

T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI

AA2024 VE AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
KESİNTİLİ YAŞLANDIRMA PROSESİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜÇHAN YILDIZ

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2023

**T.C.
PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM
DALI**



**AA2024 VE AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA
KESİNTİLİ YAŞLANDIRMA PROSESİNİN MEKANİK
ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜÇHAN YILDIZ

DENİZLİ, AĞUSTOS - 2023

**Bu tez çalışması PAÜ Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından
2021FEBE067 nolu proje ile desteklenmiştir.**

Bu tezin tasarımı, hazırlanması, yürütülmesi, araştırmalarının yapılması ve bulgularının analizlerinde bilimsel etiğe ve akademik kurallara özenle riayet edildiğini; bu çalışmanın doğrudan birincil ürünü olmayan bulguların, verilerin ve materyallerin bilimsel etiğe uygun olarak kaynak gösterildiğini ve alıntı yapılan çalışmalara atfedildiğine beyan ederim.

RÜÇHAN YILDIZ

ÖZET

AA2024 VE AA7075 ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA KESİNTİLİ YAŞLANDIRMA PROSESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜÇHAN YILDIZ

PAMUKKALE ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
METALURJİ VE MALZEME MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
(TEZ DANIŞMANI: DR. ÖĞR. ÜYESİ ENGİN TAN)

DENİZLİ, TEMMUZ - 2023

Yeni nesil alüminyum alaşımlarının geliştirilmesinde alaşımlandırma önemli bir yere sahiptir. Ancak sadece alaşımlandırma ile başta yüksek spesifik dayanım (dayanım/yoğunluk) olmak üzere amaçlanan tüm gereksinimler sağlanamaz. Bu nedenle alüminyum alaşımları için büyük öneme sahip yaşlandırma ısıt işlemleri uygulanır. Konvansiyonel T6 yaşlandırma işlemi ile yüksek sertlik ve dayanım değerleri elde edilebilir. Fakat bazı uygulamalarda daha yüksek dayanım değerleri ile birlikte süneklik, tokluk gibi değerlerin düşmemesi istenir. Bu açıdan son yıllarda geliştirilen yeni nesil ısıt işlem proseslerinden kesintili yaşlandırma ile özellikle havacılık, otomotiv, savunma gibi endüstrilerin yüksek spesifik dayanım/tokluk optimizasyonu sağlanabilmektedir.

Bu tez çalışmasında; AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarına konvansiyonel T6 ısıt işlemi ile yeni nesil T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma işlemleri farklı parametrelerle uygulanmıştır ve bu işlemlerin alaşımların mekanik ve morfolojik özelliklerine etkileri incelenmiştir. Belirlenen ısıt işlem parametrelerinde gerçekleştirilen yaşlandırma işlemleri sonrası; numunelere çekme, eğme ve aşınma testleri ile sertlik ve yüzey pürüzlülüğü ölçümleri uygulanmıştır. Mekanik özellikler ile mikroyapı arasındaki ilişkiyi karakterize etmek üzere SEM, EDS, XRD ve DSC analizleri gerçekleştirilmiştir.

Çalışmanın sonucunda, yeni nesil kesintili yaşlandırma prosesinin konvansiyonel T6 ısıt işlemine göre alaşımlara dikkat çekici bir şekilde yüksek spesifik dayanım ve şekillenme kabiliyeti (süneklik) özellikleri kazandırdığı belirlenmiştir.

ANAHTAR KELİMELER: AA2024, AA7075, Kesintili yaşlandırma, Spesifik dayanım, Elektron mikroskopisi

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF INTERMEDIATE AGING PROCESS ON MECHANICAL PROPERTIES OF AA2024 AND AA7075 ALUMINUM ALLOYS

MSC THESIS

RÜÇHAN YILDIZ

**PAMUKKALE UNIVERSITY INSTITUTE OF SCIENCE
DEPARTMENT OF METALLURGICAL AND MATERIALS ENGINEERING
(SUPERVISOR:ASST. PROF. DR. ENGİN TAN)**

DENİZLİ, JULY 2023

Alloying has an essential place in the development of new-generation aluminum alloys. However, all the intended requirements, especially high specific strength (strength/density), cannot be achieved with alloying alone. For this reason, aging heat treatment, which is of great importance for aluminum alloys, is applied. High hardness and strength values can be obtained with the conventional T6 aging process. However, in some applications, values such as ductility and toughness are desired to stay the same with higher strength values. In this respect, high specific strength/toughness optimization of industries such as aviation, automotive, and defense can be achieved with interrupted aging, a new generation heat treatment process developed in recent years.

In this thesis study, Conventional T6 heat treatment and new generation T6I4 and T6I6 interrupted aging processes were applied to AA2024 and AA7075 aluminum alloys with different parameters, and their effects on the mechanical and morphological properties of the alloys were investigated. After the aging processes were carried out in the determined heat treatment parameters, tensile, bending, wear tests, hardness and surface roughness measurements were applied to the samples. SEM, EDS, XRD and DSC analyses were performed to characterize the relationship between mechanical properties and microstructure.

As a result of the study, it was determined that the new generation interrupted aging process gave the alloys remarkably high specific strength and formability (ductility) properties compared to the conventional T6 heat treatment.

KEYWORDS: AA2024, AA7075, Interrupted aging, Specific strength, Electron microscopy

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	i
ABSTRACT	ii
İÇİNDEKİLER	iii
TABLO LİSTESİ	x
ÖNSÖZ.....	xii
1. GİRİŞ.....	1
2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI	3
2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.....	10
2.1.1 AA2024 alüminyum alaşımları.....	17
2.1.2 AA7075 Serisi Alüminyum Alaşımları	18
2.2 Alaşım elementlerinin alüminyuma etkileri	21
2.3 Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler.....	23
2.3.1 T6 ısıt işlemi	26
2.3.2 Yeni nesil ısıt işlem (kesintili yaşlandırma)	35
3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	46
3.1 Kullanılan Alüminyum Alaşımları	46
3.2 Çalışmada Uygulanan Deney Akış Planı	47
3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması	48
3.3.1 Çekme ve Üç Nokta Eğme Deney Numunelerinin Hazırlanması.....	48
3.3.2 Aşınma Deney Numunelerinin Hazırlanması	50
3.3.3 Deney Numunelerinin Yerleştirildiği Platformun Tasarımı	52
3.4 Isıt İşlemler.....	53
3.4.1 Homojenleştirme ve T6 Isıt İşlemi Optimizasyonu	54
3.4.2 Kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6)	56
3.5 Karakterizasyon.....	61
3.5.1 Metalografi ve mikroskopi.....	61
3.5.2 SEM ve EDS analizi	63
3.5.3 DSC analizi	65
3.5.4 XRD analizi	66
3.6 Mekanik Testler.....	68
3.6.1 Sertlik Deneyi	68
3.6.2 Çekme deneyi	69
3.6.3 Üç nokta eğme deneyi.....	71
3.6.4 Pin-on disk aşınma deneyi	74
3.6.4.1 Yüzey pürüzlülüğü	76
4. BULGULAR	78
4.1 Mekanik deneylerin sonuçları	78
4.1.1 T6 optimizasyon, T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sertlik sonuçları.....	78
4.1.2 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası yapılan çekme sonuçları	89

4.1.3	T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası yapılan üç nokta eğme sonuçları.....	98
4.1.4	T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası yapılan aşınma deneyi sonuçları.....	101
4.1.4.1	T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası yapılan yüzey pürüzlülüğü sonuçları	113
4.2	Karakterizasyon sonuçları	118
4.2.1	T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası mikroskopi sonuçları	118
4.2.2	T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası SEM ve EDS sonuçları	120
4.2.3	T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası DSC analizi sonuçları	134
4.2.4	T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası XRD analizi sonuçları.....	138
5.	SONUÇLAR VE TARTIŞMA	141
6.	KAYNAKLAR.....	145
7.	ÖZGEÇMİŞ.....	162

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	: Al alaşımlarının ve bazı malzemelerin spesifik dayanım/uzama oranı eğrisi (Yıldırım 2006).	8
Şekil 2.2	: Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Beneddyk 2010) (Liu 2010).	12
Şekil 2.3	: Ω fazının plakaları, bir Al-Cu-Mg-Ag alaşımında $\{111\}\alpha$ düzlemlerinde çökelmiştir (Polmear 2017)	18
Şekil 2.4	: 115 °C’de 7 saat hemen ardından 165 °C’de 16 saat yaşlandırma işlemi uygulanan AA7075 alüminyum alaşımlarının TEM görüntüsü (Zhihui ve diğ. 2007).....	20
Şekil 2.5	: 0.3 Mn içeren Al-Zn-Mg alaşımında Al_6Mn ’nin mikron altı parçacıklarının oluşumunu gösteren transmisyon elektron mikroyapıları. Külçeler 24 saat 500 °C sıcaklıkta homojenize edilmiştir. (A) hızlı ısıtma hızında (500 °C/h) ve (B) yavaş ısıtma hızı (5°C/h).....	26
Şekil 2.6	: Yaşlandırma ısıtma işlemi kademeleri.....	27
Şekil 2.7	: Çözeltili alma işlemi için örnek bir alaşım diyagramı (Tan 2011).	28
Şekil 2.8	: Tek fazlı α bölgesinden oda sıcaklığına yavaş soğutma sonucu β fazlarının ayrılarak çökelti oluşturmaları (sol), Su verme işlemi ile aşırı doymuş α yapısının elde edilmesi (sağ) (Tan 2011).	29
Şekil 2.9	: Yaşlanma işlemi sonrası aşırı doymuş α fazından β fazının çökmesi.....	30
Şekil 2.10	: Yaşlandırma işleminde çökeltilerde meydana gelen oluşumlar; a) aşırı doymuş katı çözeltili, b) matrisle uyumlu katı çökelti ve c) matrisle uyumsuz kararlı çökelti durumu (Meyveci 2007).	32
Şekil 2.11	: % 4 bakır içeren alüminyum alaşımlarının akma dayanımındaki değişim (Tekin 2014).	33
Şekil 2.12	: Yaşlandırılmış ikili Al-Cu alaşımlarında çökelebilen (A) GP bölgelerinin, (B) θ'' , (C) θ' ve (D) θ (Al_2Cu) kristal yapılarını gösteren modeller. Açık toplar bakır atomlarını ve daha koyu toplar alüminyum atomlarını temsil etmektedir (Lumley 2011)....	34
Şekil 2.13	: TEM ile çökeltilerin görüntüsü, (a) GP Bölgeleri, (b) θ'' oluşumu, (c) θ' oluşumu, (d) θ oluşumu (Porter ve Easterling 2009).	35
Şekil 2.14	: Kesintili (ikincil) yaşlandırma ısıtma işleminin uygulanması (Baksan 2020)	37
Şekil 2.15	: T6I4 sürecinde yaşlanmanın iki aşamasında Al-4Cu’da meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin modeli (Lumley 2005)	40
Şekil 2.16	: Al-Cu-Mg alaşımı AA2014 için kesintili yaşlanma sertlik eğrileri ve mikroyapılar. (T6I6 mikro yapısı, bir T6 tavından sonra mevcut olandan %75 daha fazla S fazı çubuğu içerir) (Lumley ve Morton 2004).	41

Şekil 3.1	: Deney akış planı.....	47
Şekil 3.2	: Standarda göre belirlenen çekme numunesi ölçüleri	48
Şekil 3.3	: Standarda göre belirlenen üç nokta eğme numunesi ölçüleri	49
Şekil 3.4	: Levha üzerinden çekme ve üç nokta eğme numunelerinin çıkarılması	49
Şekil 3.5	: Çalışmada kullanılan aşınma deney numunesi boyutları.....	50
Şekil 3.6	: Aşınma numunesi hazırlanmasında kullanılan universal torna tezgâhı ve hassas kesme cihazı.....	51
Şekil 3.7	: Çubuk alüminyum alaşımları ve aşınma numuneleri.....	51
Şekil 3.8	: Hazırlanan AA2024 (sol) deney numuneleri, AA7075 (sağ) deney numuneleri	52
Şekil 3.9	: Numunelerin yerleştirileceği aparat.....	52
Şekil 3.10	: Numunelerin yerleştirildiği platform sistemi.....	53
Şekil 3.11	: Tasarlanan platforma deney numunelerinin yerleştirilmiş hali ...	53
Şekil 3.12	: T6 ısıtma işlem optimizasyonu çalışmasının yapıldığı ısıtma fırını.....	55
Şekil 3.13	: Mikro Vickers sertlik cihazı	55
Şekil 3.14	: AA2024 alaşımına ait uygulanan ısıtma işlem grafiği.....	58
Şekil 3.15	: AA7075 alaşımına ait uygulanan ısıtma işlem grafiği	58
Şekil 3.16	: T6I4 ısıtma işleminin AA2024 ve AA7075 alaşımlarına uygulanması	59
Şekil 3.17	: AA2024 alaşımın T6I6 ısıtma işleminin uygulanması ve deney numuneleri.....	60
Şekil 3.18	: AA7075 alaşımın T6I6 ısıtma işleminin uygulanması ve deney numuneleri.....	60
Şekil 3.19	: Deney numunelerinin soğutulması ve kodlanması	61
Şekil 3.20	: Metalografik işlem basamakları. a) hassas kesme, b) bakelite alma, c) zımparalama-parlatma	62
Şekil 3.21	: Parlatılmış numuneler ve dağlama işlemi	62
Şekil 3.22	: Optik mikroskop ve numunelerin görüntüsünün alınması.....	63
Şekil 3.23	: Deney numunelerinin analizinde kullanılan SEM cihazı.....	64
Şekil 3.24	: Seçilen üç nokta eğme SEM-EDS numuneleri	65
Şekil 3.25	: Seçilen çekme ve aşınma SEM numuneleri.....	65
Şekil 3.26	: DSC deney numuneleri	66
Şekil 3.27	: Çalışmada kullanılan DSC cihazı	66
Şekil 3.28	: XRD deney numuneleri	67
Şekil 3.29	: Çalışmada kullanılan XRD cihazı.....	67
Şekil 3.30	: Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro Vickers cihazı.....	68
Şekil 3.31	: Deney numunelerinden sertlik ölçümleri alınan bölgeler.....	69
Şekil 3.32	: Çekme numunesinde ilk ölçü boyunun işaretlenmesi.....	70
Şekil 3.33	: Universal test cihazı ve çekme numunesinin bağlanması.....	70
Şekil 3.34	: Çekme testi öncesi ve sonrası numunelerin durumları	71
Şekil 3.35	: Çekme deneyi sonrası kopan numune ve son ölçü boyunun ölçülmesi	71
Şekil 3.36	: Universal üç nokta eğme deney cihazı ve numunenin durumu ...	72
Şekil 3.37	: Üç nokta eğme deney düzeneği	73
Şekil 3.38	: Üç nokta eğme öncesi ve sonrası numunelerin halleri.....	74
Şekil 3.39	: Aşınma deney numuneleri	75
Şekil 3.40	: Pin-on disk aşınma test cihazı.....	75
Şekil 3.41	: Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı	77

