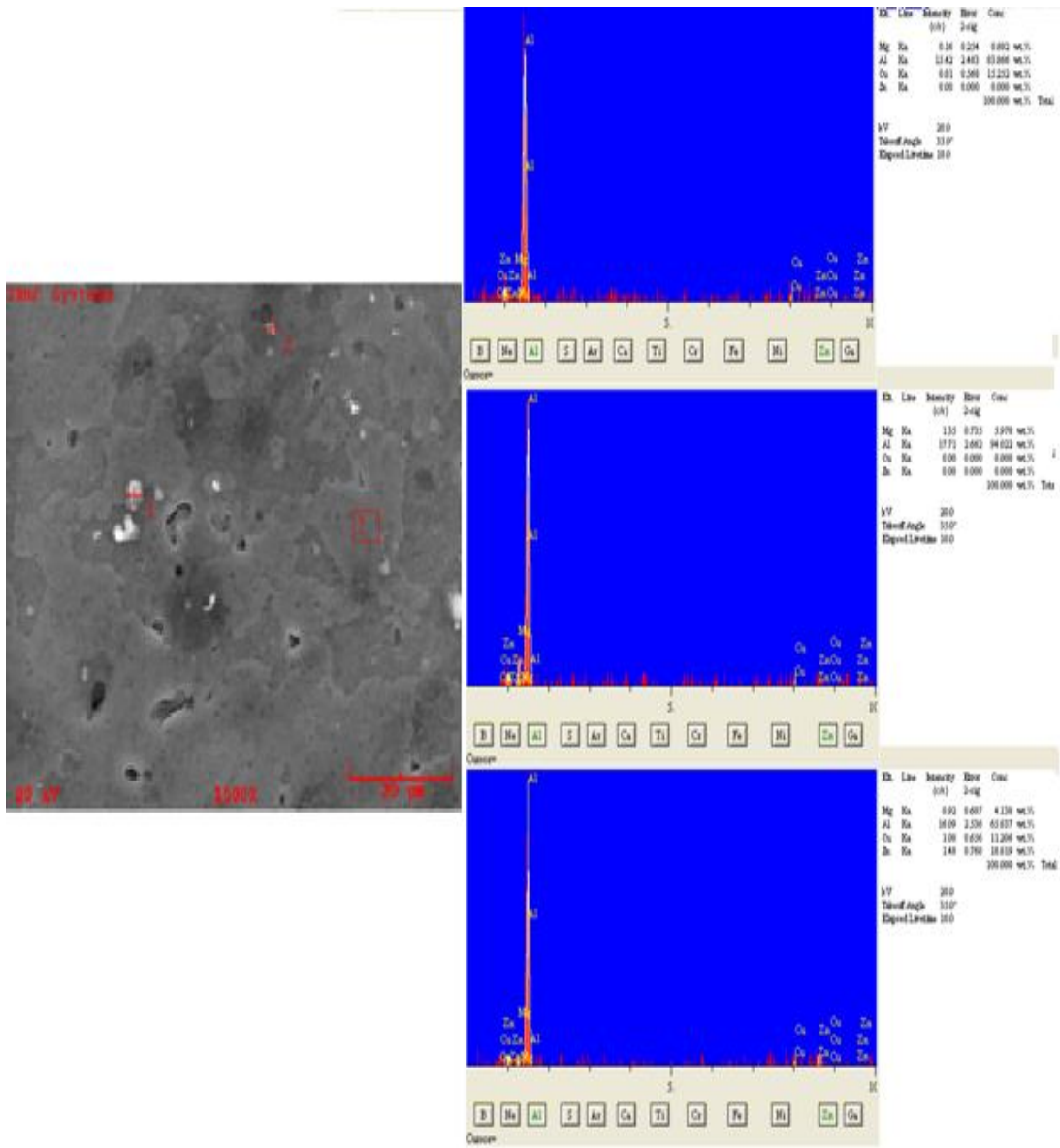


Şekil 6.6. Farklı ısıl işlemler uygulanan AA7075 alaşımının SEM görüntüleri a) O, b) T6, c) HTPP, d) RRA.

Şekil 6.6.a' da verilen tavllanmış (O) numunenin mikroyapısında işlemin gereği olarak ikinci faz oluşumlarının olmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca bu numunenin mikroyapısında mikro boşlukların ve üretim aşamasında olduğu dönüşümleri sert noktaların veya segregasyonların olduğu anlaşılmaktadır. T6, RRA ve HTPP ısıl işlemleri uygulanan numunelerde (Şekil 6.6.b, c, d) ise yaşlandırma etkisi ile ikinci faz çökeleklerin olduğu görülmektedir. Ayrıca farklı ısıl işlem görmüş numunelerin tane yapısı dikkate alındığında en iri taneli mikroyapının tavlama işleminde (O) olduğu anlaşılmaktadır. HTPP ve RRA ısıl işlemleri uygulanan numunelerdeki tane büyüklüğü, T6 ısıl işlemi uygulanan numuneye göre daha büyük görüldüğü yine Şekil 6.6' da verilen SEM görüntülerinden anlaşılmaktadır. Bunun sebebi, T6 ısıl işleminde katı eriyiğe alınan numuneler hızlı soğutulduktan sonra 120 °C' de 24 saat yaşlandırılmıştır. HTPP ve RRA ısıl işlemlerinde (yaşlandırma işlemlerinde), T6 ısıl işleminden sonra 450 °C' de 30 dakika ön çökelek oluşturma işlemi ve RRA ısıl

işleminde 220 °C’ de 1 saat yeniden çözeltilmeye alma ve 120 °C’ de 24 saat ikinci yaşlandırma işlemi sırasında numuneler tekrar ısı ile muhatap oldukları için tane boyutunda bir artış olduğu söylenebilir [27, 37].

AA7075 alüminyum alaşımına uygulanan RRA ısı işleminin sonunda malzemenin yapısında oluşan değişimleri belirlemek amacıyla EDS analizleri yapılmıştır. Şekil 6.7’ de 220 °C’ de 1 saat yeniden çözeltilmeye alındıktan sonra 120 °C’ de 24 saat yaşlandırılan numunedan elde edilen EDS analizleri verilmiştir.

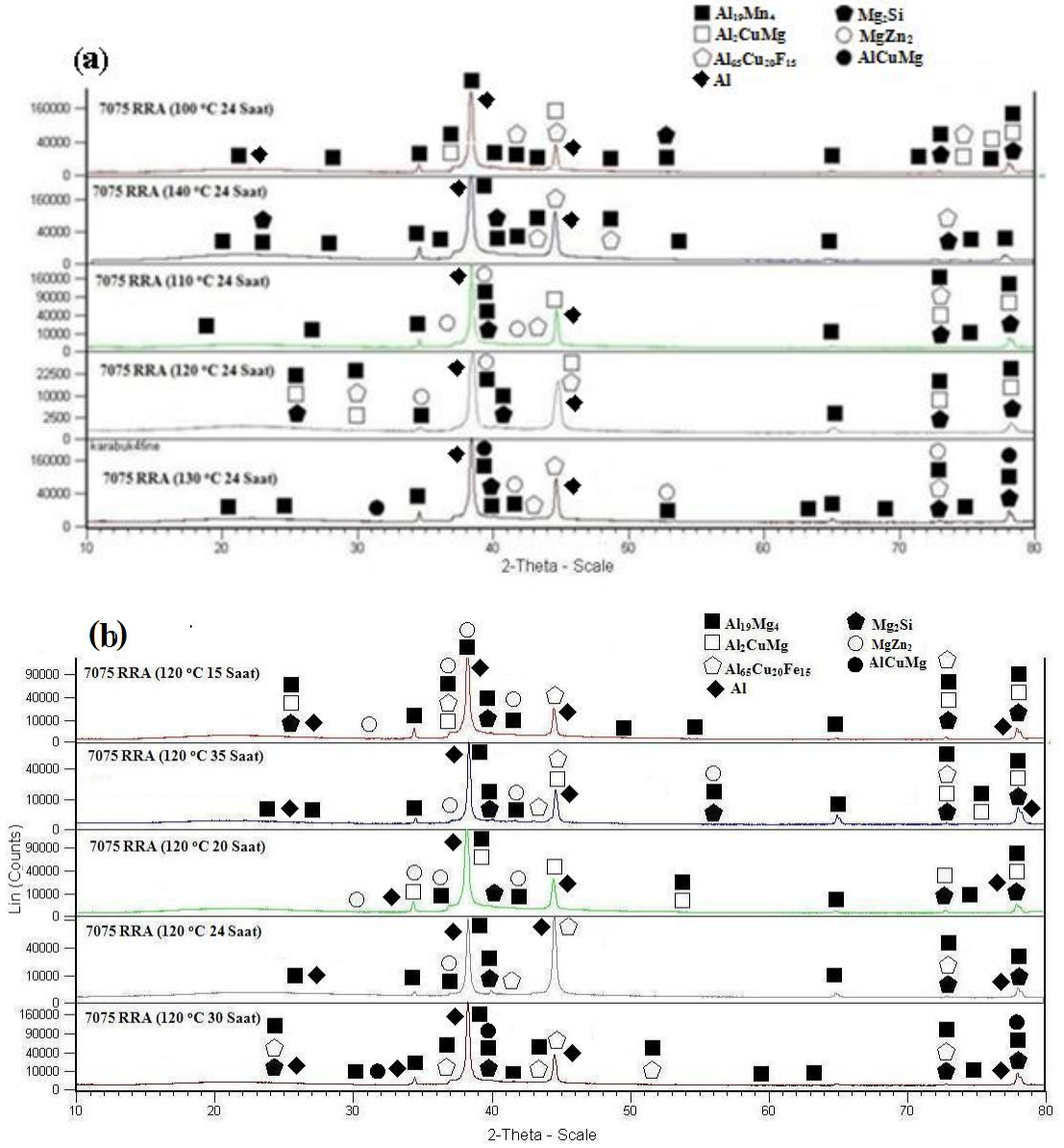


Şekil 6.7. 220 °C’ de 1 saat çözeltilmeye alınan RRA ısı işleminin EDS analizi.