Şekil 4.1	: AA2024 alaşımına uygulanan T6 ısıt işleml sonrası sertlik değışimi	80
Şekil 4.2	: AA7075 alaşımına uygulanan T6 ısıt işleml sonrası sertlik değışimi	81
Şekil 4.3	: AA2024 alaşımına uygulanan T6I4 ısıt işleml sonrası sertlik değışimi	82
Şekil 4.4	: AA7075 alaşımına uygulanan T6I4 ısıt işleml sonrası sertlik değışimi	83
Şekil 4.5	: AA2024 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işleml sonrası sertlik değışimi	86
Şekil 4.6	: AA7075 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işleml sonrası sertlik değışimi	87
Şekil 4.7	: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası çekme dayanımı değışimi	89
Şekil 4.8	: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası akma dayanımı değışimi	90
Şekil 4.9	: AA2024 alaşımına ait T0, T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası kopma uzaması değışimi	90
Şekil 4.10	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası çekme dayanımı değışimi	91
Şekil 4.11	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası akma dayanımı değışimi	92
Şekil 4.12	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası kopma uzaması değışimi	93
Şekil 4.13	: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası çekme dayanımı değışimi	95
Şekil 4.14	: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası akma dayanımı değışimi	95
Şekil 4.15	: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası kopma uzaması değışimi	96
Şekil 4.16	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası çekme dayanımı değışimi	96
Şekil 4.17	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası akma dayanımı değışimi	97
Şekil 4.18	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası kopma uzaması değışimi	97
Şekil 4.19	: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası maksimum eğilme dayanımı değışimi	99
Şekil 4.20	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işleml sonrası maksimum eğilme dayanımı değışimi	99
Şekil 4.21	: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası maksimum eğilme dayanımı değışimi	100
Şekil 4.22	: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işleml sonrası maksimum eğilme dayanımı değışimi	100
Şekil 4.23	: AA2024 T6I4 işlemline göre kayma mesafesine bağı hacim kaybı oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	102
Şekil 4.24	: AA7075 T6I4 işlemline göre kayma mesafesine bağı hacim kaybı oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	103

Şekil 4.25 : AA2024 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı hacim kaybı oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	104
Şekil 4.26 : AA7075 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı hacim kaybı oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	105
Şekil 4.27 : AA2024 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı aşınma oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	107
Şekil 4.28 : AA2024 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı aşınma oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	108
Şekil 4.29 : AA7075 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı aşınma oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	109
Şekil 4.30 : AA7075 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı aşınma oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000	110
Şekil 4.31 : AA2024 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı.....	111
Şekil 4.32 : AA7075 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı.....	111
Şekil 4.33 : AA2024 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı.....	112
Şekil 4.34 : AA7075 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı.....	113
Şekil 4.35 : AA2024 T6I4 ısıtma işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000.....	114
Şekil 4.36 : AA7075 T6I4 ısıtma işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000.....	115
Şekil 4.37 : AA2024 T6I6 ısıtma işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000.....	116
Şekil 4.38 : AA7075 T6I6 ısıtma işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000.....	117
Şekil 4.39 : AA2024 alaşımına ait mikro yapı görüntüleri. a)T0, b)T6, c)T6I4-800, d)T6I6-600	118
Şekil 4.40 : AA7075 alaşımına ait mikro yapı görüntüleri. a)T0, b)T6, c)T6I4-800, d)T6I6-600	119
Şekil 4.41 : AA2024 T0 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	121
Şekil 4.42 : AA2024 T6 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	121
Şekil 4.43 : AA2024 T6I4-800 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	122
Şekil 4.44 : AA2024 T6I6-600 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	123

Şekil 4.45	: AA7075 T0 alaşıminın çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	123
Şekil 4.46	: AA7075 T6 alaşıminın çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	124
Şekil 4.47	: AA7075 T6I4-700 alaşıminın çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	125
Şekil 4.48	: AA7075 T6I6-500 alaşıminın çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	125
Şekil 4.49	: AA2024 T6I4-800 alaşıminın üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	126
Şekil 4.50	: AA2024 T6I6-600 alaşıminın üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	126
Şekil 4.51	: AA7075 T6I4-700 alaşıminın üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	127
Şekil 4.52	: AA7075 T6I6-500 alaşıminın üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	127
Şekil 4.53	: AA2024 T0 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü.....	130
Şekil 4.54	: AA2024 T6 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	130
Şekil 4.55	: AA2024 T6I4-800 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü.....	131
Şekil 4.56	: AA2024 T6I6-600 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü.....	131
Şekil 4.57	: AA7075 T0 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü.....	132
Şekil 4.58	: AA7075 T6 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi.....	132
Şekil 4.59	: AA7075 T6I4-700 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü.....	133
Şekil 4.60	: AA7075 T6I6-500 alaşıminın aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü.....	133
Şekil 4.61	: AA2024-T6 alaşımına ait DSC grafiği	135
Şekil 4.62	: AA2024 T6I4-800 alaşımına ait DSC grafiği.....	135
Şekil 4.63	: AA2024 T6I6-600 alaşımına ait DSC grafiği.....	136
Şekil 4.64	: AA7075-T6 alaşımına ait DSC grafiği	136
Şekil 4.65	: AA7075 T6I4-700 alaşımına ait DSC grafiği.....	137
Şekil 4.66	: AA7075 T6I6-500 alaşımına ait DSC grafiği.....	137
Şekil 4.67	: AA2024 alaşıminın T6, T6I4-800 ve T6I6-600 numunelerin XRD grafiği.....	139
Şekil 4.68	: AA7075 alaşıminın T6, T6I4-700 ve T6I6-500 numunelerin XRD grafiği.....	140

TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 2.1	: Saf alüminyumun özellikleri (Al Saadi ve Tunay 2017).	4
Tablo 2.2	: Saf alüminyumun mekanik özellikleri (Atkaya 2021).	4
Tablo 2.3	: Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Eren 2017).	11
Tablo 2.4	: Bazı döküm alaşımlarının çekme dayanımları (Davis 2001).	12
Tablo 2.5	: Dövme alüminyum alaşımlarının özellikleri (Davis 2001).	13
Tablo 2.6	: Dövme alüminyum alaşımlarına ait üstün özellikler, kullanım alanları ve uygun tav koşullarındaki bileşikler	14
Tablo 2.7	: AA7075 alaşımının kimyasal bileşimi (Seykoç 2023)	20
Tablo 2.8	: Bazı alaşım elementlerinin ötektik katılma ve oda sıcaklığında alüminyum içerisindeki çözünürlükleri (Durmuş ve diğ. 2009)	21
Tablo 2.9	: Alüminyuma uygulanan ısıtıl işlem temperleri (Güler, 2003).	25
Tablo 2.10	: Alüminyuma uygulanan ısıtıl işlem temperleri (Lumley, 2004)	37
Tablo 2.11	: Kesintili yaşlandırmanın alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri (Polmear 2017)	39
Tablo 3.1	: Temin edilen alaşımların boyut, şekil ve temper sınıfları	46
Tablo 3.2	: Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri (%)	46
Tablo 3.3	: T6 ısıtıl işlem optimizasyon sıcaklık-süre parametreleri	54
Tablo 3.4	: Isıtıl işlem parametrelerine bağılı olarak numune sayıları	57
Tablo 3.5	: SEM ve EDS analizi için seçilen numuneler	64
Tablo 4.1	: Optimizasyon işlemi için yapılan deneyler-1	78
Tablo 4.2	: Optimizasyon işlemi için yapılan deneyler-2	79
Tablo 4.3	: Optimizasyon işlemi için yapılan deneyler-3	79
Tablo 4.4	: Kesintili yaşlandırmanın AA2024 ve AA7075 alaşımlarının sertliği üzerindeki etkisi	88
Tablo 4.5	: Kesintili yaşlandırmanın AA2024 ve AA7075 alaşımlarındaki çekme özelliklerine etkisi.....	98

SEMBOLLER VE KISALTMALAR

Al_2O_3 : Alüminyum Oksit

DSC : Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (Differential Scanning Calorimetry)

EDS : Enerji Dağılımlı Spektrometre (Energy Dispersive Spectrometry)

HCl : Hidroklorik Asit

HF : Hidroflorik Asit

I : Kesintili (Interrupted)

HNO_3 : Nitrik Asit

NMR : Nükleer Manyetik Rezonans

PFZ : Çökeltisiz Bölge (Precipitated Free Zone)

SAD : Seçilmiş Alan Difraktometresi (Selected Area Diffractometer)

SCC : Gerilme-Korozyon Çatlaması (Stress-Corrosion Cracking)

SEM : Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscopy)

TEM : Geçirimli Elektron Mikroskobu (Transmission Electron Microscopy)

TUA : Türkiye Uzay Ajansı

XRD : X-ışını Kırınım Analizi (X-Ray Diffraction Analysis)

YMK : Yüzey Merkezli Kübik

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasının konusunun belirlenmesinde, gerçekleştirilmesinde ve her aşamasında bana destek olan, bilgi ve deneyimleri ile yol gösteren, lisans ve yüksek lisans dönemlerinde teknik ve laboratuvar uygulamalarında gerekli bilgileri edinmemde büyük katkısı olan tez danışmanım, değerli hocam Sayın Dr. Öğr. Üyesi Engin TAN'a sonsuz teşekkür ederim.

Çalışmanın deneysel kısımlarının, özellikle aşınma deneylerinin gerçekleştirilmesinde ve sonuçların yorumlanmasında katkılarını aldığım kıymetli hocam Sayın Doç. Dr. İsmail OVALI'ya teşekkür ederim.

DSC ve XRD analizlerinin gerçekleştirilmesinde ve çalışmanın sonuçlarının yorumlanmasında katkılarını aldığım değerli hocam Sayın Dr. Derya DIŞPINAR'a teşekkür ederim.

2021FEBE067 numaralı Yüksek Lisans Tez Projesi ile çalışmanın finansal desteğini sağlayan Pamukkale Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Koordinatörlüğü'ne teşekkür ederim.

Eğitimimin her aşamasında desteklerini esirgemeyen aileme teşekkür ederim.

1. GİRİŞ

Mühendislik alanında çelik ve dökme demirden sonra en fazla kullanılan malzemelerden biri alüminyumdur. Alüminyum alaşımları, düşük yoğunlukları ve yüksek mekanik özellikleri nedeniyle otomotiv, havacılık ve savunma sanayi gibi birçok önemli imalat sektöründe giderek daha fazla kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının önemli bir diğer özelliği de mekanik özelliklerinin geliştirilebilir olmasıdır. Bu özellik, alaşımların farklı kullanım alanları için uygun hale getirilmesinde önemli bir faktördür. Çeşitli ısı işlemleri uygulayarak alaşımların dayanımı ve sertliği gibi özellikleri artırılabilir. Ancak, doğru ısı işlem yöntemlerinin uygulanması, alaşımların mekanik özelliklerinin başarılı bir şekilde geliştirilebilmesi için önemlidir.

Alüminyum alaşımlarının dayanımının artırılmasında yaşlandırma (çökelme) sertleştirme ısı işlemi ile yapı içinde ikincil fazların oluşturulması en yaygın kullanılan yöntemdir. Bu işlem, alaşımın tek faz bölgesine ısıtılmasını ve ikincil fazların çözünmesini, ardından hızlı soğutma ile aşırı doymuş matrisin oluşmasını ifade eder. Son olarak doğal veya yapay olarak farklı sıcaklık ve sürelerde matris içerisinde homojen çökelmiş fazlar elde edilir.

Tek aşamalı yaşlandırma işleminde yüksek özellikler geliştirmek için sıcaklık ve süre optimizasyonu gerçekleştirilmelidir. Fakat bazı durumlarda korozyon direnci, sertlik ve aşınma dayanımı, çekme ve akma dayanımı artışının yanı sıra tokluk ve uzama değerlerinde de artış istenir. Bu ters özellikleri bir arada elde edebilmek için klasik T6 yaşlandırma işleminin ardından daha düşük sıcaklıklarda çok daha uzun sürelerde ikincil bir yaşlandırma işleminin uygulanması gerekir. Bu işlem “kesintili yaşlandırma” olarak bilinir. Kesintili yaşlandırma, düşük sıcaklıklarda uzun sürelerde ve ardından yüksek sıcaklıklarda bir veya iki periyodu içerebilir. Konvansiyonel yaşlandırma işlemlerine alternatif olarak geliştirilen kesintili yaşlandırma prosesi ile mikro yapıdaki matris fazların ve ikincil çökeltilerin daha sık ve düzenli olmasıyla çökelti boyutlarına, dağılımına ve oranına bağlı olarak mekanik özelliklerde iyileşmeler sağlanmaktadır.

Bu tez çalışmasında, literatürdeki temper sınıflandırmaları ile uyumlu olarak, bununla birlikte süre ve sıcaklık parametreleri optimize edilerek, endüstride yaygın olarak kullanım alanı olan AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının konvansiyonel T6 ısıt işleme alternatif olan yeni nesil kesintili yaşlandırma prosesiyle sertlik ve aşınma, eğme, çekme-akma dayanımlarının yanında kopma uzaması, tokluk gibi zıt özelliklerin de artırılması amaçlanmıştır.

Bölüm 2’de alüminyum alaşımlarının genel kullanım alanları ve sınıflandırılması ile alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler hakkında literatür verileriyle birlikte bilgiler verilmiştir.

Bölüm 3’te, tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalara yer verilmiştir. Çalışmalar kapsamında, ticari olarak temin edilen AA2024 ve AA7075 alaşımlarına konvansiyonel T6 ısıt işlemi ve yeni nesil T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma ısıt işlemleri uygulanmıştır. Isıt işlemler öncesi ve sonrası sertlik, çekme, üç nokta eğme, aşınma testleri uygulanmış ve SEM-EDS, DSC, XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

Bölüm 4’te gerçekleştirilen deneysel çalışmaların bulguları sunulmuştur. Isıt işlemler öncesi ve sonrası gerçekleştirilen mekanik testler ve karakterizasyon analizlerinin sonuçları verilmiştir.

Bölüm 5’te deneysel çalışmaların bulguları mevcut literatür çalışmaları ile kıyaslanıp yorumlanarak bulguların literatüre sağlayacağı katkılardan bahsedilmiştir. Bu bölümde tez çalışmasının genel sonuçları verilerek, tez çalışması sonrasında yapılabilecek çalışmalar hakkında öneriler sunulmuştur.

2. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARI

Yerkabuğunda, oksijen ve silisyumdan sonra en sık rastlanan üçüncü element olan alüminyum, periyodik tablonun 3A grubunda yer almaktadır ve doğada % 7.5 - 8.1 oranında bulunmaktadır. Hafif bir metal olan alüminyum, gümüş beyazı renkte ve yoğunluğu (özkütlesi) 2.70 g/cm^3 ile çelik ve bakırın üçte biri civarındadır (Eroğlu ve Şahiner 2018). Alüminyum atomu, 13 proton ve elektron içerir ve çekirdekte 14 nötron ile birlikte bulunur. Yörüngede bulunan elektronların çekme kuvvetleri yüksek olduğunda dolayı, gümüşe benzer renge sahip, yanıcı olmayan ayrıca dövülebilir özelliklere sahiptir. Kristal yapısı, yüzey merkezli kübik (YMK) yapıdadır. Ayrıca alüminyum zehirli değildir ve manyetik özellik göstermez. Ayrıca kıvılcım çıkarmaz (Car 2011).

Alüminyum metalinin endüstriyel üretimi, 1886 yılında Paul Louis Toussaint Hèroult ve Charles Martin Hall tarafından habersiz şekilde olarak geliştirilen teknolojilerle mümkün hale gelmiştir. Bu iki bilim adamının adıyla anılan Hall-Hèroult işlemi, alüminyumun cevherden elde edilmesinde dünya genelinde kullanılan en temel yöntemdir (Tang ve diğ. 2012). Alüminyum endüstrisi, K. J. Bayer'in boksit cevherinden alüminyum oksit elde etmek için geliştirdiği Bayer Prosesi ile hızlı bir şekilde genişlemiştir. Bugün, dünya çapında yapılan tüm birincil alüminyum üretimi, elektriksel elektroliz yöntemi ile gerçekleştirilir. (Car 2011) (Muskita 2023).

Ülkemizde önemli ve büyük bir paya sahip olan alüminyum sektörü 2020 yılı içerisinde 882 bin ton ihracat gerçekleştirilmiş olup bu ihracat 2,94 milyar dolar değerindedir ve gerçekleştirilen ihracatın % 58 gibi büyük bir bölümü AB ülkelerine gerçekleştirilmiştir. Yine AB ülkelerine çubuk-profil, levha-şerit, inşaat aksamı gibi alüminyum yapıları % 50 gibi ciddi bir oranda ihracat gerçekleştirilmiştir. Alüminyum sektörü son yıllarda -ki özellikle son 10 yılda- alüminyum ve alaşımlarının hava ve uzay sanayi ve savunma sanayi gibi üst düzey alanlarda kullanımının artmasıyla % 10 oranında gelişerek, demir dışı metaller ihracatında en başta bulunmaktadır (TALSAD 2020) (MSB 2021).

Alüminyumun hafifliği en önemli özelliklerindendir. Alüminyum, demirin yaklaşık 3/1'i kadar yoğunluğa sahiptir. Alaşım elementleriyle güçlendirme ve yaşlandırma (çözelti) ısıtılı işlemleriyle alüminyum yapı çeliklerine benzer dayanıma

sahip hale getirilebilir. Bu işlemler ile çeşitli alüminyum alaşımlarının spesifik dayanımı (dayanım/yoğunluk) çoğu yapı çeliklerinin yaklaşık olarak üç katına çıkabilir. Bu nedenle, hafiflik ve dayanımın kritik olduğu çeşitli taşıtlar üretimi için alüminyum alaşımları oldukça uygun bir seçenektir. Alüminyumun bir diğer önemli özelliği ise, atmosfer ortamında yüzeyde oksit tabakası oluşur ve bu tabaka ile korozyon dayanımı üst seviyelerdedir. Bu oksit tabakası, alüminyumun altında koruyucu bir bariyer oluşturur ve metalin daha derinlemesine korozyona uğramasını engeller. Bu da alüminyumun uzun ömürlü ve dayanıklı bir malzeme olmasını sağlar (Onaran, 2003).

Saf alüminyumun çekme dayanımı 70-140 MPa civarında iken, alaşım elementleri ilavesi ve çeşitli ısı işlemleriyle 700 MPa gibi çok daha yüksek çekme dayanımı değerlerine ulaşılabilir. Bazı alüminyum alaşım türlerinin akma dayanımı değerleri 500 MPa'nın üzerindedir. Alüminyum kolaylıkla dövülebilir, işlenebilir, dökülebilir ve yüksek elektrik ve ısı iletim özelliklerine sahiptir. Alüminyumun saflığı arttıkça korozyon direnci ve iletkenlik özellikleri artar. Bu değer, farklı sayıda birçok çeliğin akma dayanımının üzerindedir. Alüminyum alaşımları bu özellikleri nedeniyle özellikle hafif olması gereken uygulamalarda sıkça kullanılmaktadır (Kurt ve diğ 2008). Saf alüminyumun özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir.

Tablo 2.1: Saf alüminyumun özellikleri (Al Saadi ve Tunay 2017)

Özellik	Değer
Kristal yapı	YMK
Ergime noktası (°C)	660
Direnç (20 °C $\mu\Omega\text{cm}$)	2,69
Yoğunluk (g/cm^3)	2,6898
Poisson oranı	0,34

Alüminyumun saf hali yumuşak ve oldukça dayanıksızdır, bu nedenle kullanım alanı sınırlıdır. Saf alüminyumun mekanik özellikleri Tablo 2.2'de gösterilmiştir.

Tablo 2.2: Saf alüminyumun mekanik özellikleri (Atkaya 2021)

Elastiklik modülü (kN/mm^2)	Çekme dayanımı (MPa)	Akma dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Kopma büzülmesi (%)	Sertlik (HB)
65-70	70-140	20-30	30-50	80-95	5-15

Alüminyum ve alaşımları, diğer mühendislik alaşımlarıyla karşılaştırıldığında kendine özgü üstün özelliklere sahiptir. Bu özelliklerden bazıları kolay şekillendirilebilirlik, yüksek yüzey kalitesi, mükemmel korozyon dayanımı, istikrarlı fiziksel ve mekanik özellikler, dekoratif kullanıma uygun parlaklık, hafiflik ve birim kütle başına yüksek dayanım gibi faktörlerdir. Ayrıca alaşımlama işlemiyle yoğunluğunda önemli bir artış olmamasına rağmen dayanımı önemli ölçüde artabilir. Bu, alüminyumun uçak ve otomotiv endüstrilerinde stratejik bir metal haline gelmesini sağlayan bir spesifik dayanım avantajı sağlar. Aynı zamanda inşaat sektöründe de tercih edilirler, çünkü kolayca şekillendirilebilirler ve yüksek dayanım sunarlar. Alüminyumun korozyon direnci, dayanıklılığı ve estetik görünümü, dekoratif kullanım alanlarında da popülerliğini artırmaktadır. Ayrıca ambalaj endüstrisinde, gıda ve içecek ürünlerinin korunması için tercih edilen hafif ve hijyenik bir malzeme olarak da kullanılırlar. Alüminyum ve alaşımlarının özellikleri, mühendislik uygulamalarında tercih edilen önemli bir malzeme yapmaktadır. Sürekli olarak yapılan ARGE çalışmaları, alüminyumun performansını daha da artırarak daha geniş kullanım alanlarına olanak sağlamaktadır (Güleryüz 2011). Alüminyumun ve alaşımlarının mühendislik uygulamalarında kullanılmasında büyük role sahip olan özellikler şu şekilde sıralanabilir (Onat 2011) (Uludağ 2016) (Başer 2012).

Alüminyum, mükemmel ısı ve elektrik iletimi sağlayabilen bir metaldir. Ticari olarak kullanılan alüminyumun elektrik iletkenliği yaklaşık olarak 37 siemens'tir. % 99,99 saflıktaki alüminyumun elektrik iletkenliği ise bakırın % 65,45'ine denk gelir. Aynı ağırlıktaki bakır tel ile karşılaştırıldığında, alüminyum tel iki kat daha fazla elektrik iletebilir. Örneğin, 10 mm çaptaki bir alüminyum tel, 6 mm çapındaki bir bakır tele eşit elektrik direncine sahiptir, ancak alüminyum tel daha hafiftir. Bu özellik, enerji hatlarında, otomotiv endüstrisinde, radyatör ve klimalarda kullanımında önemli bir avantaj sağlar. Bu fark, reküperatörler, evaporatörler, elektrikli ısıtıcılar ve özellikle otomotiv endüstrisinde silindir kafası ve radyatörler gibi alanlarda kullanımını artırmaktadır (Gedik 2008). Isıl iletkenlik, alüminyum metalinin ısı iletimi yeteneği oldukça yüksektir. Isı iletkenliği, demire kıyasla yaklaşık dört kat daha yüksek olan 80-230 W/mK aralığında bulunur. % 99,99 saflıktaki alüminyumun 0-100 °C arasındaki ısı iletkenliği, temperlenmiş bakırın % 61,9'una denk gelir. Alüminyumun düşük yoğunluğu sayesinde kütleli olarak bakırdan yaklaşık iki kat daha fazla ısı iletebilir. Ayrıca, alüminyumun ısı iletkenliği çeliğin yaklaşık üç katıdır.

Alüminyumun sahip olduğu ısı iletkenlik ve mükemmel şekillendirilebilirlik özellikleri, ısı eşanjörleri gibi hem soğutma hem de ısıtma sistemleri için alüminyumunu uygun bir mazleme haline getirir. Alüminyum aynı zamanda zehirleyici olmayan bir madde olduğu için yaygın bir şekilde yemek pişirme kapları ve mutfak eşyaları için kullanılır (Aalco Metals 2019).

Alüminyum, doğal olarak atmosferde oksijenle reaksiyona girerek yaklaşık 10 Å kalınlığında ince tabaka olan Al_2O_3 (alüminyum oksit) ile kaplanır. Bu oksit film tabakası, alüminyuma korozyon direnci sağlar. Alüminyum, diğer birçok metale göre daha yüksek bir korozyon direncine sahiptir, bu da oksit film tabakasının sağladığı koruma sayesinde. Bu özellik, alüminyumun kullanım alanını genişletmiştir. Oksijenin bulunduğu atmosferde, oksit film tabakası her zaman alüminyum yüzeyinde oluşur. Ayrıca, alüminyum boyanabilir veya eloksal işlemine tabi tutulabilirse korozyon direnci daha da artırılabilir (Kayapa 2015) (Gedik 2008).

Alüminyum, kristal kafes yapısı olan yüzey merkezli kübik bir yapıya sahiptir. Bu YMK kafes yapısı sayesinde alüminyum kolaylıkla şekillendirilebilir. Alüminyum, bakır, gümüş ve altın gibi metaller gibi yüzey merkezli kübik bir kristal yapıya sahiptir. Bu özellik birçok duktild metal için geçerlidir. Atomların bir küpün köşelerini oluşturduğu ve küpün her yüzünde bir atomun bulunduğu bir yapıdır. Alüminyum, döküm, dövme, haddeleme, kesme, eğme ve ekstrüzyon gibi işlemlerle kolayca şekillendirilebilir. Ayrıca, 0,007 mm'ye kadar ince folyolar üretilebilir ve gıda sektöründe kullanılabilir (Ölmez 2016).

Kırılma anında kalıcı uzama miktarı, bir metalin sünekliği hakkında önemli bir göstergedir. Dövme alüminyum alaşımlarında uzama miktarı yaklaşık olarak % 35 seviyesindedir. Ancak tamamen sertleştirilmiş malzemelerde bu değer % 3'e kadar düşebilir. Isıl işlem görmüş alaşımların uzama değerleri ise genellikle % 5 ile % 20 arasında değişir. Bu uzama değerleri, alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilirlik ve süneklik özelliklerini yansıtır (Yıldırım 2006).

Alüminyum, geri dönüştürülebilir bir malzemedir ve diğer metallerle kıyaslandığında daha az enerji kullanılarak % 100 oranında geri dönüştürülebilir. İşlenmemiş alüminyum ile geri dönüştürülmüş alüminyum arasında herhangi bir fark bulunmaz. Bu özelliği sayesinde alüminyum, ekonomik ve çevre dostu bir malzeme

olarak değerlendirilir. Alüminyumun geri dönüştürülmesi, kaynakların verimli kullanımını ve atık miktarını azaltır. Bu nedenle alüminyum, sürdürülebilirlik açısından önemli bir seçenektir.

Alüminyum plakalarının pürüzsüz yüzeyleri, radyo dalgaları, görünür ışık ve mikrodalgalar gibi dalgaları çok iyi yansıtır. Görünür ışıkların % 80'ini ve ısı dalgalarının % 90'ını geri yansıtır. Bu yüksek yansıtma ve düşük emisyon özelliği, alüminyumun yaz aylarında güneş ışınlarından koruyucu bir yalıtım malzemesi olarak ideal olmasını sağlar. Aynı şekilde, kış aylarında da ısı kaybını azaltan bir yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir. Alüminyumun yansıtma özelliği, enerji verimliliği sağlamak ve iklim kontrolü için kullanılan yapı malzemelerinde tercih edilen bir özelliktir.

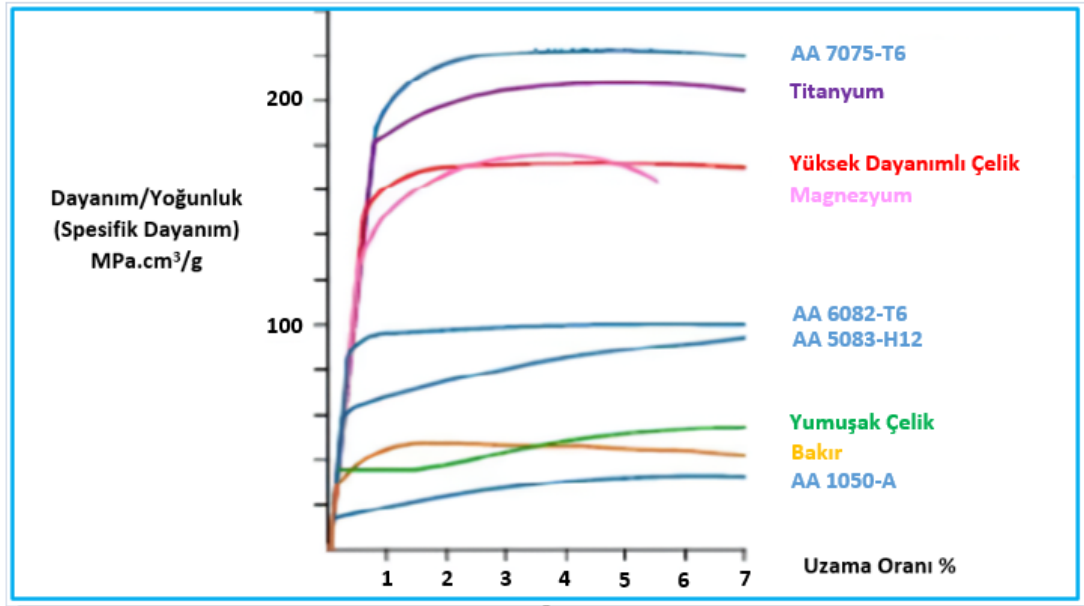
Esneklik, alüminyum elastik bir malzeme olduğundan çarpma enerjisini emme özelliğine sahiptir. Alüminyum malzemede birim gerilme artışına karşılık gelen uzama oranı çeliğe göre üç kat daha yüksektir. Bu, malzemenin elastiklik modülünü belirleyen eğrinin eğimine yansır. Alüminyumun elastiklik modülü çeliğin yaklaşık üçte biri olan 65 ila 72 GPa arasında değişir. Bu bilgilere dayanarak, çelikten yapılmış bir yapısal elemanın aynı şekilde alüminyumla değiştirilmesi durumunda ağırlığın üçte biri olacağını ancak elastik şekil değiştirme kapasitesinin üç kat artacağı söylenebilir. Bu da demektir ki aynı boyutta ve yapıda olan bir alüminyum parça, çelik bir parçaya göre üç kat daha fazla enerji emebilme kapasitesine sahiptir. Ancak bu durum, alüminyumun akma sınırının altında gerçekleşen gerilmeler için geçerlidir (Yıldırım 2006).

Alüminyumun hafifliği, birçok endüstride tercih edilen bir özelliktir. Bu nedenle, otomotiv, uzay, havacılık, savunma gibi ağırlığın önemli olduğu sektörlerde geniş çapta kullanılır (Askeland 2002). Ayrıca hafiflik, daha az yakıt tüketimi ve CO₂ salınımı anlamına gelir. Sera gazlarının % 19'u taşımacılık endüstrisinden kaynaklanır ve alüminyumun otomobillere eklenmesi, bir aracın ömrü boyunca yaklaşık 20 ton daha az CO₂ salmasına yol açar (İlgaz 2014) (Dündar ve diğ. 2002). Alüminyum alaşımları, dayanım değerleri açısından bazı çeliklerle rekabet edebilir konumdadır. Bu nedenle, otomotiv endüstrisinden uzay sanayisine kadar farklı sektörlerde farklı ihtiyaçlara cevap verebilen alüminyum alaşımları üretmek mümkündür. Alüminyumun

yüksek dayanım özelliği, YMK kafes yapısına sahip olmasından dolayı düşük sıcaklıklarda bile korunabilir (Onat 2011).

Alüminyumun yüksek spesifik dayanım özelliği onu diğer ekonomik metallerle karşılaştırılamayacak avantajlı bir konuma getirir. Alüminyum alaşımları diğer metallerle kıyaslanabilir çekme dayanımına sahiptirler. Fakat tüm alüminyum alaşımları, yüksek dayanımlı çeliklere göre düşük çekme dayanımına sahiptirler ve birim yük altında daha fazla şekil değiştirirler. Spesifik dayanım oranına göre ise 7075 alaşımı en üst sırada yer alır (Çağlayan 2020).