AA7075 alüminyum alaşımına uygulanan RRA ısıtma işlemi sonunda malzemenin yapısında oluşan değişimleri belirlemek amacıyla yapılan ve üç ayrı noktadan alınan EDS analizinden 1. noktada göre Zn fazı olmadığı anlaşılmaktadır. Bunun yanında çok az bir miktar Cu (% 15,022) çökelmiştir. Yüksek oranda Al (% 83.866) olduğu görülmektedir. Mg ise % 0,882 arasındadır. 2. nokta incelendiğinde Zn ve Cu elementleri olmadığı bir olduğu görülmektedir. Al oranı ise diğer bölgelerden daha yüksek (% 94,022) seviyededir. Mg oranı ise 5,978 olduğu belirlenmiştir. 3. nokta incelendiğinde ise Mg fazı % 4,138 oranında olduğu anlaşılmaktadır. Al oranı ise yine diğer elementlerden (%65.837) fazladır. Bu noktada az miktarda Cu (%11.206) ve Zn (%18.819) elementlerden belirlenmiştir. Ama bu oranlar Mg (% 4.138) miktarından daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. T6 işleminin ardından yapılan yeniden çözeltiye alma işlemi ile malzemenin mikro yapısında GP-1 ve GP-2 bölgeleri oluşmaktadır. Malzeme yaşlandırma sırasında sıcaklığa uzun süre maruz bırakılırsa  $\eta'$  fazı oluşur.  $\eta'$  fazı nm boyutundadır.  $\eta'$  fazı yeniden çözeltiye alma işlemi ile hem yeni fazlar oluşur hem de  $\eta'$  fazı boyut olarak büyür ve  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) oluşur. Ancak bu fazlar analizlerinde görülmez.

### 6.3. XRD İNCELEMELERİ

Şekil 6.8.a ve b' de farklı sıcaklıklarda ve farklı sürelerde RRA ısıtma işlemi uygulanan numunelerden elde edilen X-ışını kırınımı (XRD) sonuçları verilmektedir.



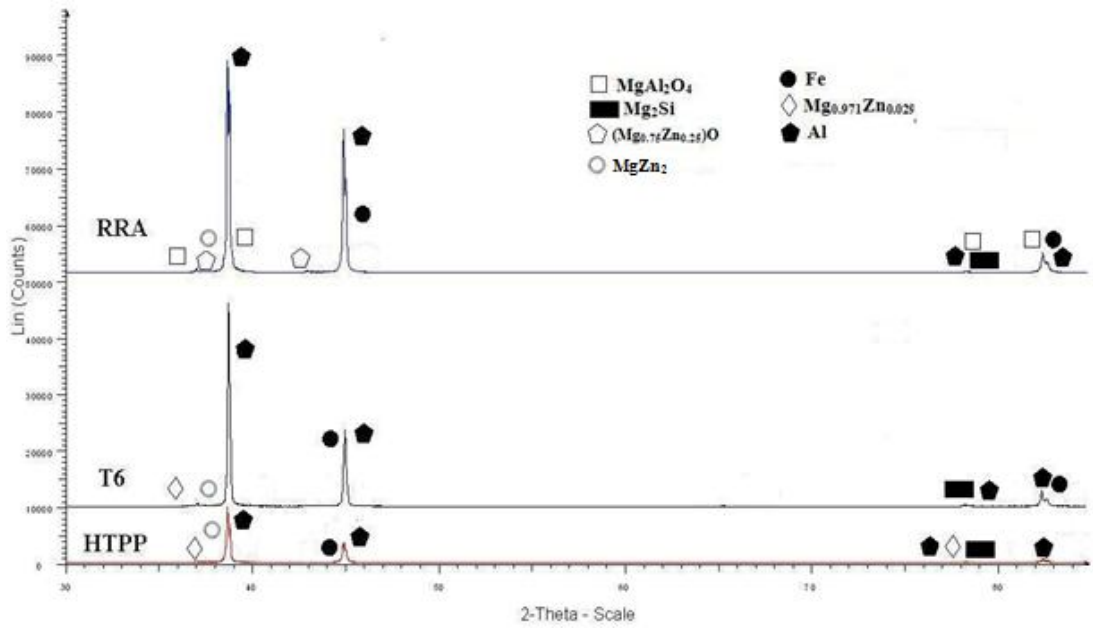
Şekil 6.8. RRA ısıl işleminde farklı sıcaklıklarda a) ve sürelerde b) yeniden yaşlandırılan numunelerin XRD analizi sonuçları.

Şekil 6.8.a ve b' den de anlaşılacağı gibi farklı sıcaklık ve sürelerde RRA ısıl işlemi uygulanan numunelerde  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) çökelekler oluşmaktadır. Bunun yanı sıra T6 ve HTPP ısıl işlemleri sırasında oluşan  $Mg_{0,971}Zn_{0,025}$  fazının, RRA ısıl işlemi uygulanan numunede oluşmadığı anlaşılmaktadır. Ayrıca farklı sıcaklık ve sürelerde RRA ısıl işlemi ile yapılan yaşlandırma işleminde farklı sıcaklıklar kullanılarak yapılan XRD analizine (Şekil 6.8.a) göre oluşan fazlarda farklı bölgelerde ve oranlarda  $Al_{19}Mg_4$  fazı belirlenmiştir.  $Mg_2Si$  fazı ise her sıcaklık parametresinde oluşmaktadır.  $AlCuMg$  fazı sadece 130 °C' sıcaklık ve 24 saat sürede meydana gelmiştir.



RRA ısıtılma işleminde farklı yeniden yaşlandırma süreleri kullanılan ısıtılma işlemlerinin XRD analizlerine (Şekil 6.8.b) göre büyük oranda  $Al_{19}Mg_4$  fazı belirlenmiş olup farklı bölgelerde yine bu faz oluşmaktadır. AlCuMg fazı farklı sıcaklık kullanılan ısıtılma işlemlerinin aksine bu parametrelerde oluşmamıştır.  $Al_2CuMg$  fazının  $120\text{ }^{\circ}C$  24 saat yeniden yaşlanma süresinde oluşmadığı gözlenmiştir. Yapılan incelemelerde  $Mg_2Si$  fazı bütün şartlarda oluştuğu belirlenmiştir.

Farklı ısıtılma işlemleri uygulanarak yaşlandırılan numunelerin mikroyapılarında oluşan fazların (intermetaliklerin) belirlenmesi için R-ışını kırınımı (XRD) incelemeleri yapılmıştır. Şekil 6.9’ de HTPP, T6, RRA ısıtılma işlemleri uygulanan numunelerden elde edilen XRD analizi sonuçları verilmiştir.



Şekil 6.9. HTPP, T6, RRA ısıtılma işlemlerinin XRD analizlerinin görüntüleri.