Mühendislik malzemelerinin dayanım değerleri ile birlikte hafifliği de kullanım yerlerine göre önem kazanabilmektedir. Bu açıdan son yıllarda mühendislik malzemeleri için spesifik dayanım (dayanım/yoğunluk) değerleri ön plana çıkmaktadır. Şekil 2.1’de dört farklı Al alaşımının ve bazı malzemelerin spesifik dayanım/uzama oranı eğrisi verilmektedir (Yıldırım 2006).



Şekil 2.1: Al alaşımının ve bazı malzemelerin spesifik dayanım/uzama oranı eğrisi (Yıldırım 2006)

Yüksek spesifik dayanım, yüksek yorulma direnci ve işlenebilirlik kolaylığı, hafiflik, korozyon dayanımı ve geri dönüşebilirliği gibi özellikleri ile beğenilen alüminyum alaşımları, havacılık ekipmanlarındaki çeşitli kritik bileşenler için ideal bir seçenek olarak kabul edilmektedir. Bu alaşımlar genellikle haddeleme, dövme, ekstrüzyon, sürünme yaşlandırma gibi çeşitli sıcak şekillendirme işlemlerine tabi

tutulurlar. Mekanik özellikler, bu alaşımların mikroyapılarıyla yakından ilişkilendirilir ve termomekanik işlemlerden büyük ölçüde etkilenirler (Lin ve diğ. 2010) (Lin ve diğ. 2013).

Ülkemizin savunma sanayi alanında yaptığı İHA, SİHA, ALTAY tankı ve BORA gibi çeşitli kara savunma, HİSAR gibi hava savunma füzeleri sistemlerinde alüminyum alaşımlarının kullanımı giderek artmaktadır (TALSAD 2020) (MSB 2021).

Roket veya füzelerin iskeletleri ve dış kaplamaları, hava basıncı, sürtünme gibi yüklere maruz kaldıklarından dolayı yüksek dayanım sağlayan ve ısıl işlem ile dayanımı daha fazla arttırılabilen 2XXX, 6XXX, 7XXX serisi alaşımlar kullanılmaktadır. NASA kaynaklı konstrüksiyonlarında Al-Li alaşımı Al 2195'i kriyojenik sıcaklıklarda kullanan ve harici yakıt tankına dahil eden ilk kuruluş olmuştur. Diğer bir malzeme olan 2195-T6, ABD Uzay mekiğinde kullanılan yakıt tankının ağırlığını 3,4 ton azaltarak önemli ölçüde tasarruf sağlamıştır (Polmear 2017).

Türkiye son yıllarda uzay endüstrisine yönelik çalışmalarını arttırarak, Türkiye Uzay Ajansı (TUA)'yı kurmuştur. TUA'nın misyonları arasında uzaya uydu fırlatılması ve aya sert iniş gibi ileri teknoloji gerektiren görevler bulunmaktadır. Bu görevlerde yerli ve milli olarak gerek uydular gerekse roketler yapılacaktır. Bu alanda da yukarıda bahsedilen gelişmiş özellikleriyle alüminyum alaşımlarının kullanılacağı açıktır (TUA 2022).

Türkiye her alanda olduğu gibi otomotiv sektörüne de büyük bir giriş yapmıştır. Yüksek oranda yerlilik ve millilik içerisinde yapılmak istenen araç TOGG olarak bilinmektedir. Ayrıca artık yeni nesil araçlarla birlikte TOGG da elektrikli olduğundan; piller, gövde, iç paneller ve kablolar gibi aksamalarda artık bakır yerine alüminyum alaşımları kullanılmaktadır. Bununla birlikte, Alcoa firmasının yaptığı çalışmada belirtildiği gibi, alüminyum alaşımlarından yapılmış iskelet ve yapısal elemanlar çelik içerikli otomobillere göre % 25 daha az yakıt tüketmektedir (Başer 2012).

2.1 Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması

Alüminyum alaşımlarının özellikleri ilave edildiği alaşım elementlerine ve oluşturduğu mikro yapısına bağlı olarak değişiklik gösterir. Malzeme üreticileri ve müşterilerin ihtiyaçlarına göre, farklı oranlarda alaşım elementleri eklenerek çeşitli alüminyum alaşımları üretilir. Bugünün mühendislik uygulamalarında geniş bir alüminyum alaşımı kullanımı mevcuttur ve uluslararası standartlara göre yaklaşık 500 çeşit dövme ve döküm alüminyum alaşımı bulunmaktadır. Düşük dayanım özelliklerini geliştirmek için saf alüminyuma çinko, magnezyum, bakır ve silisyum gibi alaşım elementleri eklenir. Alüminyum alaşımlarının özellikleri, döküm tekniğiyle üretilenlerde malzeme kompozisyonu, kalıp tipi ve kalıp doldurma işlemleri gibi faktörlere bağlı olarak önemli ölçüde değişir. Ayrıca, alüminyum alaşımlarının dayanımı, alaşım elementine ek olarak ısıtılma işlem çeşidine ve üretim yöntemlerine de bağlıdır. Alüminyum alaşımları, döküm ve dövme olmak üzere iki ana gruba ayrılır. Her iki grupta da ısıtılma işlem uygulanabilir veya uygulanamaz alaşımlar bulunur. En yaygın ısıtılma işlem uygulaması yaşlandırma yani çökelme sertleştirmesidir. Isıtılma işlem yapılamayan alaşımlarda ise deformasyon ve dağılım (dispersiyon) sertleşmesi gibi işlemler ile özellikler iyileştirilebilir (Liu 2010) (Öztürk 2010) (Onur 2014) (Çakır 2015) (Başer 2013). Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması, Uluslararası Alaşım Tanımlama Sistemi (IADS) tarafından geliştirilen bir sınıflandırmaya dayanmaktadır. Bu sistem, Amerika Birleşik Devletleri Alüminyum Derneği tarafından desteklenmiştir. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması uluslararası düzeyde kabul görmekte olup, birçok ülke tarafından benimsenmektedir (Kopeliovich 2012) (ANSI 2006).

Döküm ve dövme alüminyum alaşımları, tanımlanırken Tablo 2.3'te görüldüğü gibi sınıflandırılmaktadır (Eren 2017).

Tablo 2.3: Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Eren 2017)

Döküm alüminyum alaşımları		
Alaşım serisi	Ana alaşım elementi	Isıl işlem durumu
1XXX.X	Saf alüminyum	Yapılamaz
2XXX.X	Bakır	Yapılabilir
3XXX.X	Silisyum+bakır veya magnezyum	Uygulanabilir
4XXX.X	Silisyum	Yapılabilir
5XXX.X	Magnezyum	Yapılamaz
6XXX.X	Kullanılmayan seri	-----
7XXX.X	Çinko	Yapılabilir
8XXX.X	Kalay	Yapılamaz
Dövme alüminyum alaşımları		
1XXX	Saf alüminyum	Yapılamaz
2XXX	Bakır	Yapılabilir
3XXX	Mangan	Yapılamaz
4XXX	Silisyum	Yapılamaz
5XXX	Magnezyum	Yapılamaz
6XXX	Magnezyum ve silisyum	Yapılabilir
7XXX	Çinko	Yapılabilir
8XXX	Lityum	Yapılabilir

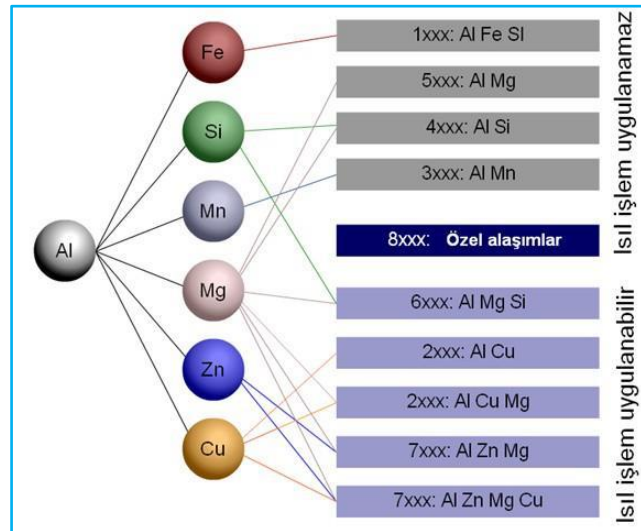
Alüminyum döküm alaşımları, ergitilip istenilen ürün formunu alması için özel şekillendirilmiş kalıplara dökülerek oluşturulan alaşımlardır. Bu alaşımlar, ana alaşım elementine göre sınıflandırılır. Akıcılık, dökülebilirlik, korozyon dayanımı, mekanik dayanım gibi özelliklere odaklanarak geliştirilmiş bir alaşım grubunu temsil eder (Atkaya 2021).

En çok bilinen alüminyum döküm alaşımlarının büyük çoğunluğu, silisyum içeren alaşımlardır. Bu alaşımlar, ötektik reaksiyonu nedeniyle alaşımın akıcılığını, düşük ergime noktasını ve dökülebilirliği artırır. İkili alüminyum-silisyum alaşımlarında ise ısıl işlem uygulanması mümkün değildir. Döküm alüminyum alaşımlarında yapay yaşlandırma ile mikroyapı optik olarak değişmez, ancak kararsız çökeltilerin ince bir dağılımıyla alaşımın dayanımının artmasını sağlar (Smith 2001). Tablo 2.4’de bazı döküm alüminyum alaşımlarının çekme dayanımları verilmiştir (Özel 2009).

Tablo 2.4: Bazı döküm alaşımlarının çekme dayanımları (Davis 2001)

Alaşım	Çekme dayanımı (MPa)
Isıl işlem görmüş kum döküm alaşımları	
Al-Cu (201, 206)	353-467
Al-Cu-Ni-Mg (242)	186-221
Al-Cu-Si (295)	110-221
Al- Si-Cu—Mg (355)	159-269
Al-Zn (712, 713)	241
Isıl işlem görmeyen kalıcı (kokil) kalıp döküm alaşımları	
Al-Sn (850, 851, 852 T5 temper)	138-221

Alüminyum dövme alaşımları, özellikle sıcak veya soğuk şekillendirme, talaşlı imalat, haddeleme, ekstrüzyon, dövme ve çekme gibi imalat yöntemleriyle üretilen ürünlerin hammaddesi olarak kullanılmak üzere uygundur. Bu alaşımlar genellikle sıcak veya soğuk döküm veya şerit döküm işlemleriyle külçelere dökülerek işlenirler. Alüminyum dövme alaşımları, dört basamaklı bir sayısal tasarım sistemiyle tanımlanır. İlk sayı, ana alaşım elementini belirtirken, ikinci kısım safsızlık sınırlarını gösterir. Son iki basamak ise alaşımın saflık seviyesini gösterir. Şekil 2.2'de dövme alaşımlarının sınıflandırması gösterilmektedir. Örneğin, 1XXX serisi alaşımlar saf alüminyumunu temsil eder. Son basamaklar ise alüminyumun saflık seviyesini belirtir (Erdoğan 2001) (Askeland 2010).



Şekil 2.2: Dövme alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması (Liu 2010)

Dövme alüminyum alaşımları, ısıt işleme tabi tutulabilen ve ısıt işlem uygulanmayan olmak üzere iki kategoriye ayrılabilir.

Isıt işlem uygulanabilen dövme alüminyum alaşımları, uygun ısıt işlem prosedürleriyle istenen özelliklere sahip hale getirilebilir. Bu alaşımlar, sıcaklık ve süre gibi parametrelerin kontrol edildiği bir ısıt işlem sürecinden geçirildikten sonra mekanik özelliklerinde iyileşme gösterebilir. Isıt işlem uygulanabilen alaşımların sertlik, dayanım, dayanıklılık ve diğer istenen özellikler üzerinde kontrol sağlanabilir. Tablo 2.5’de dövme alüminyum alaşımlarının özellikleri verilmiştir (Davis 2001).

Tablo 2.5: Dövme alüminyum alaşımlarının özellikleri (Davis 2001)

Alaşım serisi	Kompozisyon	Sertleştirme metodu	Çekme dayanımı (MPa)
1XXX	Al	Soğuk işleme	70-175
2XXX	Al-Cu-Mg-Si	Isıt işlem	380-520
3XXX	Al-Mn-Mg	Soğuk işleme	140-280
4XXX	Al-Si	Soğuk işleme	105-350
5XXX	Al-Mg-Mn	Soğuk işleme	280-380
6XXX	Al-Mg-Si	Isıt işlem	150-380
7XXX	Al-Zn-Mg	Isıt işlem	380-520
8XXX	Al-Li-Cu-Mg	Isıt işlem	280-560

1xxx, 3xxx, 4xxx ve çoğu 5xxx alüminyum dövme alaşımları yaşlandırma işlemine tabi tutulamazlar. Bu alaşımların özellikleri, deformasyon sonucu oluşan pekleşme gibi, katı çözelti güçlendirilmesi ve ince-kaba tane büyüklüğü gibi faktörler ile kontrol edilir ve bu özellikler sayesinde mekanik özellikler iyileştirilir. Ancak ısıt işlemler ile iyileştirme yapılamaz. 1xxx ve 3xxx serisi alaşımlar, tek fazlı alaşımlardır ve genellikle küçük miktarlarda inklüzyonlar (kalıntı) ve metaller arası bileşikler içerirler. 5xxx serisi alaşımlar ise oda sıcaklığında iki faza sahiptir. Fazlardan ilki, alüminyumda Mg’nin α katı çözeltisi iken diğeri $MgAl_3$ (sert ve kırılgan) bileşigidir. $MgAl_3$ bileşigi koherent olmadığı için bu alaşımlara yaşlandırma yapılamaz. 2-6-7 (XXX) serisi alaşımlar yaşlandırabilir. Bu alaşımlarda, kararlı koherent denge fazı oluşmadan önce uyumlu ve yarı uyumlu çökeltiler oluşmaktadır (Polmear 2006).

2xxx: $\alpha_{ke} \rightarrow$ (GP) Bölgeleri $\rightarrow$ Yarı-Kararlı Faz (θ') $\rightarrow$ Kararlı Denge Fazı [θ ($CuAl_2$)]
6xxx: $\alpha_{ke} \rightarrow$ (GP) Bölgeleri $\rightarrow$ Yarı-Kararlı Faz (β') $\rightarrow$ Kararlı Denge Fazı [β (Mg_2Si)]
7xxx: $\alpha_{ke} \rightarrow$ (GP) Bölgeleri $\rightarrow$ Yarı-Kararlı Faz(η) $\rightarrow$ Kararlı Denge Fazı [η ($MgZn_2$)]

Dövme alüminyum alaşımlarına ait üstün özellikler, kullanım alanları ve uygun tav koşullarındaki bileşikler Tablo 2.6'da verilmiştir. Bu bileşikler sertleşme mekanizmalarında önemli rol oynar (Threadgill ve diğ. 2009) (Sheppard 1999) (Robert 2008) (Kumar ve Milton 2016).