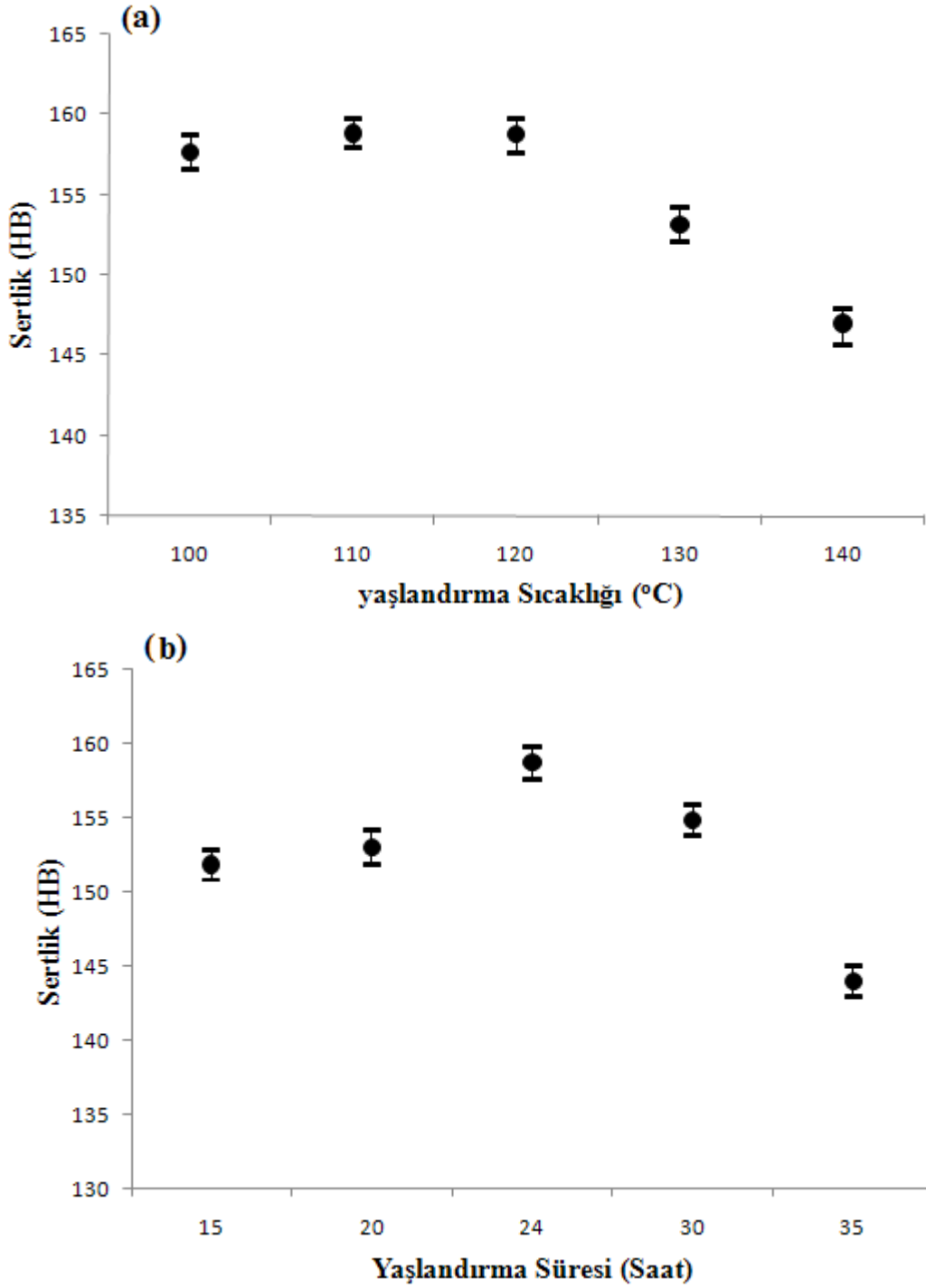
Şekil 6.9’ den de anlaşılacağı gibi yaşlandırma işlemleri sonucunda malzemede ikinci faz çökelekler oluşmuştur. Her ne kadar SEM görüntülerinde çok net olarak görülmesi de XRD incelemeleri sonunda  $Mg_2Zn$  çökeleklerinin oluştuğu XRD analizlerinde net olarak ortaya çıkmaktadır. Yaşlandırma ısıtılma işlemleri sırasında, literatürde çok fazla değinilmeyen  $MgAl_2O_4$ ,  $(Mg_{0.76}Zn_{0.025})O$ ,  $MgZn_2$  ve  $Mg_2Si$  intermetalik fazlarının da yaşlandırılan yapılarda oluştuğu belirlenmiştir. Ayrıca Al ve Fe gibi elementlerin de yapıda olduğu görülmektedir. Al ve Fe’ in yapıda

görülmesi AA7075 alaşımının üretim aşamasında meydana gelen segregasyonların veya hızlı katılaşma ile yapıda oluşan sert noktaların varlığını da ifade etmektedir. Bu sert noktalar Şekil 6.6' da verilen SEM görüntülerini de açıklamaktadır.

#### **6.4. SERTLİK SONUÇLARI**

AA7075 alüminyum alaşımına farklı yeniden yaşlandırma sıcaklıkları kullanılarak RRA ısıtma işlemi uygulanmış ve sertlik değerleri ölçülmüştür. Şekil 6.10' da RRA ısıtma işleminde farklı yeniden yaşlandırma sıcaklık parametrelerinin sertlik sonuçları belirlenmiştir.

Şekil 6.10.a ve b farklı sıcaklıklarda ve sürelerde RRA ısıtma işlemi uygulanarak yaşlandırılan numunelerden elde edilen sertlik değerleri verilmiştir.



Şekil 6.10. RRA ısıt işleminde farklı sıcaklıklarda a) ve sürelerde b) yeniden yaşlandırılan numunelerin sertlik sonuçları.

Şekil 6.10.a' dan da anlaşılacağı gibi RRA ısıt işleminde 24 saat süre ile 100 °C, 110 °C, 120 °C, 130 °C ve 140 °C sıcaklıklarda yaşlandırılan numunelerden en yüksek sertlik değerleri 120 °C (159 HB) sıcaklıkta yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir. 100 °C' ta yaşlandırılan numunelerde 157 HB sertlik değeri elde edilirken,

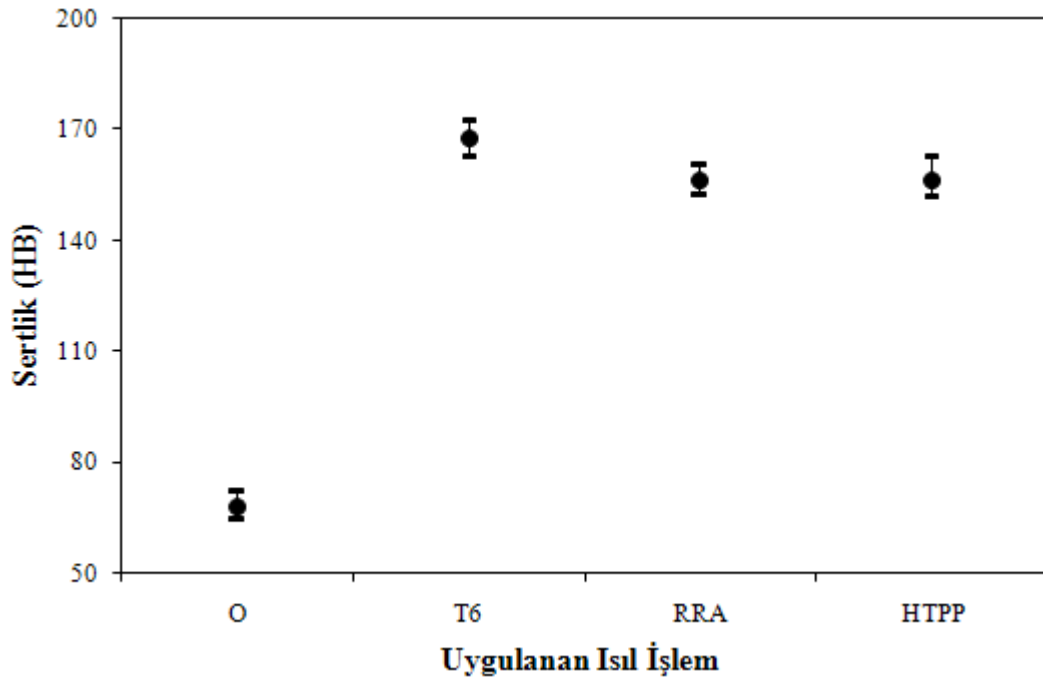
sıcaklık 110 °C' a çıkarıldığında sertlik 158 HB olarak ölçülmüştür. 120 °C' tan sonra (130 °C, 140 °C) yapılan yaşlandırma işlemleri sonucu elde edilen sertlik değerleri sırasıyla 153 HB ve 147 HB' dir. Burada 120 °C' tan sonra yapılan RRA ısıtma işlemi ile yaşlandırma sıcaklıklarında AA7075 alüminyum alaşımının sertliklerinde bir azalma meydana geldiği izlenmektedir. Sertlikteki bu azalma alaşımın 120 °C üzerindeki sıcaklıklarda aşırı yaşlanma periyoduna girdiğini ifade etmektedir. Şekil 6.10.b' de 120 °C' ta ve beş farklı sürede (15, 20, 24, 30, 35 saat) yapılan RRA ısıtma işlemleri sonucunda elde edilen sertlik değerleri verilmektedir.

Şekil 6.10.b' den de anlaşılacağı gibi 24 saat süre ile RRA ısıtma işlemi uygulanan numunelerde en yüksek sertlik değeri (159 HB) elde edilmiştir. Elde edilen grafik incelendiğinde 15 saat, 20 saat ve 24 saat RRA ısıtma işlemi uygulanan numunelerde sertlik değerleri sürekli bir artış seyri gösterirken 24 saatten sonra (30 ve 35 saat) sertlik değerlerinde bir azalma eğilimi olduğu belirlenmiştir. Bu durum alaşımın yine aşırı yaşlanma periyoduna girdiğini ve burada kritik sürenin en yüksek sertlik değerine ulaşılan sürenin 24 saat olduğu anlaşılmaktadır.

RRA ısıtma işlemi uygulanarak yapılan yaşlandırmada, mikroyapıda oluşturulan  $\eta'$  fazının oluşması ve ısıtma işlem parametrelerine bağlı olarak artması sertlikte artışa sebep olmaktadır. Yaşlandırma işlemi ile mikroyapıda oluşturulan  $\eta'$  fazının miktarı ve boyutları yeniden yaşlandırma sıcaklığı ve süresi ile artmaktadır. Mikroyapıda ilk aşamada oluşturulan GP bölgeleri yarı kararlı ve matris ile uyumludur.  $\eta$  fazı ise dengeli ve matris ile uyumsuzdur. Yeniden çözüme alma ve yeniden yaşlandırma (RRA) ısıtma işleminde, yaşlandırma süresine ve sıcaklığa bağlı olarak dengeli ve uyumsuz  $\eta$  fazı büyüme eğilimine (aşırı yaşlanma) girmektedir. Aşırı büyüyen  $\eta$  fazı ( $MgZn_2$ ) ile sertlikte azalmaya neden olmaktadır.

Farklı ısıtma işlemleri (O, T6, RRA ve HTPP) uygulanarak yaşlandırılan AA7075 alüminyum alaşımlarından elde edilen sertlik değerleri Şekil 6.11' de verilmiştir. Elde edilen sertlik sonuçlarına göre tavlama (O) işlemi uygulanan numunelerde ortalama sertlik 68 HB olarak ölçülmüştür. T6, RRA ve HTPP ısıtma işlemleri uygulanarak yaşlandırılan numunelerde ise tavlama (O) ısıtma işlemi uygulanan numunelerden elde edilen sertlik değerlerinden daha yüksek sertlik değerleri elde

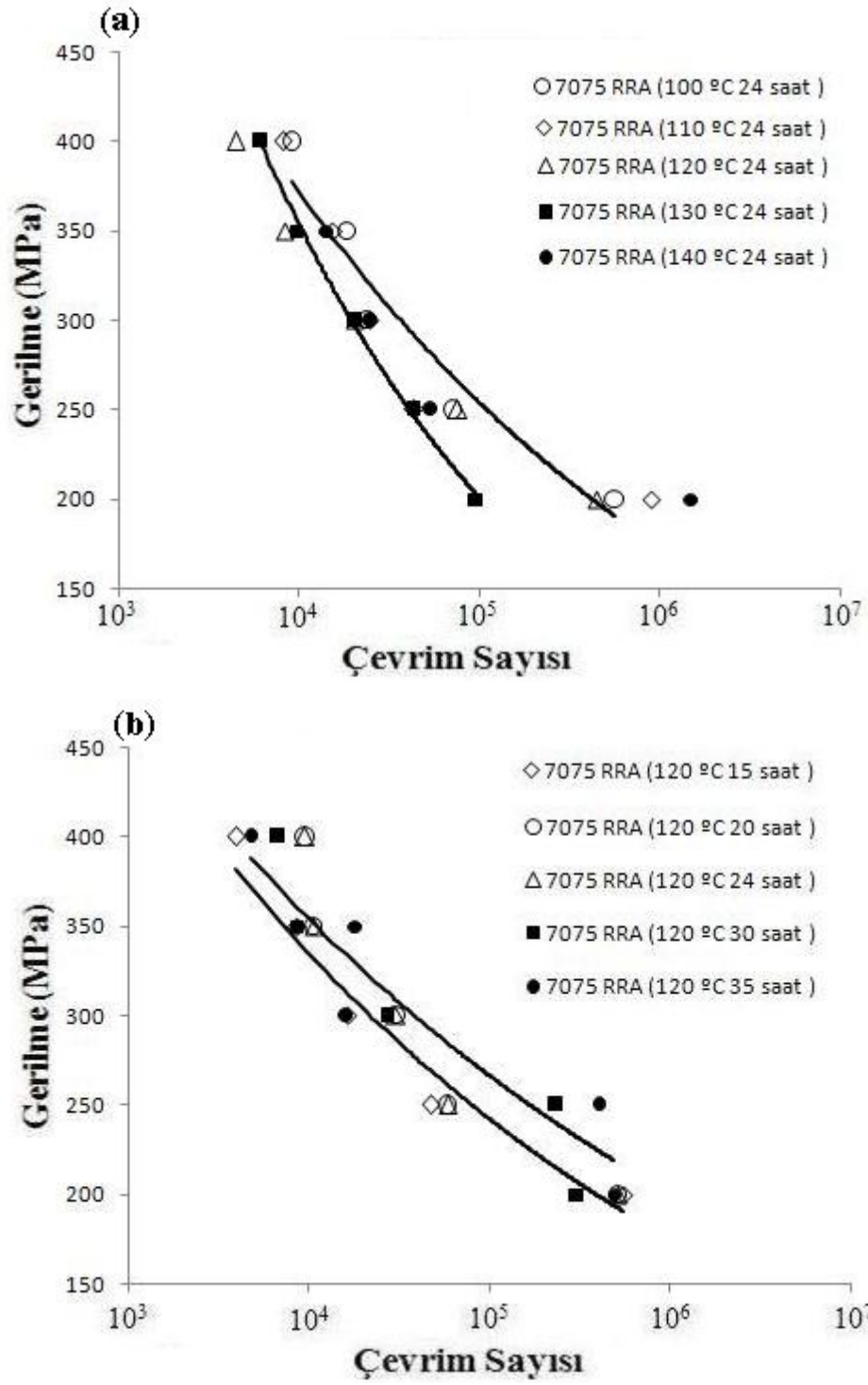
edilmiştir. T6 ısıl işlemi uygulanan numunelerden elde edilen sertlik değerlerinin (168 HB) en üst değerler olduğu belirlenmiştir. RRA ve HTPP ısıl işlemlerinde sertliklerin (RRA 156 HB, HTPP 157 HB) T6 ısıl işlemine göre bir miktar azaldığı görülmüştür. Sertlikteki bu azalmaların T6 ısıl işleminden sonra RRA ısıl işlemi yeniden çözeltiyeye alma ve yeniden yaşlandırma aşamasında, HTPP ısıl işlemi ise yüksek ön çökelek oluşturma aşamasında tekrar ısıtılması ile yapıda zaten mevcut olan  $\eta$  ( $Mg_2Zn$ ) çökeleklerinin meydana gelen boyutsal artış (çökeleklerin büyümesi) olduğu düşünülmektedir.



Şekil 6.11. Farklı ısıl işlem uygulanan (O, T6, RRA, HTPP) AA7075 alaşımının sertlik sonuçları.

## 6.5. YORULMA TEST SONUÇLARI

Farklı yeniden yaşlandırma sıcaklıkları ve süreleri kullanılarak yeniden yaşlandırılan (RRA) numunelerin yorulma testleri sonucunda elde edilen gerilme-çevrim sayısı (S-N) diyagramı Şekil 6.12.a ve b' de verilmektedir.



Şekil 6.12. RRA ısıtılmasında farklı yeniden yaşlandırma sıcaklıkları a) ve sürelerinde b) yeniden yaşlandırılan numunelerin (S-N) diyagramı.

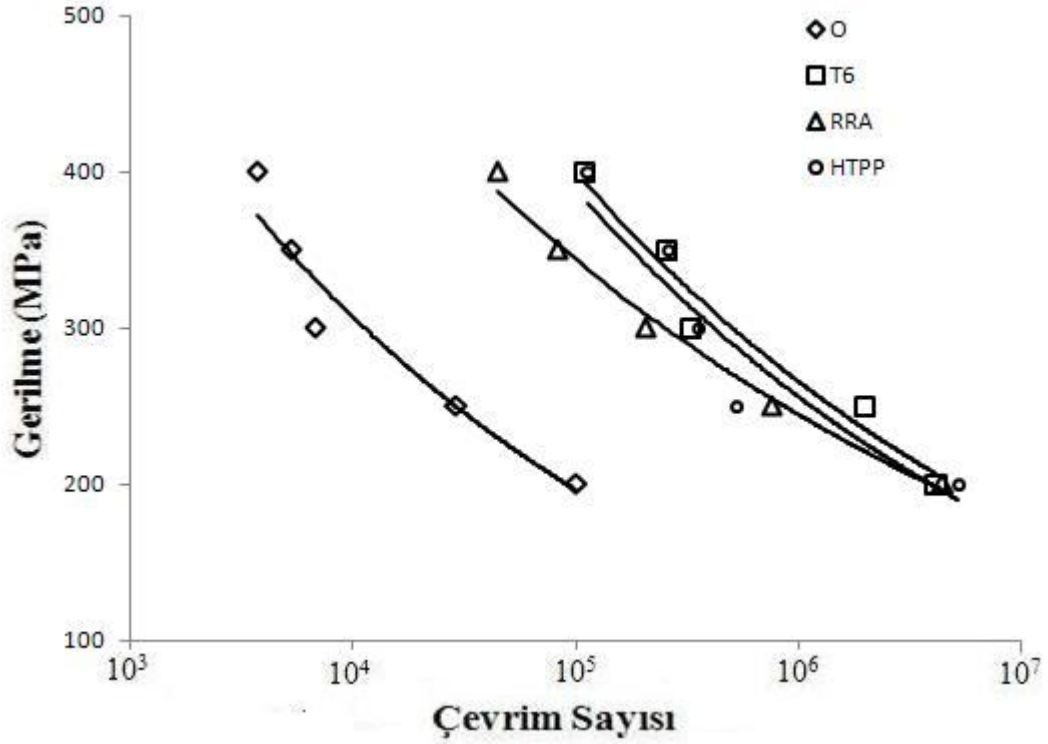
RRA ısıtılmasında farklı yeniden yaşlandırma sıcaklıkları kullanılarak yapılan yorulma testlerinin (S-N) diyagramında belirlenen yorulma davranışları yeniden yaşlandırma sıcaklığının artışıyla birlikte artma eğilimi göstermektedir. Ancak 120

°C' den sonraki sıcaklıklarda yorulma eğrileri diyagramda görüldüğü gibi azalma eğilimi sergilemektedir. Bu durum sıcaklık artışıyla birlikte RRA ısıtma işleminde yorulma dayanımının arttığını fakat 120 °C' den sonraki sıcaklıklarda yorulma dayanımında azalma olduğunu ortaya koymaktadır. Bunun sebebi olarak da 120 °C' den sonra sıcaklık yükseldikçe malzemenin iç yapısında oluşturulan ikinci faz çökeleklerin irileştiğini (aşırı yaşlanma periyoduna girdiğini) ifade etmektedir [38]. Yorulma testleri sonunda belirlenen farklı yeniden yaşlandırma sürelerinde kullanılarak yapılan RRA ısıtma işleminin gerilme-çevrim sayısı (S-N) diyagramı Şekil 6.12.b' de verilmektedir.