Tablo 2.6: Dövme alüminyum alaşımlarına ait üstün özellikler, kullanım alanları ve uygun tav koşullarındaki bileşikler (Threadgill ve diğ. 2009)

Alaşım serisi	Ana alaşım elementi	Ana özellikler	Uygulama alanları	Oluşan bileşikler
1xxx	-----	Yüksek korozyon direnci, mükemmel süneklik, düşük mekanik dayanımı.	Alüminyum folyolar, elektrik telleri	Bu alaşımlarda Fe ve Si sürekli olarak bulunduğundan, mikroyapılarda $FeAl_3$, Fe_3SiAl_2 ve $FeAl_6$ gibi bazı istenmeyen fazlar gözlemlenebilir.
2xxx	Cu: mekanik dayanımı önemli ölçüde artırır, çökeltme sertleşmesini hızlandırır ve sünekliği, korozyon direncini ve kaynaklanabilirliği azaltır.	Yüksek dayanım, üstün kaynaklanabilirlik ve mükemmel kırılma tokluğu	Uçaklar için ekstrüzyonlar, alt kanat panelleri	Bu sistemdeki denge bileşikler, $CuMgAl_2$ (S-fazı) ve $CuAl_2$ 'yi (δ -fazı) içerir. Bu fazlar, çözelti ısıtılma işlemi sırasında alüminyum matris içinde çözülebilir.
3xxx	Mn: İş sertleştirme ve katı çözelti güçlendirme gibi birkaç güçlendirme mekanizmasını hızlandırır.	Bina ve otomotiv uygulamaları için mükemmel süneklik ve şekillendirilebilirlik, düşük dayanım ve mükemmel korozyon direnci	Kutular, paketleme ve inşaat için alüminyum levhalar	Mn'nin önemli bir kısmı katı çözeltide kalsa da, kalıntılar $(Fe,Mn)SiAl_{12}$ ve $(Mn,Fe)Al_6$ dahil olmak üzere bazı geleneksel fazlar oluşturur.
4xxx	Si: çökeltme sertleşmesinin teşvik edilmesine paralel olarak mekanik dayanımı ve kopma uzamasını artırır.	Mükemmel süneklik, orta mekanik dayanım ve düşük erime noktası	Denizcilik ve bina uygulamaları için alüminyum levhalar, mühendislik endüstrisinde teller.	Bu alaşımlardaki denge fazları arasında $Fe_2Si_2Al_9$ ve silisyum bulunur. Isıl işlem, Si'yi küreselleştirebilir, ancak çözünmeyen demir açısından zengin fazı değiştirmez.
5xxx	Mg: iş sertleşmesini ve katı çözelti kuvvetlendirmesini uyarak mekanik dayanımı artırır.	Saf Al'e benzer uygun kaynaklanabilirlik, orta kuvvet ve yüksek korozyon direnci	Bina ve denizcilik, havacılık, gemi yapımı, nakliye uygulamaları	Bu alaşım sistemleri ısıtılma işlemi görmez. Al matrisi içinde Mg atomlarının varlığı kafes bozulmasına yol açar ve gerilim sertleşmesini kolaylaştırır.
6xxx	Mg ve Si: Mg_2Si bileşiği ile artış sağlar.	Yüksek süneklik, orta dayanım, uygun yüzey kalitesi, iyi şekillendirilebilirlik ve mükemmel korozyon direnci	Yapısal uygulamalar ve dekoratif mimari parçalar	Ana stokiyometrik bileşik Mg_2Si 'dir. Mg_2Si içeriğindeki bir artış, mekanik dayanımı artırabilir, ancak sünekliği önemli ölçüde azaltır.
7xxx	Zn ve Mg: mekanik dayanımı önemli ölçüde artırır ve çökeltme sertleştirme mekanizmasını uyarır. Ancak, stres korozyonuna yol açabilirler.	Yüksek dayanım, yüksek sıcaklıklarda stres korozyonuna ve aşırı yaşlanmaya karşı önemli ölçüde duyarlılık	Uçaklar için ekstrüzyonlar ve farklı uygulamalar için alüminyum levhalar	Bu alaşımlardaki ortak denge bileşikler Mg_5Al_8 , $MgZn_2$, $Mg_3Zn_3Al_2$ ve Mg_2Zn_{11} 'i içerir. Cu ana katkı maddesi olduğunda, $(Fe,Cr)_3SiAl_2$, $MgZn_2$, Mg_2Si , $Cr_2Mg_3Al_8$ ve Al_2CuMg gibi diğer bileşiklerin oluşması muhtemeldir.
8xxx	Li gibi diğer elementler: bağıl yoğunluğu azaltır, mekanik dayanımı ve elastik modülü artırır ve çökeltme sertleşmesini uyarır.	Orta dayanım	Rulmanlar için yumuşak alaşımlar	Bu alaşımlar ısıtılma işlemi görebilir ve ortak bileşikler şunları içerir: $\delta(AlLi)$ ve $\delta'(Al_3Li)$

1XXX serisi, saf alüminyumdur ve en az % 99 alüminyum içerir. Alaşımın ikinci rakamı, safsızlık oranıdır ve bu safsızlıklar genellikle demir ve silisyumdur. Bu malzemelerin şekillendirilebilmesi, yüksek elektrik iletkenliği ve korozyon direnci gibi özellikleri vardır. Son iki rakam ise, saf alüminyumun kesirli kısmını belirtmek için kullanılır. Örneğin, 1050 malzemesi % 99,50 oranında saf alüminyum içerir Bu sayılar, alaşımın içerdiği saflık seviyesini belirtir (Öz 2007) (Ahmadzadeh 2014).

2XXX serisi, alüminyum bakır magnezyum alaşımları, çökeltme sertleştirmesi yapılabilen alaşımlardır. Bu alaşımlara ayrıca magnezyum, nikel ve titanyum gibi yan alaşım elementleri eklemek mümkündür. Çökeltme sertleştirmesi yapılan ilk alaşım olan AA 2017 alaşımı, bu gruba örnektir. 2XXX serisi, bakır serisi olarak da adlandırılır. Yaşlandırma ve ısıtıl işlem çökeltmesi sonucunda akma dayanımı önemli ölçüde artar. Alüminyum-bakır alaşımları, yaşlandırma sürecinde karmaşık değişikliklere sahip olmalarına rağmen diğer sistemlerden daha iyi anlaşılmıştır. Isıtıl işlem sonrası özellikleri, hatta dökme çelikten bile daha yüksek olabilir. Ancak, süneklik ısıtıl işlem sonucunda azalır. Bu seri, yüksek dayanım ve düşük korozyon direnci özelliklerine sahiptir. Alüminyum içinde maksimum bakır çözünürlüğü 548°C'de elde edilir ve % 5,65 civarındadır Bakır oranı % 12'ye kadar artırıldığında dayanım artar, ancak daha yüksek oranlarda malzeme kırılgan bir yapı sergiler. Bu durumda talaş kaldırmayı zorlaştırır (Tufan 2011) (Smith 2000). AA2014 alaşımı % 4.4 Cu, %0.5 Mg, % 0.8 Mn ve %0.8 Si gibi bileşenlere sahip olup, yapay yaşlandırma sürecine daha fazla tepki vermek üzere AA2017 alaşımından sonra geliştirilmiştir. Bugün, Al-Cu-Mg alaşımları arasında en yaygın olarak kullanılanlardan biridir. Yüksek dayanım, magnezyumu % 0.5'ten seviyesinden % 1.5'e çıkararak elde edilir. Magnezyumun alüminyum-bakır alaşımlarına eklenmesi, çökelti sertleşmesini hızlandırır ve yoğunlaştırır (Öz 2007) (Ahmadzadeh 2014).

3XXX serisi, en önemli alaşım elementi mangandır. % 1.2 gibi düşük oranlarda mangan eklenerek dayanım arttırılır. Bu serinin alaşımları orta derecede mekanik özelliklere, yüksek sünekliğe ve mükemmel korozyon direncine sahiptir. Özellikle AA3003, AA3004 ve AA3015 alaşımları yüksek korozyon direnci ve işlenebilirlik özellikleri nedeniyle öne çıkar. Maksimum mangan çözünürlüğü alüminyum içinde yaklaşık % 0.82'dir ve bu çözünürlük 658°C'de elde edilir (Smith 2000) (Bıçaklı 2018).

4XXX serisi, silisyum ilavesiyle modifiye edilir. Silisyum miktarındaki artış, alaşımın ergime sıcaklık noktasında düşüşe neden olur. Silisyum, alaşımın akıcılık özelliğini artırarak özellikle döküm teknolojisinde karmaşık geometrilere sahip parçaların üretimine imkân tanır (Öz 2007) (Ahmadzadeh 2014).

5XXX serisi, magnezyum elementi sayesinde yüksek dayanım ve korozyon dayanımı elde edilir. Bu özellikleri ile gemi iskeletleri ve denizcilik uygulamalarında önemli yere sahiptir. Yaşlandırma yapılamadığından soğuk işleme ile sertleştirilir. % 4'ten fazla magnezyum, tavlama sırasında çözünen magnezyum miktarı oda sıcaklığında katı eriyik miktarından daha fazla olduğundan dolayı ciddi şekilde pekleşir ve oda şartlarında uzun bir süre depolandığında Al_3Mg_2 çökeltileri kayma bantları boyunca oluşur. (Burmabıyık 2019) (Ahmadzadeh 2014).

6XXX serisi, magnezyum ve silisyumun belirli oranlarında bulunmaları nedeniyle Mg_2Si çökeltisi oluştururlar. Bu serideki alaşımlardan biri olan AA6061, akma dayanımı düşük karbonlu çeliklerle neredeyse aynı seviyededir. AA6082 alaşımı, son zamanlarda hem ekstrüzyon ürünlerinde hem de araç süspansiyon sistemi elemanlarında yaygın olarak kullanılan bir alaşımdır (Ahmadzadeh 2014) (Mercan 2018).

7XXX serisi, bu serinin ana alaşım elementi çinkodur. Bu seri, alüminyum-çinko-magnezyum (AA7005 gibi) ve alüminyum-çinko-magnezyum-bakır (AA7075 gibi) olmak üzere iki alt gruba ayrılır. Bu grup alaşımlar yaşlandırma süreciyle sertleşir ve alüminyum alaşımlar arasında en sert olanlardır. 7178 alaşımı, çekme dayanımı 580 MPa'dır ve uçak yapı malzemesi olarak kullanılır (Ahmadzadeh 2014) (Smith 2000).

8XXX serisi, lityumu ana alaşım elementi olarak içermektedir. Ayrıca alaşımlara bakır, manganez, gümüş ve zirkonyum gibi minör alaşım elementleri eklenerek çeşitli özellikler elde edilebilir. Alüminyum-lityum alaşımları ısıtılma işlemine tabi tutulabilir. Alaşımın % 1 lityum ilave edilmesi, yoğunluğun % 3 oranında azalmasını ve elastiklik modülünün % 6 artmasını sağlayabilir. Alüminyum-lityum alaşımları, uçak yapıları, havacılık ve uzay araçlarında kaplamalar ve yakıt tankları gibi birçok alanda kullanılmaktadır. (Prasad ve Wanhill, 2017) (Burmabıyık 2019).

2.1.1 AA2024 alüminyum alaşımları

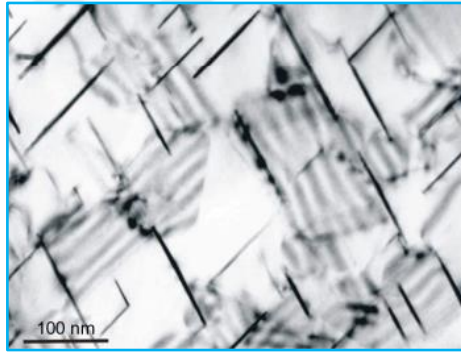
2XXX serisi alüminyum alaşımlarının geliştirilmesi, Alfred Wilm tarafından 1906 yılında Berlin'de gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda keşfedilen yaşlandırma sertleşmesi yöntemine dayanmaktadır. Alfred Wilm, tabancalar için mermi kovanlarının üretiminde daha güçlü bir malzeme arayışıyla pirinc yerine alüminyum alaşımı geliştirmek istemiştir. Bu çalışmalar, Zeppelin hava gemilerinin yapısal elemanları ve daha sonra uçaklar için hızla kullanılan Duralumin ($\text{Al}-3.5\text{Cu}-0.5\text{Mg}-0.5\text{Mn}$) adlı bir alaşımın üretimine imkan sağlamıştır (Polmear 2017).

Bu alaşımlarda safsızlığın azaltılması, özellikle demir ve silisyumun azaltılmasıyla birlikte, daha yüksek kırılma tokluğu ve yorulma çatlağı başlangıcına ve çatlak büyümesine karşı daha iyi direnç sağlamıştır. Alaşım elementleri, alüminyumun işlenmesine ve dayanımının arttırılmasına yardımcı olan önemli özellikleri getirir. Bakır (Cu), magnezyum (Mg) ve çinko (Zn), katı çözelti sertleştirilmesi ve çökelme sertleşmesi yoluyla yüksek dayanım sağlar. Bu elementler, alüminyum ile reaksiyona girerek ısıtılma sırasında dayanımı ve yorulma direncini arttıran intermetalik çökeltiler (örneğin CuAl_2 , Al_2CuMg , ZnAl) oluştururlar (Tan 2011) (Başpınar 2022). Bazı 2xxx serisi alaşımlarda Fe elementi de bulunmaktadır. Demir, genellikle alüminyum alaşımlarında istenmeyen bir safsızlık olarak kabul edilir. Ancak, demirin mekanik özellikleri olumlu yönde etkileyebileceği durumlar da mevcuttur. Ancak yüksek oranlarda bulunması bazı bileşiklerin oluşumuna neden olur. Özellikle CuFeAl_6 ve Cu_2FeAl_7 gibi bileşiklerin oluşumu, demirin varlığında mümkündür ve bu da alaşımın mekanik özelliklerini olumsuz etkileyebilir (Sheppard 1999).

Duralümin adıyla da bilinen AA2024 alaşımı, ana elementi bakır olan, yüksek sertlik, elastiklik modülü ve dayanıma sahip bir alaşımdır. Kimyasal bileşimde yaklaşık % 4.5 Cu ve % 1.5 Mg bulunur. En çok kullanım alanları dayanım gerektiren havacılık ve uzay endüstrisidir. Özellikle spesifik dayanım ve spesifik elastiklik modülünün önemli olduğu yerlerde tercih edilir. Uçak ve uzay yapılarında dişli ve iskeletler, uçak gövdeleri ve kanatları, ortopedik tabanlar, perçinler ve çekici tekerlekler gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılır. Bir Al-Cu alaşımı olan AA2024, α katı eriyiği üzerinde ve $\alpha + \text{Al}_2\text{Cu}$ intermetalik fazının altında bir yapıya

sahiptir. Artan sıcaklıkla birlikte Al-Cu sisteminde α katı eriyik bölgesi genişler ve çökeltme sertleşmesi uygulama olanağı artar (Atik ve diğ. 2001) (Bovard ve diğ. 2010) (Campbell 2006).

Al-Cu alaşımlarının yaşlandırılması esnasında meydana gelen karmaşık değişiklikler, diğer sistemlere kıyasla daha ayrıntılı bir şekilde incelenmelidir. Al-Cu sistemine dayalı yaşlanmış bir alaşımda çökelti oluşumunu değiştirmede diğer elementler, deney alaşımlarında oda sıcaklığında ve yüksek sıcaklıklarda iyileştirilmiş dayanımın teşvik edilmesi için kullanılmaktadır. Örneğin, AA2219 alaşımının tipik bileşimi, Al-5.8Cu-0.45Mg-0.4Ag-0.3Mn-0.15Zr şeklindedir. Bu alaşım, yapay olarak yaşlandırıldığında θ'' ve θ' fazları yerine gümüş içeren alaşımda $\{111\}$ α düzlemlerinde ince plakalar halinde dağılan bir çökelti olan Ω fazının oluştuğu gözlenir (Şekil 2.3). Bu fazın ortorombik bir yapısı vardır ve yaklaşık 200 °C'ye kadar olan sıcaklıklarda nispeten kararlı olduğu kanıtlanmıştır. Ag-Mg kümeleri başlangıçta iyi tanımlanmış bir şekle sahip değildir, ancak ileri yaşlanma sırasında $\{111\}$ α düzlemlerinde daha farklı şekillere dönüşürler. Ω çökelti oluştuğunda, gümüş ve magnezyum atomları geniş Ω / matris arayüzüne yayılır (Polmear 2017).