RRA ısıtma işleminde farklı yeniden yaşlandırma süreleri kullanılarak yapılan yorulma testlerinin (S-N) diyagramında belirlenen çevrim sayısı ve yorulma davranışı yeniden yaşlandırma süresinin artışıyla birlikte artış göstermektedir. Ancak 120 °C sıcaklık ve 24 saatten sonraki süre değişimlerinde çevrim sayısı ve yorulma davranışı azalma eğilimi sergilemektedir. Bu da sürenin artmasıyla birlikte RRA ısıtma işleminde yorulma dayanımının arttığını fakat 120 °C 24 saatten sonraki süre değişimlerinde yorulma dayanımında azalma olduğunu göstermektedir. Bunun sebebi olarak da 120 °C ve 24 saatten sonra süre arttıkça yükseldikçe malzemenin iç yapısında meydana gelen ikinci faz çökeltilerin aşırı yaşlanma periyoduna girdiğini göstermektedir.

Şekil 6.13' te O, T6, RRA ve HTPP ısıtma işlemi uygulanarak yaşlandırılmış AA7075 alüminyum alaşımının yorulma testleri sonucunda elde edilen S-N diyagramı verilmiştir. Bu diyagramda, tavlama (O) işlemi yapılmış numunelerin yorulma eğrisinin diğer (T6, RRA, HTPP) ısıtma işlemi uygulanarak yaşlandırılmış numunelerden ayrıldığı görülmektedir. Yani tavlama işlemi uygulanan numunelerin yorulma dayanımı yaşlandırılmış numunelerin yorulma dayanımlarından oldukça düşük olduğu belirlenmiştir. En yüksek çevrim sayıları (aynı yüklemelerde) T6 ısıtma işlemi uygulanmış numunelerde görülmüştür. HTPP ve RRA ısıtma işlemi uygulanan numunelerin çevrim sayılarının ve yorulma dayanımlarının ise birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir. RRA ve HTPP ısıtma işlemleri uygulanarak yaşlandırılan numunelerin yorulma dayanımları ve çevrim sayıları tavlama (O) yapılan numunelerden daha fazla olmakla birlikte T6 ısıtma işlemi ile yaşlandırılan numunelerle karşılaştırıldığında daha düşük çevrim sayısı ve yorulma dayanımına sahip olduğu

görülmektedir. Yorulma dayanımlarındaki bu değişimlerin T6 ısıtılmasından sonra RRA ısıtılmasında yeniden çözeltiye alma ve yeniden yaşlandırma aşamasında, HTPP ısıtılmasında ise yüksek ön çökelek oluşturma aşamasında tekrar ısıtılması ile yapıda zaten mevcut olan  $\eta$  ( $Mg_2Zn$ ) çökeleklerinin meydana gelen boyutsal artış (çökeleklerin büyümesi) olarak söylenebilir.



Şekil 6.13. O, T6, RRA ve HTPP ısıtılma işlemi uygulanmış deneysel malzemenin S–N diyagramı.

$10^5$  çevrim sayısı için çevrimdeki yorulma dayanımı dikkate alındığı zaman, ısıtılma işlemi yapılmış numunelerin yorulma dayanımı tavlama işlemi yapılan numunelerin yorulma dayanımına göre yaklaşık % 40 oranında bir artış olduğunu göstermektedir. RRA ısıtılma işlemi uygulanmış numunelerdeki yorulma dayanımında ise T6 ve HTPP ısıtılma işlemlerindeki numunelerin yorulma dayanımına göre  $10^6$  çevrim sayısı dikkate alınır ise yaklaşık olarak % 38 oranında artma görülmektedir. T6 ısıtılma işlemindeki numunelerin yorulma dayanımı  $10^7$  HTPP durumundaki numunelerin yorulma dayanımından yaklaşık % 8 oranında bir azalma görülmektedir. AA7075 alüminyum alaşımının akma dayanımı tavlama (O) işleminde yaklaşık 105 MPa, T6 (ısıtılma işlemi)

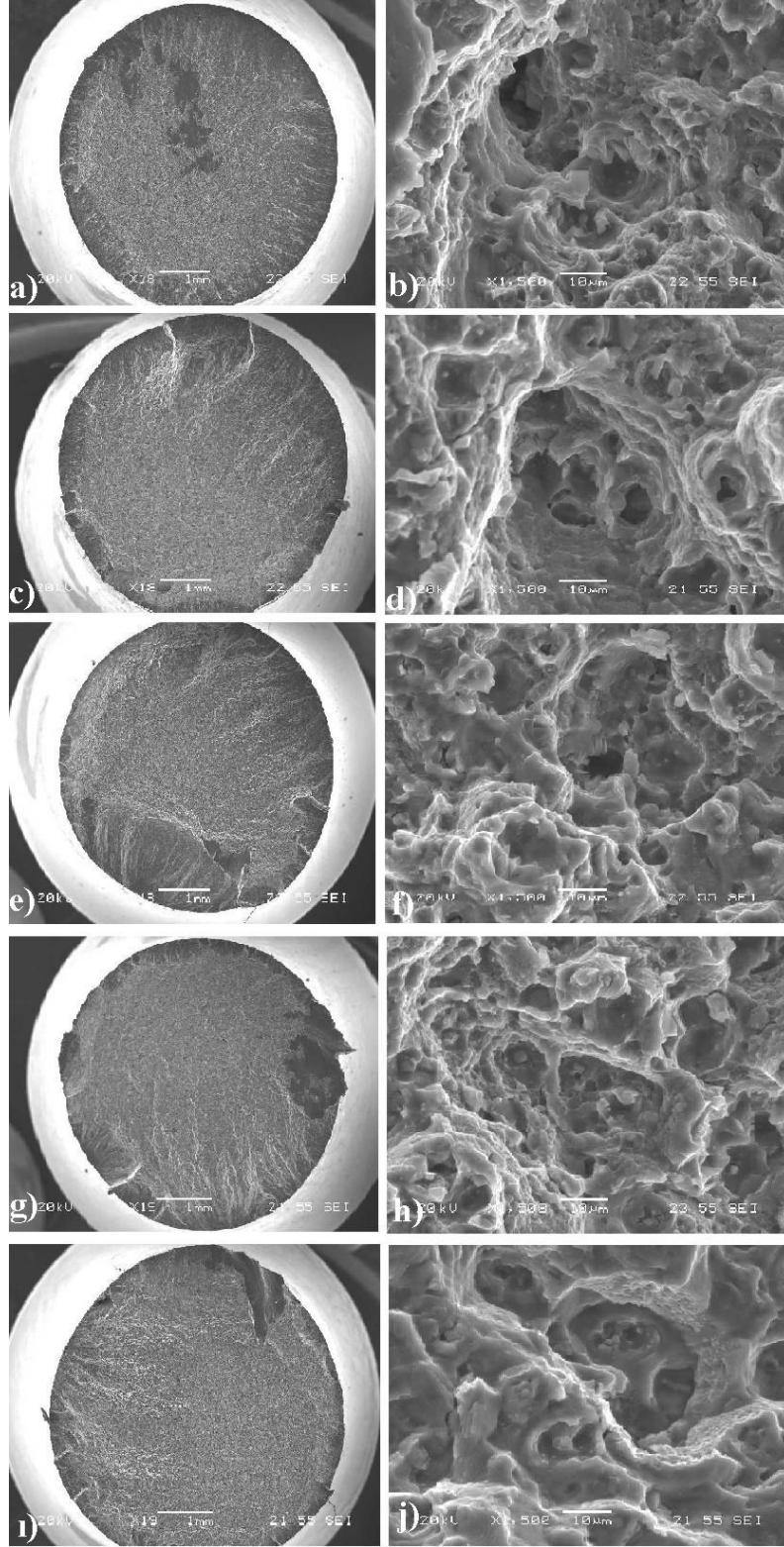


durumunda 570 MPa' dır. AA7075 alüminyum alaşımına uygulanan gerilmeler, akma dayanımının altında olduğu için yorulma türü uzun ömürlü yorulmadır.

## **6.6. KIRIK YÜZEY İNCELEMELERİ**

Yorulma testleri sonunda AA7075 alüminyum alaşımına farklı yeniden yaşlandırma sıcaklıkları kullanılarak yapılan RRA ısıtma işleminde oluşan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.14' te verilmektedir.

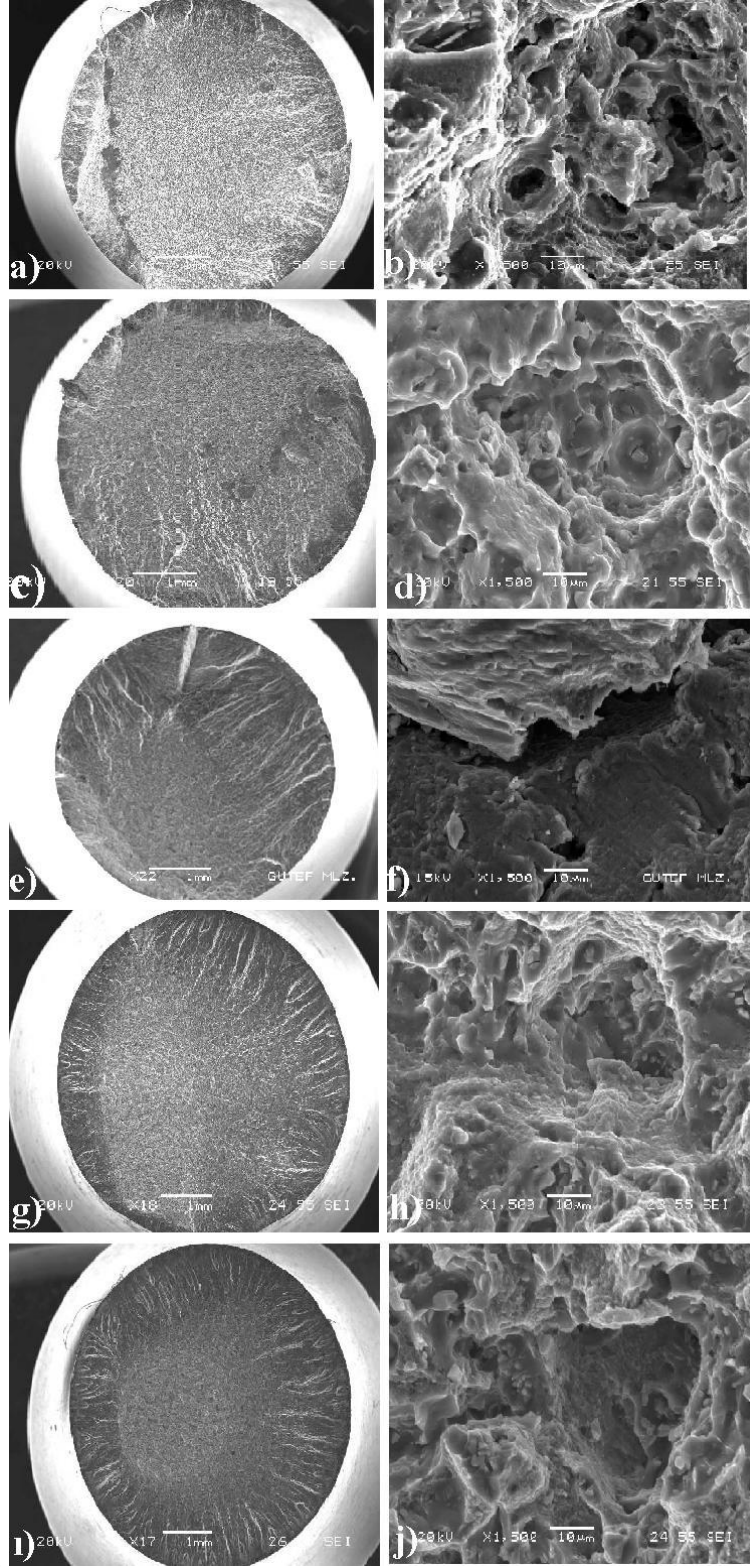
,



Şekil 6.14. RRA ısıtılmasında farklı yeniden yaşlandırma sıcaklıkları kullanılarak yorulma testi yapılan numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri a, b)100 °C, c, d)110 °C e, f) 120 °C, g, h) 130 °C, i, j) 140 °C.

Şekil 6.14' ten de anlaşılacağı gibi yeniden yaşlandırma sıcaklığı numunenin yorulma davranışında önemli parametrelerden biridir. Özellikle en yüksek çevrim sayısı ve yorulma davranışı sergileyen 120 °C' ta 24 saat yeniden yaşlandırılmış numuneden elde edilen kırık yüzey görüntüsünde belirgin bir kırılma bölgesi oluşmuştur. Bu kırılma bölgesinin diğer sıcaklıklarda (100, 110, 130, 140 °C) yeniden yaşlandırılan numunelerin kırılma bölgelerinden daha büyük olduğu görülmektedir.

Yorulma testleri sonunda AA7075 alüminyum alaşımına farklı yeniden yaşlandırma süreleri kullanılarak yapılan RRA ısıtma işleminde oluşan kırık yüzeylerin SEM görüntüleri sırasıyla Şekil 6.15' te verilmektedir.

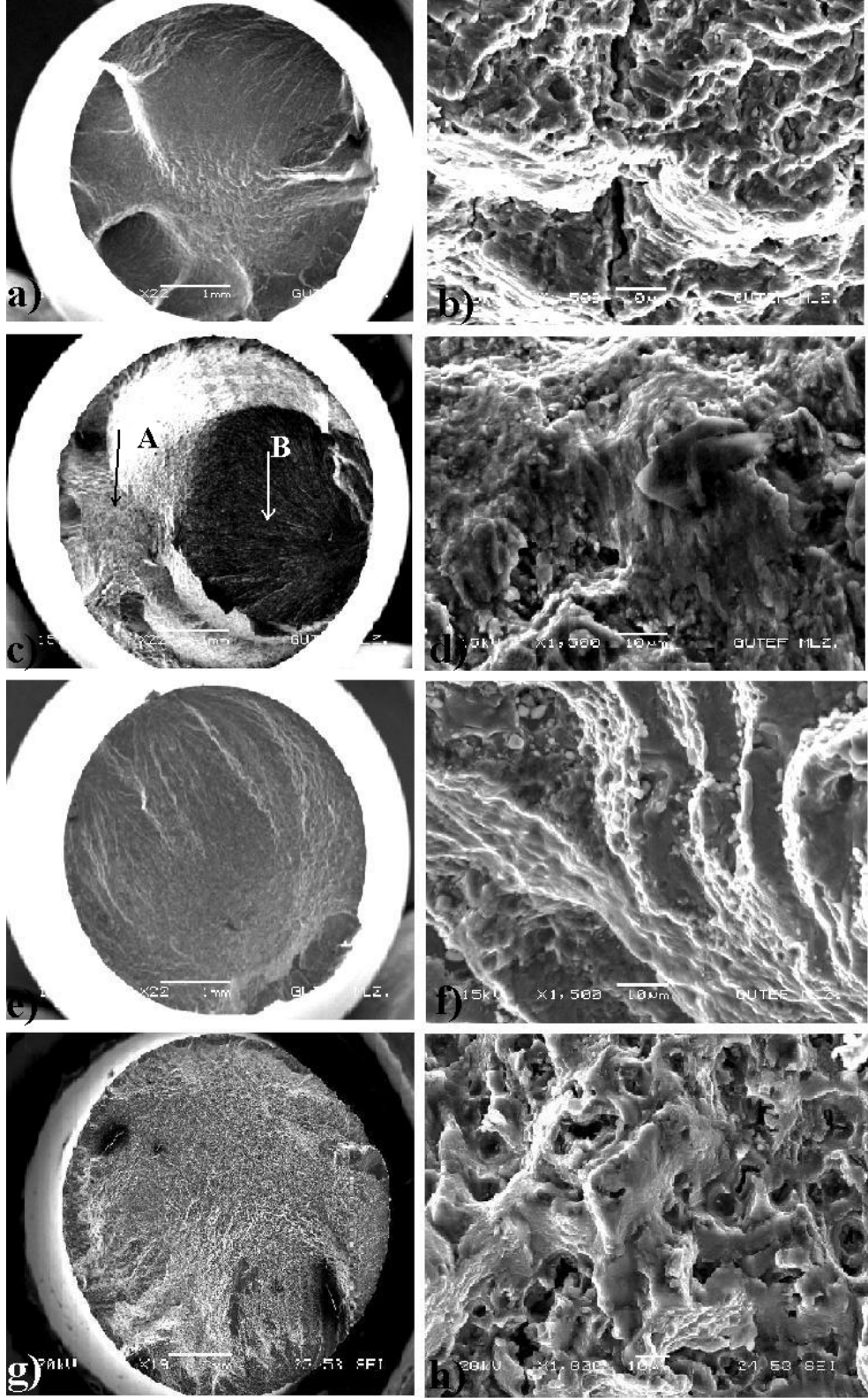


Şekil 6.15. RRA ısıl işleminde farklı yeniden yaşlandırma süreleri kullanılarak yorulma testi yapılan numunelerin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri a, b)15, c, d)20 e, f) 24, g, h) 30, ı, j) 35 saat.

Farklı sürelerde (15, 20, 24, 30, 35 saat) yeniden yaşlandırılan numunelerin yorulma testleri sonucunda en yüksek çevrim sayısı ve yorulma dayanımı gösteren (24 saat 120 °C) numunenin kırılma yüzeyinde bir kırılma bölgesinin varlığı dikkat çekmektedir (Şekil 6.15.e.f.). Diğer numunelerin kırık yüzeylerinde bu kırılma bölgesi net bir şekilde görülmemektedir. Ayrıca aynı numunenin kırık yüzeyi daha büyük büyütmede incelendiğinde makro çatlakların oluştuğu anlaşılmaktadır. Diğer numunelerin kırık yüzeylerinde ise numune dış yüzeyinden merkeze doğru makro çatlaklar oluşmuş, fakat belirgin bu makro çatlaklar belirgin bir kırılma bölgesi oluşturmamıştır.