Şekil 2.3: Ω fazının plakaları, bir Al-Cu-Mg-Ag alaşımında $\{111\}$ α düzlemlerinde çökelmiştir (Polmear 2017)

2.1.2 AA7075 Serisi Alüminyum Alaşımları

7xxx serisi alaşımlar, 2xxx serisi alaşımlarla birlikte havacılık endüstrisinde en yaygın kullanılan alüminyum alaşımlarını temsil eder. 7xxx serisi alaşımların ana alaşım elementleri çinko ve bakırdır. Çinko içeriği bakırdan üç ila dört kat daha fazladır. Ayrıca magnezyum da önemli bir alaşım elementidir. Bu seride yer alan alaşımların dayanımı da yaşlandırma sertleştirilmesiyle artırılır. 7xxx serisi alaşımlar,

magnezyum (Mg) ve çinko (Zn) alaşım elementlerini içerdiklerinden dolayı yaşlandırma sonrası oluşan çökelti temeli olarak $MgZn_2$ intermetalik bileşiğinden meydana gelir (Du ve diğ. 2006). Ayrıca diğer elementlerin varlığı ile yaşlandırma süreciyle sertleştirildiğinde yüksek dayanımlı çökelti $[CuAl_2, Mg_2Al_3, Al_{32}(Mg,Zn)_{49}]$ oluştururlar. 7xxx serisi alaşımlar genellikle 2xxx serisi alaşımlardan daha yüksek dayanıma sahiptir. Uçaklarda kullanılan 7xxx serisi alaşımların akma dayanımı, genellikle 2xxx serisi alaşımların 300 ila 450 MPa arasında olan akma dayanımının aksine, tipik olarak 470 ila 600 MPa aralığındadır (Tehinse 2014).

Al-Zn-Mg sistemi, yaşlandırma sertleşmesi açısından tüm alüminyum alaşımları arasında en yüksek potansiyele sahip olup, bu yüksek dayanımlı alaşımlar genellikle gerilme-korozyon çatlamasına (Stress Corrosion Cracking-SCC) karşı direnci artırmak için bakır ilaveleri içerir.

Bu alaşımlar, yaşlandırma ısı işlemiyle çok iyi bir sertleşme kabiliyeti gösterdiklerinden dolayı uzun bir süredir özel ilgi görmektedir. Örneğin, 1917'de İngiltere'deki Ulusal Fizik Laboratuvarı'nda Rosenhain ve meslektaşları, duralümin için 420 MPa'lık bir çekme dayanımına karşılık gelen Al-20Zn-2.5Cu-0.5Mg-0.5Mn bileşiminde yaşlandırma sonrası 580 MPa'lık bir çekme dayanımı elde etmişlerdir (Polmear 2017).

1943'te Sumitomo Metal (Japonya) tarafından geliştirilen AA7075 alaşımı, havacılık ve uzay endüstrilerinin spesifik dayanım gereksinimlerini karşılamak için tasarlanmıştır (Zhao ve Jiang 2008). AA7075 alaşımının yoğunluğu (ρ) 2,80 g/cm³ ve elastiklik modülü (E) 71 GPa'dır. AA7075 alaşımı, T6 temperi sonucunda yüksek dayanım özellikleri sergilemekle birlikte düşük korozyon direncine sahiptir. Ancak, aşırı yaşlandırılmış durumlarda (örneğin T73), yüksek korozyon direnci sağlanırken dayanım özellikleri biraz düşmektedir. T6 temperi, AA7075 alaşımının ısı işlem sürecinde konvansiyonel bir yaşlandırma işlemidir. Bu işlem, alaşımın oldukça yüksek dayanım ve sertlik seviyesine ulaşmasını sağlar. Ancak, bu durumda korozyon direnci düşebilir. T6 ısı işlemi sonrasında, AA7075 alüminyum alaşımı 570 MPa çekme dayanımı ve 505 MPa akma dayanımına ulaşabilir (Tanrıöver 2008) (Demir 2009). AA7075 alaşımın tipik bir kimyasal bileşimi Tablo 2.7'de verilmiştir.

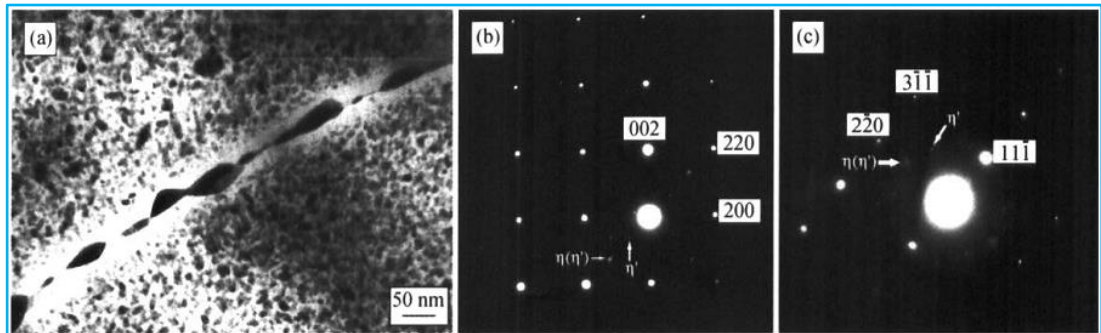
Tablo 2.7: AA 7075 alaşımlarının kimyasal bileşimi (Seykoç 2023)

Zn	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Ni	Ti	Al
5,89	1,53	2,55	0,1	0,19	0,07	0,18	0,0058	0,024	Kalan

Isıl işlemler ile mekanik özellikler artırılırken korozyon dayanımı da olumsuz etkilenmediğinden dolayı AA7075 alaşımı özel bir yere sahiptir. AA7075 alaşımı genel olarak;

- dayanımın yüksek olması gereken uçak ve uzay sektöründe
- çeşitli kalıp malzemelerinde,
- otomotiv ve yan parça sektöründe,
- nükleer tesislerde kullanılmaktadır (Seykoç 2023).

Zhihui ve diğ. (2007) yaptıkları çalışmadan, AA7075 alüminyum alaşımını, 115°C'de 7 saat yaşlandırdıktan sonra 165°C'de 16 saat çift yaşlandırma işlemine tabi tutmuşlardır. TEM görüntüleri (bkz. Şekil 2.4), yaşlandırma sonrası matris içinde 10-30 nm boyutlarına sahip çökeltilerin belirgin bir şekilde arttığını göstermektedir. Ancak, matris içindeki çökeltme yoğunluğu düşüktür, bu da alaşımın belirtilen sıcaklığın altında düşük çekme dayanımına sahip olmasına neden olur. Tane sınırlarında gözlenen çökeltiler, η fazına aittir ve boyutları 30-40 nm'ye kadar büyüyebilir. TEM ve SAD (Selected Area Diffraction- Seçilmiş Alan Diffraktometresi) analizleri, tane sınırlarında η' ve η fazlarının varlığını göstermektedir (Şekil 2.4 b ve c). İki aşamalı yaşlandırma işlemi sonucunda, alaşımın dayanımını η' ve η fazları birlikte arttırmıştır.



Şekil 2.4: 115°C'de 7 saat hemen ardından 165°C'de 16 saat yaşlandırma işlemi uygulanan AA7075 alüminyum alaşımının TEM görüntüsü (Zhihui ve diğ. 2007)

2.2 Alaşım elementlerinin alüminyuma etkileri

Saf alüminyumun düşük dayanımı, alaşımlandırma işlemiyle mekanik özelliklerinin iyileştirilmesini gerektirir. Alüminyumun özellikleri, alaşım elementlerinin oranlarına göre değişir. Alüminyum alaşımlarında; bakır, magnezyum, çinko, silisyum, demir, titanyum ve mangan gibi başlıca alaşım elementleri kullanılır. Uygun kullanım alanları için en uygun alaşımın elde edilebilmesi için ilave alaşım elementlerinin alüminyumu nasıl etkilediğinin bilinmesi önemlidir (Durmuş ve diğ. 2009).

Alüminyumun düşük yoğunluğu, iyi korozyon direnci ve kolay işlenebilirlik gibi avantajları, makine, taşıt ve yapı endüstrilerinde geniş çapta kullanılmasını mümkün kılmıştır. Ancak, dayanım özelliklerinin alaşımlama yoluyla geliştirilmesiyle birlikte alüminyum alaşımlarının teknolojiadaki kullanım alanları genişlemiştir. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarının sertlik ve dayanımlarının artırılması, kullanım alanlarının genişlemesinde kritik bir rol oynamaktadır (Dursun ve Soutis 2014) (Totten ve Mackenzie 2003).

Alüminyum alaşımlarında, metaller arasında bileşikler oluşturularak bu alaşımların özellikleri önemli ölçüde değiştirilebilir. Alüminyum, diğer metallerle tamamen çözünmez. Metaller arası bileşikler yüksek alaşım bileşimleridir ve sert ve kırılgan oldukları için mekanik özellikleri düşürür. Genellikle alaşım elementlerinin toplamı % 15'ten fazla değildir. Yüksek sıcaklıklarda katı çözünürlük yüksek olsa da, oda sıcaklığında katı çözünürlük önemli ölçüde düşüktür. Bazı örnekler Tablo 2.8'de gösterilmiştir (Durmuş ve diğ. 2009).

Tablo 2.8: Bazı alaşım elementlerinin ötektik katılaşma ve oda sıcaklığında alüminyum içerisindeki çözünürlükleri (Durmuş ve diğ. 2009)

Alaşım elementi	Cu	Mg	Mn	Si	Zn
Ötektik katılaşma sıcaklığında çözünürlük (%)	5,65 (548°C)	14,9 (450°C)	1,8 (659°C)	1,65 (577°C)	8,2 (382°C)
Oda sıcaklığında çözünürlük (%)	0,02	2,5	0,3	0,1	2,0

Yüksek sıcaklıktaki çözünürlük ile oda sıcaklığındaki çözünürlük arasındaki fark, Cu, Mg, Mn, Si ve Zn gibi elementlerin yaşlanabilirlik özelliğini sağlar. Bu fark, çökeltme sertleşmesi olarak bilinen yaşlanma prosesinin temel nedenidir (Durmuş ve diğ. 2009).

Bakır (Cu), alüminyuma katılan birincil alaşım elementlerindendir. Bakır, alüminyum içinde en çok % 5,65 oranında çözünebilir (α tek faz bölgesi). En yaygın kullanılan alüminyum alaşımları genellikle % 4-10 oranında bakır içerir. Döküm alaşımlarında en fazla % 12 oranında kullanılır. Bakır, alüminyum alaşımlarının hem önce hem de sonra ısıtılma işlemlerinden kaynaklanan dayanımını ve sertliğini önemli ölçüde artırır (Aydın ve Tunçel 2019). % 4-6 oranında bakır içeren alüminyum alaşımları, ısıtılma işlem uygulamalarına oldukça iyi yanıt verir. Bununla birlikte, bakır korozyona karşı direnci azaltır. Bakır, alaşım bileşiminde genellikle % 1-12 oranında bulunur. Alaşımdaki bakır miktarının artması, akıcılığı, sertliği ve çekme dayanımını artırır. Ayrıca, bakır iç büzölmeleri azaltan etki gösterir ve alaşımın işlenme durumunu artırır. Ancak, sıcak yırtılmayı kolaylaştırarak dökümü zor hale getirebilir (Çetintürk 2021) (Dongre ve Salunkle 2014).

Silisyum (Si), alüminyum alaşımlarının döküm özelliklerini önemli ölçüde geliştiren bir elementtir. Saf alüminyuma eklenen silisyum, sıcak yırtılmayı güçleştirir ve akıcılığı artırır. Ticari alaşımlarda, yaklaşık % 25 silisyum oranına kadar ötektik üstü ve ötektik altı aralıklarda kullanılabilir. Özellikle bir miktar magnezyum ilavesiyle ısıtılma işlem uygulanan Al-Si alaşımları oluşturulur. Dökme alaşımlarda % 12'ye kadar olan silisyum ilavesi akıcılığı ve yüksek sıcaklık dayanımını artırır (Çetintürk 2021) (Bayoğlu 2015).

Mangan (Mn), genel olarak safsızlık olarak kabul edilir. Ancak mangan, dövme alaşımlar için önemlidir. Mangan, tane boyutunu küçültme etkisine sahiptir ve çekme dayanımını artırırken korozyon direncini etkilemez. Manganın alaşımlarda bulunması, (Mn, Fe)Al₆ intermetaliklerinin ince partiküller halinde oluşmasını sağlayarak demir içeren kaba çökeltilerin oluşumunu engeller (Çetintürk 2021) (Tufan 2011).

Magnezyum (Mg), Al-Si alaşımlarında sertlik ve dayanım sağlar. Mg₂Si bileşiği sertleştirme aşamasında % 0,70 Mg civarında çözünürlüğe sahiptir. Dayanıklılık gerektiren Al-Si alaşımlarında magnezyum oranı % 0,07-0,40'dır.

Magnezyum oda sıcaklığında yaşlandırma ısıl işlemini destekler. Magnezyumun ilave edilmesi alüminyum alaşımlarının dökümünü zorlaştıran cüruflaşmaya neden olabilir (Çetintürk 2021) (Tufan 2011).

Demir (Fe), alüminyum alaşımlarında genellikle yaygın olarak kullanılmaz. Demir genellikle alüminyum alaşımlarında magnezyum gibi bir safsızlık olarak kabul edilir. Demirin dayanımı artırma ve yüksek sıcaklıklarda sertliği artırma gibi iyileştirici etkileri vardır. Ancak yüksek silisyumlu alüminyum alaşımlarında fazla miktarda demir, kaba kristalli ve gevrek bir yapıya neden olabilir. Ayrıca demir oranının artması sünekliği azaltır (Çetintürk 2021) (Rana ve diğ. 2012).

Titanyum (Ti), az miktarda bor ile birlikte alüminyum döküm alaşımlarının tane boyutunu inceltir ve bu amaçla yaygın olarak kullanılır. Alüminyum alaşımlarına genellikle % 0,05-0,2 oranında titanyum (Ti) ilave edilir. Doğru bir tane inceltme için TiB_2 fazının daha fazla miktarda titanyum gerektirdiği bilinmektedir. Titanyum ayrıca sünekliği ve çekme dayanımını artırırken ısı iletimini azaltır (Daşcılar 2006) (Çetintürk 2021).

Çinko (Zn), alüminyum alaşımlarında bakır ve magnezyum ile birlikte kullanıldığında doğal yaşlanmayı sağlayan bileşiklerin elde edilmesini sağlar. Çinko miktarının artmasıyla birlikte alaşımın akıcılığı artar, ancak yüksek sıcaklık dayanımı azalır. Çinko ilavesi, alüminyum alaşımlarının haddeleme kabiliyetini iyileştirir. Özellikle magnezyum ile birlikte kullanıldığında haddeleme seviyesini artırır ve iyi darbe ve çekme dayanımı sağlar (Daşcılar 2006) (Çetintürk 2021).

2.3 Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler

Saf alüminyum, diğer saf metallerde olduğu gibi düşük mekanik özelliklere sahiptir ve deformasyona ve kırılmaya karşı direnç göstermede yetersizdir. Bu nedenle, endüstride alüminyum, çeşitli elementlerle alaşımlandırılır ve bununla yoğunlukta çok az bir artış yaşanırken mekanik özelliklerde ise büyük bir artış gözlenir. Saf alüminyum, oluşan alüminyum oksit sayesinde korozyona karşı o dirençlidir. Ancak, alaşım oranı içeriği arttıkça korozyon direnci azalır. Bu nedenle,

alaşım elementleri yüksek olan alaşımların korozyon karşı direncini artırmak için çeşitli temperleme yöntemleri geliştirilmiştir (Büyükdoğan 2011).

Alüminyum alaşımlarının geliştirilmesinde, dayanım artışının çökelme işlemi ile sağlanabileceğinin bulunması büyük bir rol oynamıştır. Taşıt teknolojisi, uzay ve özellikle uçak sanayisinde yüksek dayanım/yoğunluk oranına sahip özgün konstrüksiyonlar, yaşlanabilir (T6 ısıt işlemi) alaşımlar olmadan düşünülemez. Dayanımın artırılmasında, yapı içerisinde ikincil fazların oluşumunu sağlamak için yaşlandırma ısıt işlemi en önemli yöntem olarak başvurulur. Çökelme sertleştirme işlemi, kullanım sıcaklığında termodinamik denge halinde en az iki fazlı bir yapıda bulunan alaşımlarda, hızlı soğutma ile denge yapısının oluşmasına fırsat verilmeden tek fazlı metastabil yapıya dönüştürülebilir. Bu ısıt işlemin uygulaması için, alaşımın aşırı doymuş katı çözültiden çökeltilecek ikincil fazların sertlik ve dayanımlarının yüksek olması gerekmektedir. Teknik kullanımda bu özelliklere sahip olan intermetalik faz partikülleri genellikle çökeltiler olarak kullanılır (Esmailian ve diğ. 2015).

Alaşım elementleri, alüminyum alaşımlarının özelliklerini çeşitli şekillerde etkiler. Oluşan parçacıklar, kenar dislokasyonlarını iterek ve sarmal dislokasyonların üzerinden atlamalarını zorlaştırır. Katı çözülti alaşımlarında, sarmal dislokasyonların kayma yeteneği önemli ölçüde artar ve dayanımı artırır. Parçacıkların dislokasyon hareketinin önünde güçlü engeller oluşturduğu durumlarda, deformasyon sertleşme oranları da etkilenir (Benedyk 2010) (Kaya 2005).

Alüminyum alaşımlarına uygulanan farklı ısıt işlem teknikleri vardır. “T” ve “H” sembolü farklı işlemleri temsil eder. Tablo 2.9’da alüminyum ısıt işlemlerinde kullanılan temper sembolleri listelenmektedir. (O) tavlanma işlemi, (W) çözündürme yapıldığını ve (F) üretilen alaşımı ifade etmektedir. “T” ve “H” sembolleri sonrası rakamlar, pekleşme oranını, ısıt işlem çeşidini veya özel üretim hallerini ifade etmektedir.

Tablo 2.9: Alüminyuma uygulanan ısıt işlemlerinin temperleri (Kvande 1999)

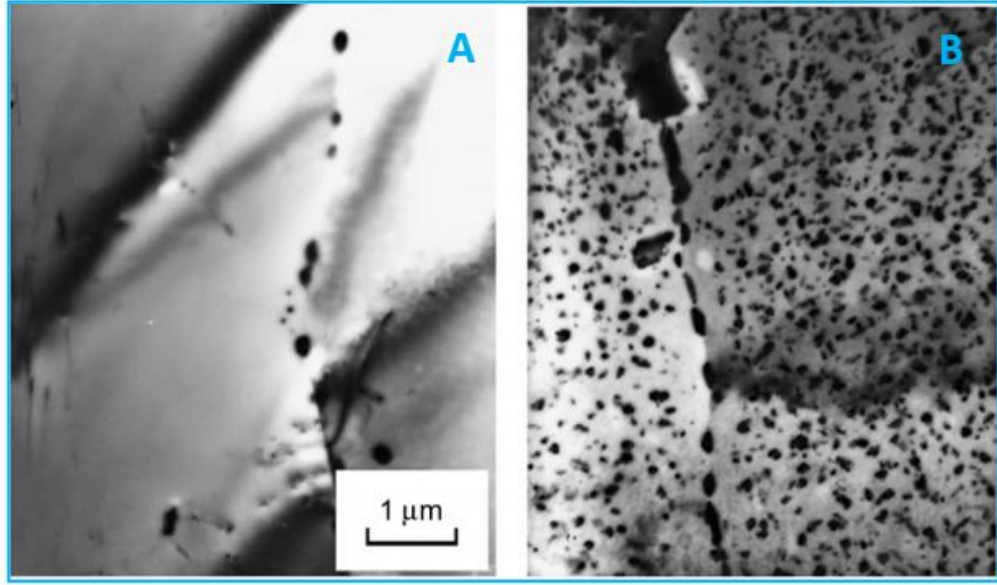
Temper	Açıklama
F	İmal edildiği şekilde
O	Tavlanmış
H	Soğuk şekilde şekillendirilmiş
H1X	Tek soğuk şekilde şekillendirilmiş
H12	Soğuk olarak şek. O ve H14 arası çekme dayanımı
H16	Soğuk şek. H14 ve H18 arası çekme dayanımı
H18	Soğuk şek. %75 azalma sağlar
H19	Soğuk şek. H18 temper ile çekme dayanımı 2000 psi artar
H2X	Soğuk şek. ve kısmen tavlanmış
H3X	Yaşlanmayı engellemek için soğuk şek. ve dengelenmiş
W	Çözelti yapılmış
T	Yaşlandırılmış
T1	İmalat sonrası hemen soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
T2	İmalat sonrası hemen soğutulmuş, soğuk şek. ve doğal yaşlandırılmış
T3	Çözelti işlemi, soğuk olarak şek. ve kararlı duruma doğal yaşlandırma
T4	Çözelti yapılmış ve kararlı duruma doğal yaşlandırma
T5	Yüksek sıcaklıkta şekillendirme + soğutma ve yapay yaşlandırma
T6	Çözelti yapılmış ve yapay yaşlandırma
T7	Çözelti yapılmış ve kararlaştırılmış
T8	Çözelti yapılmış, soğuk olarak şek. ve yapay yaşlandırma
T9	Çözelti yapılmış, yapay yaşlandırma ve soğuk şek.
T10	İmalat sıcaklığı soğutulmuş, soğuk olarak şek. ve yapay yaşlandırma

Homojenizasyon, alüminyum, genellikle 450-600 °C aralığında homojenize edilmelidir. Bu işlem aşağıdaki amaçları içermektedir;

1. Mikrosegregasyonun etkilerinin azaltılması
2. Sonraki çalışma sırasında çatlamaya neden olabilecek denge dışı, düşük erime noktalı ötektiklerin giderilmesi
3. Katılaşma sırasında çözünen aşırı element konsantrasyonlarının kontrollü çökmesi.

Homojenizasyon süreci, temel olarak alaşım elementlerinin tane sınırlarından ve diğer çözünen zengin bölgelerden tane merkezlerine difüzyonunu içerir. Özellikle yüksek dayanımlı alaşımlar için önemli olan homojenizasyon, Al₆Mn, Al₁₂Mg₂Cr ve

Al_3Zr gibi mikron altı intermetalik bileşiklerin çökertilmesine ve yeniden dağıtılmasına yardımcı olur. Bu bileşiklerin çökmesi, zaman ve sıcaklık açısından önemlidir ve homojenizasyon sıcaklığına ısıtma hızı da büyük önem taşır. Örneğin, daha ince ve düzgün dispersiyonların oluşumu için çekirdeklenme ve büyüme teşvik edildiğinde, nispeten yavaş ısıtma hızları gereklidir. Al-Zn-Mg alaşımı için Şekil 2.5'te gösterilmektedir (Polmear ve diğ. 2017).



Şekil 2.5: 0.3 Mn içeren Al-Zn-Mg alaşımında Al_6Mn 'nin mikron altı parçacıklarının oluşumunu gösteren transmisyon elektron mikrogramları. Külçeler 500 °C sıcaklıkta 24 saat homojenize edilmiştir. (A) Yüksek ısıtma hızında (500 °C/h) ve (B) Düşük ısıtma hızında (5°C/h) (Polmear ve diğ. 2017)

Yüksek ısıtma hızında (A), mikrogram üzerinde Al_6Mn parçacıkları homojen bir şekilde dağılmamış ve büyük boyutlu parçacıklar halinde bulunmaktadır. Düşük ısıtma hızında (B), Al_6Mn parçacıklarının daha küçük boyutta ve daha homojen bir dağılıma sahip olduğu gözlemlenmektedir. Düşük ısıtma hızı, parçacıkların çekirdeklenme ve büyüme sürecini etkileyerek daha düzenli ve küçük parçacıkların oluşumunu sağlamaktadır (Polmear ve diğ. 2017).

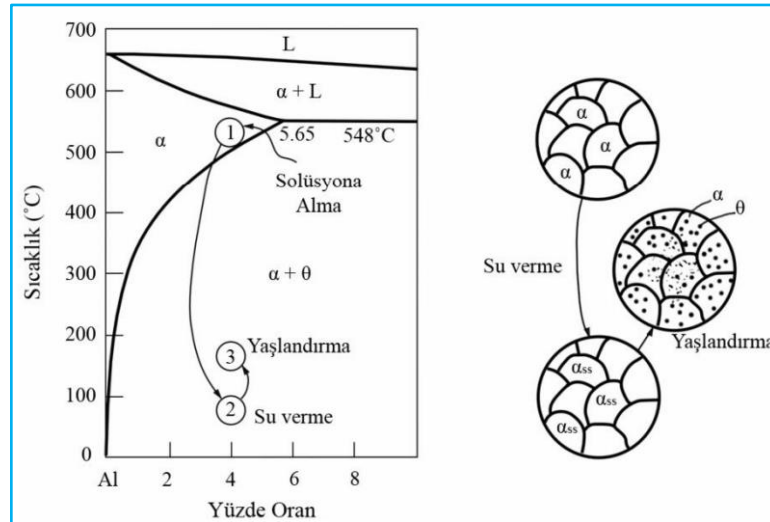
2.3.1 T6 ısıt işlemi

Yaşlandırma ile sertleştirme işlemi, alaşımda ana matris ile uyumlu olarak homojen şekilde dağılmış ikinci faz çökeltilerinin oluşturulmasını sağlar. Bu partiküller, ana matrisle uyumlu yapıya sahip olduklarından, dislokasyon hareketlerini

engeller ve malzemenin dayanımının artmasına katkıda bulunur. Böylece, malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri iyileşir. Yaşlandırma işleminin koşulları, sıvı halde her oranda çözünen bir solvüs eğrisi içeren denge diyagramına sahip olması gerekir. Sıcaklığın artmasıyla birlikte alaşım elementlerinin çözünürlüğü de artar. T6 ısıt işleminde alüminyum alaşımının çeşidine göre belirli bir sıcaklığa yükseltilmesi bu sıcaklıkta belirli süre tutulması ve hızlı bir şekilde soğutulmasını ardından yine alaşım çeşidine göre belirli bir zaman ve sıcaklıkta yaşlandırılması sonucu dayanım artar. Bu olay çökelme sertleştirme olarak da bilinmektedir. Yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında 1 ay gibi uzun sürelerde yapılırsa doğal yaşlandırma, belirli saatler içerisinde yapılırsa yapay yaşlandırma olarak adlandırılır. (Tomruk 2010) (Demir 2020). Kısaca basamaklar halinde bu adımlar yazılacak olursa;

- Alaşım cinsine göre belirlenen sıcaklığa kadar ısıtma ve bu sıcaklıkta bir süre bekletme (çözeltiye (solüsyona) alma)
- Hızlı bir şekilde soğutma (su verme)
- Su verme işlemi sonrasında doğal veya yaşlandırma (çökelme) (Güner 2013).

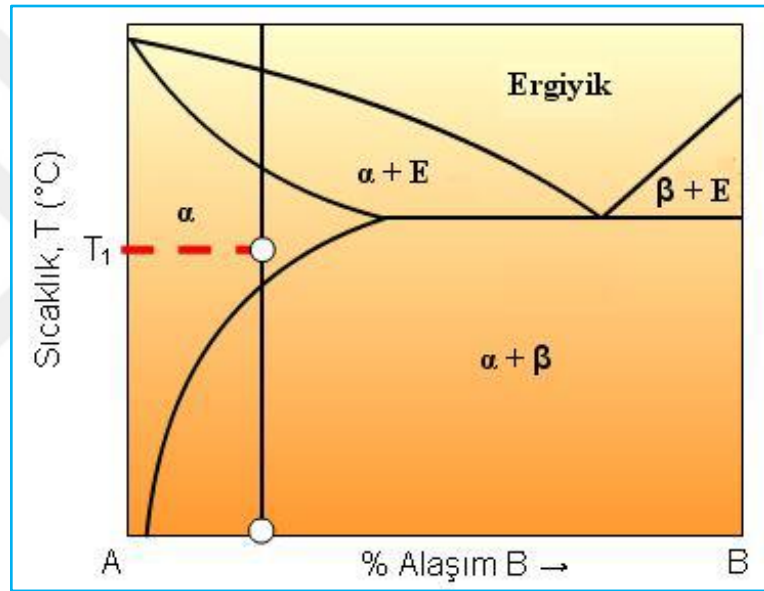
Yaşlandırma ısıt işlemi kademeleri Şekil 2.6'da gösterilmektedir (Nalçacıoğlu 2017).



Şekil 2.6: Yaşlandırma ısıt işlemi kademeleri (Nalçacıoğlu 2017)

Solüsyona (çözeltiye) alma, yaşlandırma işleminin ilk aşamasıdır. Bu işlemde, dayanım artırma etkisi olan alaşım elementleri tek fazlı katı ergiyik içerisinde çözünerek homojen bir yapı oluşturur. Solüsyona alma işlemi, malzemenin solvüs

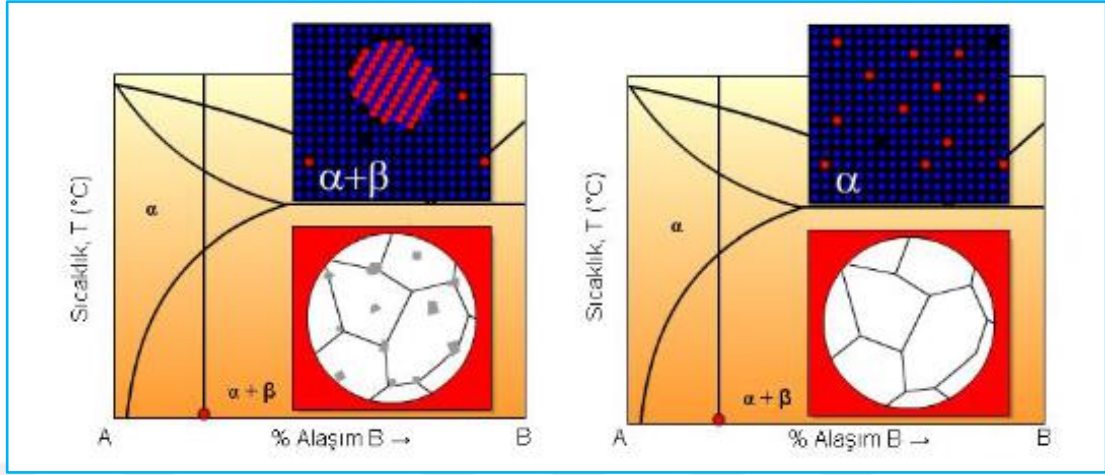
eğrisi üzerinde olan bir sıcaklığa veya ötektik alaşıma ait olarak sıcaklığın 10 ila 20°C altındaki bir sıcaklığa çıkartılmasıyla gerçekleştirilir. Solvüs sıcaklığı, alaşım miktarının artmasıyla birlikte artar ve alaşımın kimyasal bileşimi solüsyona alma sıcaklığının belirlenmesinde önemli bir faktördür. Ötektik sıcaklık geçildiğinde tane sınırlarında ergime oluşur ve mekanik özellikler olumsuz etkilenir. Tam tersi olarak sıcaklık düşük olursa, çökeltilerin çözünmesi zorlaşarak sertleşme gerçekleşmez. Düşük ısıtma hızlarında, Al₂Cu gibi çökeltiler 500°C'de kolayca çözünürken, daha hızlı ısıtma hızlarında çözünme gerçekleşmez. Solüsyona alma süresi fazın çözünmesi ve homojen dağılmasına kadar olmalıdır (Tekin 2014) (Demirel 2018). Şekil 2.7'de çözeltiye alma işleminin uygulaması verilmiştir (Tan 2011).