Yorulma genellikle mikroyapılarda meydana gelen veya farklı işlemlerle oluşturulan kusurlardan kaynaklanan bir mekanik özelliktir. Malzeme yapısındaki bu kusurlar, yükleme ile oluşan bölgesel gerilimlerden kaynaklanmaktadır. Farklı yaşlandırma ısı işlemleri ile yapıda oluşturulan ikinci faz çökeleklerin malzeme içyapısında gerilmelere neden olurlar. Malzeme içyapısında oluşturulan ve malzemenin dayanımını arttıran çökeleklerin sebep olduğu gerilmelerin aşıldığında uygulanan yük ve çevrim sayısı artmaktadır. Çevrim sayısındaki bu artış malzemenin yorulma dayanımını da arttırmaktadır. Uygulanan yük ve çevrim sayısına bağlı olarak numunenin içyapısında bölgesel plastik deformasyon hatları oluşmaktadır. Uygulanan yükün etkisiyle hareket eden dislokasyonlar bir araya gelerek birlikte hareket ederler ve kayma bantları (luders) oluştururlar. Bu kayma bantları yüzeyde girinti-çıkıntı ve çökelmelere neden olur ve gerilim yığılmaları meydana gelir. Zaman içinde yorulma numunesi bu gerilim yığılması olan bölgelerde kırılır [39].

Yorulma testlerinden sonra numunede oluşan kırık yüzey görüntüleri SEM' de çekilmiş ve incelenmiştir. Şekil 6.16' da farklı ısı işlem uygulanmış numunelerin kırık yüzeyleri verilmiştir.



Şekil 6.16. O, T6, RRA ve HTPP ısı işlemleri uygulanan yorulma numunelerinin kırık yüzeylerinin SEM görüntüleri a, b) O, c, d) T6, e, f) RRA, g, h) HTPP.

Kırık yüzeyler incelendiğinde kırılma yüzeyleri ve çatlak oluşumu hepsinde farklılık göstermektedir. Tavlama işlemi uygulanan numunenin kırık yüzeyi incelendiğinde (Şekil 6.8) sünek kırılma meydana geldiği anlaşılmaktadır. Numune yüzeyinde oluşan büyük çukurcuklar sünek kırılmayı ifade etmektedir. Yorulma testleri sırasında yükün ve çevrim sayısının etkisiyle numune yüzeyinde oluşmaya başlayan çatlaklar merkeze doğru ilerlemektedir. Kırık yüzey büyütüldüğünde malzemenin iç kısmında çatlakların oluştuğu anlaşılmaktadır. Numune yüzeyinden itibaren oluşan mikro çatlaklar numunenin iç kısımlarına doğru ilerlerken birleşerek makro çatlakların oluşmasını sağlar. Bu makro çatlakların oluşması malzemenin kırılma davranışını (daha kısa sürede) etkilemiştir. (Şekil 6.16.a.b).

T6 ısıtma işlemi uygulanarak yaşlandırılan numunede ise kırılmanın yarı-sünek olarak gerçekleştiği Şekil 6.16.c.d’ de görülmektedir. Başlangıçta dış (A yönünde) yüzeylerden başlayan çatlak oluşumları çevrim sayısında artışa paralel olarak ilerlemekte ve (B ile gösterilen bölgede, kırılma bölgesinde) malzemenin kırılmasına neden olmaktadır. RRA (Şekil 16.e.f) ve HTPP (Şekil 16.g.h) ısıtma işlemi ile yaşlandırılmış numunelerde ise kırılmanın T6 ısıtma işlemi ile yaşlandırılan numunelere göre daha sünek bir kırılma moduna sahip olduğu anlaşılmaktadır.

## BÖLÜM 7

### SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada AA7075 alüminyum alaşımına O, T6, RRA ısıt işlemleri ve RRA ısıt işleminde farklı yeniden yaşlandırma süreleri ve sıcaklıkları kullanılarak AA7075 alüminyum malzemenin yorulma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

- 1- Yeniden çözültüye alma ve yeniden yaşlandırma işleminde malzemenin mikroyapısında  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) fazının oluşturulmasında sıcaklığın (100, 110, 120, 130, 140 °C) ve yeniden yaşlandırma süresinin (15, 20, 24, 30, 35 saat) etkili olduğu görülmüştür.
- 2- Farklı ısıt işlem uygulanan AA7075 alüminyum alaşımında optik mikroskop incelemelerinde tavllanmış (O) numunelerde belirgin bir tane yapısı gözlenmezken, ön çökelek oluşturulan numunelerde (HTPP) yeniden çözültüye alınan ve yeniden yaşlandırılan (RRA) ve yaşlandırılmış (T6) numunelere göre daha iri taneli yapı oluşumları göstermiştir.
- 3- Yaşlandırma ısıt işlemleri sonunda yapılan SEM ve EDS incelemelerinde HTPP, RRA ve T6 ısıt işlemleri sonrasında mikroyapıda  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) fazının oluştuğu görülmüştür.
- 4- Yapılan XRD incelemelerinde  $\eta$  ( $MgZn_2$ ) ile birlikte çok fazla görülmeyen Homojenizasyon işlemi yapılmış numunelerde mukavemeti arttıran çökelek olmadığı için  $MgAl_2O_4$ ,  $(Mg_{0.76}Zn_{0.025})O$ ,  $Mg_{0.971}Zn_{0.025}$  ve  $Mg_2Si$  intermetalik fazlarında bulunduğu belirlenmiştir.



- 5- RRA ısıtıl işlemlerinde ise sıcaklık parametreleri göz önüne alındığında en yüksek sertlik değerinin 120 °C yaşlandırılan numunelerde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca yeniden yaşlandırma işleminde süre parametreleri dikkate alındığında en yüksek sertlik 24 saat yaşlandırılan numunelerin sahip olduğu görülmüştür.
- 6- Farklı ısıtıl işlemler ile yaşlandırılan numunelerde en yüksek sertlik değerinin T6 ısıtıl işlemi ile yaşlandırılan numunede (168 HB) olduğu belirlenmiştir. HTPP ve RRA ısıtıl işlemlerinde sertliğin RRA 156 HB, ve HTPP 157 HB olduğu gözlenmiştir. Ayrıca sadece tavlama yapılan numunede sertlik değeri 68 HB olarak ölçülmüştür.
- 7- Farklı süreler kullanılarak yapılan RRA ısıtıl işleminde yeniden yaşlandırılan numunelerin yorulma testleri sonucunda en yüksek çevrim sayısı ve yorulma dayanımı gösteren 24 saat numunenin kırılma yüzeyinde bir kırılma bölgesinin varlığı dikkat çekmektedir. Diğer numunelerin kırık yüzeylerinde kırılma bölgesi net bir şekilde görülmemektedir. Ayrıca aynı numunenin kırık yüzeyler daha büyük büyütmede incelendiğinde makro çatlakların oluştuğu anlaşılmaktadır. Diğer numunelerin kırık yüzeylerinde ise numune dış yüzeyinden merkeze doğru makro çatlaklar oluşmuş, fakat belirgin bu makro çatlaklar belirgin bir kırılma bölgesi oluşturmamıştır.
- 8- Farklı ısıtıl işlemler uygulanan AA7075 alüminyum alaşımına en yüksek yorulma dayanımı T6 ısıtıl işlemi ile yaşlandırılan numunelerde elde edilmiştir. Bunu HTPP ısıtıl işlemi ile RRA ısıtıl işlemlerinden elde edilen yorulma dayanımları takip etmektedir. En düşük yorulma dayanımı ve çevrim sayılarının tavllanmış (O) numunelerde olduğu belirlenmiştir.
- 9- Farklı sıcaklık parametreleri kullanılarak yapılan RRA ısıtıl işleminde 120 °C sıcaklıkta kırılma bölgesinin diğer sıcaklıklarda (100, 110, 130, 140 °C) yeniden yaşlandırılan numunelerin yorulma testleri sonucunda ortaya çıkan kırılma yüzeylerinin daha farklı olduğu görülmektedir.

10- Kırık yüzey incelemelerinde tavlama (O) işlemi uygulanan numunenin kırık yüzeyinde sünek kırılma meydana geldiği görülmüştür. T6 ısıl işlemi uygulanarak yaşlandırılan numunede ise kırılmanın yarı-sünek olarak gerçekleştiği görülmektedir. RRA ve HTPP ısıl işlemi ile yaşlandırılmış numunelerde ise kırılmanın T6 ısıl işlemi ile yaşlandırılan numunelere göre daha sünek bir kırılma moduna sahip olduğu anlaşılmaktadır. RRA ısıl işlemi uygulanan numunelerde yüksek çevrim sayısı ve yorulma davranışı sergileyen 120 °C' ta 24 saat yeniden yaşlandırılmış numunenin kırık yüzey görüntüsünde belirgin bir kırılma bölgesi oluşmuştur.

Daha sonra yapılacak çalışmalar için öneriler:

- 1- AA7075 alüminyum alaşımına uygulanan ısıl işlemlere bağlı olarak, mikroyapı içerisinde oluşturulan çökelti partiküllerinin şekli, boyutu ve dağılımı kontrol altında tutularak daha yüksek değerli sertlik ve yorulma dayanımı elde edilebilir.
- 2- Yorulma deneyleri sırasında deneysel numune üzerinde oluşabilecek ısıl etkiler kontrol edilerek yorulma özellikleri üzerindeki etkisi azaltılabilir.
- 3- Yorulma dayanımına etki eden faktörler göz önüne alındığında bu şartların etkileri azaltılabilir ve daha yüksek sertlik değeri ve yorulma dayanımı elde edilir.
- 4- Çökeltilerin daha net incelenmesi için TEM (Geçirgen elektron mikroskobu) incelemeleri yapılabilir.

## KAYNAKLAR

- 1- Er, M., “Yüksek frekanslı, genlik ayarlı eğilme yorulması test cihazı tasarımı ve 1100-H14 alüminyum levhasının eğilme yorulması davranışının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 1-20 (2006).
- 2- Kıratlı, N., Yetgin, H. S. ve İnci, M., “The examination of metallurgical properties of welded 6351 aluminum alloys with inert gas methods”, *Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, (11): 165-168 (2006).
- 3- Sakin, R. ve Er, M., “1100-H14 alüminyum alaşımasının düzlemsel eğme gerilmeli yorulma davranışının incelenmesi”, *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* 25 (2): 213–223, Ankara, (2010).
- 4- Hüseyinoğlu, M. ve Tosun, N., “Effect of minimum quantity coolant on surface roughness in milling of 7075 Al alloy”, *5. Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük, 13-15, (2009).
- 5- Brunelli, K., Dabalà, M. and Martini, C., “Surface hardening of Al 7075 alloy by diffusion treatments of electrolytic Ni coatings”, *La Metallurgia Italiana*, 7–8 (2006).
- 6- Yılmaz, E., “Etial 180 alüminyum alaşımasının işlenmesinde kesici takım geometrisi ve kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğüne etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-3 (2010).
- 7- Kumru, N., “Etial-141, 145 ve 160 tipi döküm alüminyum ile plaka tipi alüminyum malzemeler için yorulma makinası tasarımı ve eğilmeli yorulma davranışlarının incelenmesi”, Doktora tezi, *Celal Bayar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, 1-20 (2007).
- 8- Güteryüz, K. “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alaşımasının mekanik özelliklerine ve aşınma davranışına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük 5-12 (2011).
- 9- Çatal, S., “Alüminyumun yüzeyindeki oksit tabakasının fosforik asit(h<sub>3</sub>po<sub>4</sub>) anodizing yöntemiyle geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, 34-35 (2007).
- 10- Öz, Ö., “Yaşlandırma ısıl işleminin AA7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Z.K.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü* Zonguldak, 22-31 (2007).
- 11- Eker, İ. ve Sevim, İ., “6061 alüminyum alaşımasının sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile kaynak edilebilirliğinin incelenmesi”, *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 15 (2): 137–141 (2009).

- 12- Akça, H., “Tig yöntemiyle kaynak edilen alüminyum ve alaşımlarının mikroyapı ve mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **T.C. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 16-40 (2006).
- 13- Taban, E. ve Kaluç, E. “Alüminyum ve alüminyum alaşımların standart gösterimleri”, **MakinaTek**, 178-185, (2005),
- 14- Dehghani, K., Nekahi, A. and Mirzaie, M. A. M., “Optimizing the bake hardening behavior of Al7075 using response surface methodology”, **Materials and Design** 31: 1768–1775, (2010).
- 15- Jenifer, S. W., Sang, S. K. and Richard, P. G. “Ionic inhibition of environmental fatigue crack growth in 7075-T6”, . **Key Engineering Materials**, 989: 345-346, (2007).
- 16- Yılmaz, B., ”Alüminyum alaşımlarında faz yapılarının mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **T.C. Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü**, Isparta, 20-25 (2002).
- 17- Venugopal, T., Rao, K. S., and Roa, K. P., “Studies on friction stir welded AA7075 aluminum alloy”, **Department of Metallurgical and Materials Engineering, IIT Madras, Chennai, Trans. Indian Inst. Met.**, 57: 6, (2004).
- 18- Cirik, E., “Anodik oksidasyon işleminin 7075-T6 alüminyum alaşımının yorulma davranışına olan etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **T.C. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, 10-20 (2007).
- 19- Kaya, I., “Metalurji ve malzeme müh. Al 7075 alaşımının şekillenme ve ısıtılma işlemle özelliklerinin iyileştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi ,**Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 4-30 (2005).
- 20- Savaşkan, T., “Malzeme bilgisi ve muayenesi”, **K.T.Ü. Makine Müh. Bölümü Malzeme Bilimleri A.B.D**, Trabzon, 355-360 (2004).
- 21- Demir, E., “Alüminyum alaşımlarda ısıtılma işlem etkilerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **T.C. Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İzmir, 23-33 (2008).
- 22- Mitchell, I., “Residual stress reduction during quenching of wrought 7075 aluminum alloy”, Msc. Thesis, **The Faculty Of Worcester Polytechnic Institute**, 5-9 (2004).
- 23- Ay, N., “7075 alüminyum alaşımında RRA ısıtılma işleminin mikroyapıya etkisi ve kinetik analiz”, Doktora Tezi, **İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 33-45 (1989).
- 24- Meyveci, A., “Yaşlandırılmış 2xxx ve 6xxx serisi alüminyum alaşımlarının aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 25-30 (2007).

- 25- Peeler, D., Raizenne, D., Sjöblom, P., Rondeau, R., Kuhlman, S. and Snide, J., "Retrogression and re-aging (RRA) of aluminum 7075-T6 aircraft components", *Tri-Service Corrosion Conference*, 2 (2003).
- 26- Akgün, N., "Effect of retrogression and reaging heat treatment on corrosion fatigue crack growth behavior of AA7050 alloy", The Master Thesis, *The Graduate School Of Natural And Applied Sciences Of Middle East Technical University*, 30-35 (2004).
- 27- Li, J., Peng, Z., Li, C., Jia, Z. Chen, W., and Zheng, Z., "Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075 aluminium alloy with various aging treatments", *Trans. Nonferrous Met. Soc. China* 18: 755-762 (2008).
- 28- Çimenoglu, H. ve Kayalı, "E. Sabri, Malzemelerin yapısı ve mekanik davranışları", *İTÜ Metalürji Müh. Bölümü*, İstanbul, 160-183 (1986).
- 29- Dağ, S., Fıçıcı, F. ve Geniş, K., "İş makinalarında kırılma ve yorulma problemlerinin sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmesi", *Mühendis ve Makine*, 48 (571): 3-4(2007).
- 30- Ün, H., "Malzeme bilgisi ders notları" *Pamukkale Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü*, Denizli, (2007).
- 31- Önal, G. ve Avcı, A., "Yüzey çatlaklı 5086 al-mg alaşımının eksenel yorulma çatlak ilerleme davranışı" *Selçuk Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Teknik-Online* Dergi 8 (3): 144-147 (2009)
- 32- Pektaş, S. H., "Fren mekanizması yorulma testinin FEA metoduyla simülasyonu", Yüksek Lisans Tezi, *Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İzmir, 35-40 (2006)
- 33- Karcı, A., "2024-T3 Al alaşımının tek aşırı yük altında yorulma davranışı", Yüksek Lisans Tezi, *Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Eskişehir 13-20 (2002).
- 34- Askeland, R. D., "Malzeme bilimi ve mühendislik malzemeleri" çeviri: Mehmet ERDOĞAN, *University of Missouri-Rolla*, , 113-117 (1998).
- 35- İnternet: Gazi Üniversitesi, "Mekanik ders notlar", <http://w3.gazi.edu.tr/~agural/Mekanik.doc.>, (2012)
- 36- Gavgalı, M., "Dönen eğmeli yorulma test cihazı tasarımı ve imalatı", Yüksek Lisans Tezi, *T.C. Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya, 23-25 (1989).
- 37- Holt, R.T., Raizenne, M.D. and Wallace, W., DuQuesnay D.L., "RRA heat treatment of large Al 7075-T6 components", *Held in Corfu*, 19-20, (1999).

- 38- Özyürek, D., Yılmaz, R. ve Kibar, E. “RRA işleminde çözeltiye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımının çekme dayanımına etkisi”, *Gazi Üniversitesi. Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi* (Kabul Edildi), (2012).
- 39- Dahn, N. C., Rojan, K. and Wallace, W. “A TEM study of microstructural changes during retrogression and reaging in 7075 aluminum alloys”, *Motor. Trans. A.*, 1843-1850, (1983).

## **ÖZGEÇMİŞ**

Avni FAKIOĞLU: 25.03.1986 tarihinde Mersin-Silifke-Karadedeli Köyü' nde doğdu. İlköğrenimini Karadedeli İlköğretim Okulu' nda tamamladı. Ortaöğrenimini 1. ve 2. Sınıfı Konya Karapınar Duran Sezer Lisesi' nde, 3. Sınıfını Mersin Silifke Atayurt Gazi Çok Programlı Lisesi' de tamamladı. 2005 yılında Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Karabük Teknik Eğitim Fakültesi Metal Eğitimi Bölümü Döküm Öğretmenliği Programı' nı kazandı. 2009 yılında iyi derece ile mezun oldu. 2009 yılı güz döneminde Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümü' nde yüksek lisansına başladı. Halen Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metal Eğitimi Bölümü' nde yüksek lisans eğitimine devam etmektedir.

## **ADRES BİLGİLERİ**

Adres: Karadedeli Mah. M. Fevzi Çakmak Cad. 172. Sok. No:15  
33947 Atayurt/Silifke/MERSİN

Tel: (0543) 688 10 28

E-posta: avnifakioglu@hotmail.com