Şekil 2.7: Çözeltiye alma işlemi için örnek bir alaşım diyagramı (Tan 2011)

Su verme işlemi, yaşlandırma işleminin en önemli aşamalarındandır ve amacı, solüsyona alma işlemi sırasında oluşturulan aşırı doymuş katı çözeltinin hızlı bir şekilde oda sıcaklığına soğutulmasıyla korunmasını sağlamaktır. Bu işlem, hızlı bir şekilde soğutma yapılamazsa, katı çözelti içindeki ikinci faz partiküllerinin kayma düzlemleri ve tane sınırlarında çökmesine ve bunun sonucunda korozyon direncinin düşebilir ve deformasyon olumsuz etkilenmesine neden olabilir. Su verme işlemi, solüsyona alınan alaşımın yoğun boşluk konsantrasyonuyla ilişkilidir ve bu konsantrasyonun, denge difüzyonundan daha hızlı difüzyon gerçekleşmesiyle GP (Guinier-Preston) bölgelerinin oluşmasına katkıda bulunur (Öcal 2011) Tomruk (2010). Şekil 2.8'de α bölgesine ısıtılıp oda sıcaklığına yavaş olarak soğutulan

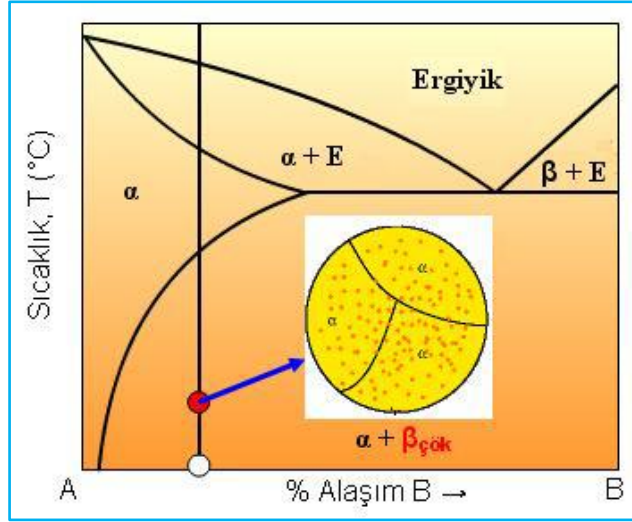
alaşımında β fazlarının ayrılarak sonucu çökelti oluşturması ve Su verme işlemi ile aşırı doymuş α yapısının elde edilmesi gösterilmiştir (Tan 2011).



Şekil 2.8: Tek fazlı α bölgesinden oda sıcaklığına yavaş soğutma sonucu β fazlarının ayrılarak çökelti oluşturması (sol), Su verme işlemi ile aşırı doymuş α yapısının elde edilmesi (sağ) (Tan 2011)

Daha yavaş soğutma hızları kullanıldığında, soğutma gerilimleri azalır ve bu, alternatif dövme işlemlerinde özellikle önemlidir. Bazı alaşımlar, sıcak veya kaynar suyla soğutulabilir. Alaşım α bölgesine ısıtıldıktan sonra yavaş soğutulursa, solvüs sıcaklığının altında β fazları ayrılarak çökelti oluşturur. Oluşan çökelti sıcaklık düştükçe büyür ve bu, malzemenin özelliklerinin düşmesine sebep olur.

Yaşlandırma, yaşlanma sertleşmesi, alüminyum alaşımlarının özelliklerini geliştirmek için kullanılan bir ısıtma işlemi aşamasıdır. Bazı alaşımlar doğal yaşlanma adı verilen oda sıcaklığında yaşlanabilirken, çoğu alaşım yapay yaşlanma olarak adlandırılan 100-190 °C aralığındaki sıcaklıkta belirli bir süre boyunca ısıtma gerektirir. Tek aşamalı yaşlanma işlemi uygulanan durumlarda, yüksek dayanımlı özellikler elde etmek için uygun bir sıcaklıkta belirli bir yaşlanma süresi seçilir. Bu süre, belirli bir alaşım için en iyi performansı sağlamak amacıyla belirlenir (Polmear 2017). Şekil 2.9’da yaşlanma sonrası aşırı doymuş α fazından β fazının çökmesi gösterilmiştir.



Şekil 2.9: Yaşlanma işlemi sonrası aşırı doymuş α fazından β fazının çökmesi (Tan 2011)

Aşırı doymuş yapıdan kararlı ve mikro yapıda homojen dağılmış yaklaşık eş eksenli tanelerin çökmesini sağlamak üzere belirlenen süre ve sıcaklıklarda yaşlandırma uygulanır. Bu proses sonunda yaşlanma sonrası yapı içerisinde homojen şekilde küçük boyutlu taneler dağılır. Boyutları ne kadar küçük ve sayıları ne kadar fazla olursa dislokasyon hareketlerine o kadar fazla engel oluşturarak dayanım artışına yardımcı olur. Yaşlandırma işlemi birkaç saatten başlayarak aylarca yapılabilir. Ancak olması gerekenden fazla sıcaklık ve süre, tane büyümesine neden olarak dayanım değerlerini olumsuz etkiler. Bu “aşırı yaşlandırma” olarak bilinir (Çoşkun 2020) (Çetintürk 2021) (Sunar ve Özyürek 2020).

Alaşımın türleri değişse de yaşlandırma işleminin temel prensibi genel olarak aynıdır. Örnek vermek gerekirse;

- Al-Cu alaşımında CuAl_2 'den dolayı dayanım artışı elde edilir.
- Al-Cu-Mg alaşımında CuAl_2 çökmesi magnezyum ile yoğunlaşır.
- Al-Mg-Si alaşımında Mg_2Si 'den dolayı dayanım artışı elde edilir.
- Al-Zn-Mg alaşımında MgZn_2 'den dolayı dayanım artışı elde edilir (Demir 2020).

Al-Cu-Mg alaşımları için ana dayanımlandırma aşamaları θ' (Al_2Cu) ve S (Al_2CuMg) 'dir. Yüksek Cu/Mg oranı nedeniyle baskın faz θ' olur. Bu nedenle yaşlanma davranışının, ikili bir Al-Cu alaşımında görülen aynı klasik sırayı takip etmesi beklenir. (GP bölgeleri $\rightarrow \theta'' \rightarrow \theta' \rightarrow \theta(\text{Al}_2\text{Cu})$). Mg ve Si'nin varlığı nedeniyle,

S (Al_2CuMg), Ω (Al_2Cu) ve σ ($\text{Al}_5\text{Cu}_6\text{Mg}_2$) gibi diğer küçük fazların oluşma potansiyeli de vardır. Bununla birlikte, S ve S' benzer kristal yapılarından dolayı kolayca ayırt edilemezler (Bakavos ve diğ. 2004).

7XXX alaşımları genellikle GP bölgeleri ve η' , η çökeltileri içermektedir. GP bölgeleri çözünmüş elementlerle zenginleştirilmiş ve istisnai olarak küçük boyutlara (<3 nm) kümeler benzemektedir. Yaşlandırma ısı işlemi sırasında, kararlı GP bölgeleri, T6 temperin güçlendirici fazı olan yarı karalı η' (MgZn_2) fazının çekirdeklenme merkezleri olarak işlev görmektedir (Demirel ve Karaağaç 2020). İlgili atom sayısına göre 100-1000 atom içeren çökeltiler GP bölgeleri olarak kabul edilirken, 1000-5000 ve 5000'den fazla atom içeren çökeltiler sırasıyla η' ve η fazları olarak kabul edilir (Luo 2022).

Kimyasal bileşime bağlı olarak, farklı fazların oluşma potansiyeli bulunmaktadır. Örneğin, Mg içeriği Zn içeriğinden daha yüksek olduğunda $\{111\}_{\text{Al}}$ düzlemlerinde T fazı ($\text{Mg}_{32}(\text{ZnAl})_{49}$) oluşurken; önemli miktarda Cu ilavesi olduğunda ve içeriği Mg'den yüksek olduğunda $\{110\}_{\text{Al}}$ düzlemlerinde S fazı (Al_2CuMg) gözlenir.

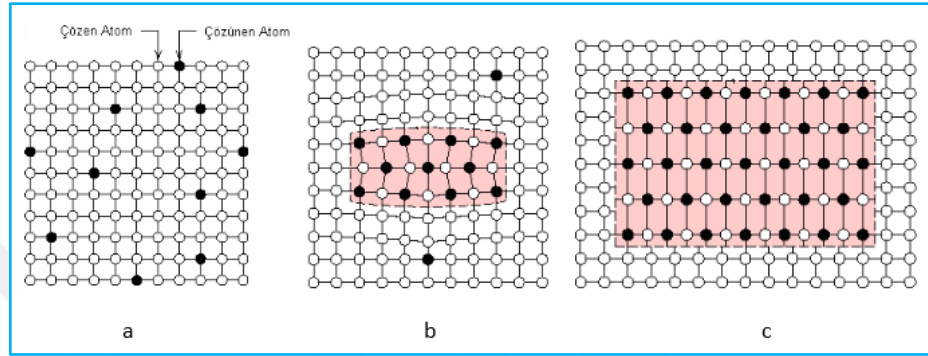
Yaşlandırma işleminin gerçekleşebilmesi için bazı koşullar gerekir. Alaşım bir solvüs eğrisine sahip olmalıdır. Matris çökeltiden daha yumuşak ve sünek, çözelti ise sert ve gevrek olmalıdır. Alaşım su alabilmelidir. Çökeltinin maksimum dayanım ve sertliği sağlayabilmesi için matris yapısı ile koherent olmalıdır (Burgucu 2011).

Yaşlandırma işlemi üç evreden oluşur: hazırlık, yaşlanma ve aşırı yaşlanma evresi.

Hazırlık evresi; bu evrede fazlalık atomlar bir araya gelerek kümeleşir ve ilk embriyoyu oluşturur. Bu küçük çökeltiler, yaşlanma evresinde çekirdeklenmeye dönüşecek olan yapıların oluşmasına hazırlık yapar.

Yaşlanma evresi; çekirdeklenme mekanizması aktif hale gelir ve fazla atomlar Θ fazının çekirdeklerini oluşturur. Oluşan çökeltiler, ana matrisin kafes yapısıyla uyumlu olan ara kristal yapı veya geçiş kafesiyle uyumludur. Ancak, Θ fazı matris yapısından farklı bir kafes parametresine sahiptir. Bu uyumsuzluk, matrisin kafes yapısında çarpılmaya neden olur.

Aşırı Yaşlanma evresi; bu evrede çökeltiler matris yapısıyla uyumlu hale gelir ve matrisin kafes yapısında çarpılmaya neden olur. Bu çarpılma, dislokasyon hareketini engeller ve alaşımın dayanımı ve sertliği hızla artar. Aşırı yaşlanma evresinde çökelen faz mikroskopta görünür hale gelir. Bu evrelerde yaşanan süreçler, alaşımın özelliklerini geliştiren ve sertlik/dayanım artışına yol açan mekanizmaları içerir (Koç 2019) (Erdoğan 2018) (Demirel 2018). Şekil 2.10'da yaşlandırma işleminde çökeltilerde meydana gelen oluşumlar gösterilmiştir.

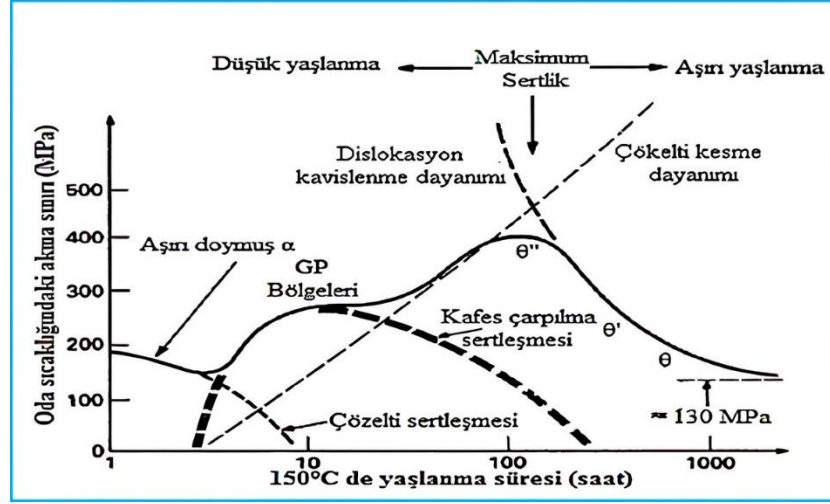


Şekil 2.10: Yaşlandırma işleminde çökeltilerde meydana gelen oluşumlar; a) aşırı doymuş katı çözelti, b) matrisle uyumlu katı çökelti ve c) matrisle uyumsuz kararlı çökelti durumu (Meyveci 2007)

Çökelme sertleşmesi, çözünmüş atomların uyumlu çökeltiler oluşturması sonucu ortaya çıkar. Uyumlu çökelti oluşumuyla, çökelti ve matris arasında bir süreklilik sağlanır. Bu süreklilik, geniş bir gerilme alanı yaratır ve dislokasyon hareketlerini engeller. Matris yapısıyla uyumlu çökeltiler, alaşımın dayanımını ve sertliğini önemli ölçüde artırır.

% 4 bakır içeren alüminyum alaşımının yaşlandırılması incelenirse, alaşım önce 515°C'de solüsyon işlemine tabi tutulur ve ardından su ile soğutulur. Bu işlemle aşırı doymuş bir yapı elde edilir. Daha sonra 120-190°C sıcaklık aralığında yapay olarak yaşlandırma işlemi uygulanır ve çökelme sertleşmesi gözlemlenir. Bu alaşımın yaşlanma sertleşmesinde beş farklı yapı sırası belirlenir. Bunlar; (Gökçe 2013) (Tan 2012). (1) aşırı doymuş katı çözelti, (2) GP1 bölgesi, (3) GP2 (Θ'' fazı) bölgesi, (4) Θ' fazı, (5) Θ fazı Al_2Cu .

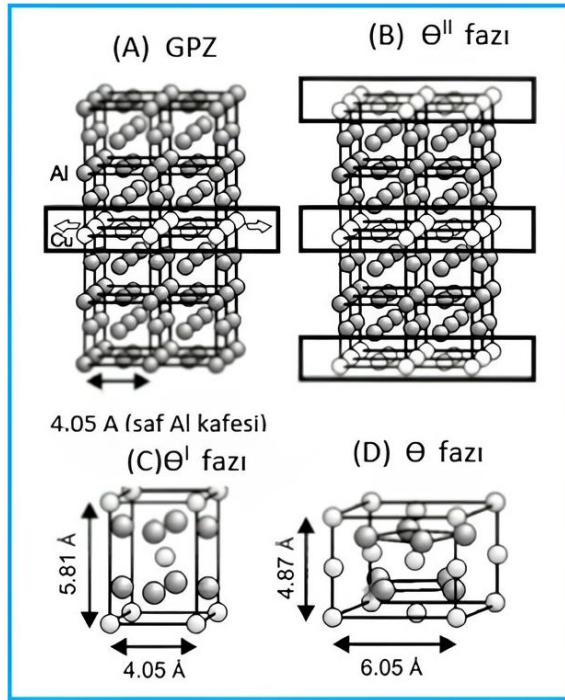
Şekil 2.11'de % 4 bakır oranına sahip alaşımının yaşlandırma sonrasında akma dayanımındaki değişim oranları gösterilmektedir (Tekin 2014).



Şekil 2.11: % 4 bakır içeren alüminyum alaşımının akma dayanımındaki değişim (Tekin 2014)

Bakır atomlarınca oluşturulan GP1 bölgeleri, düşük sıcaklıklardaki yaşlandırma işlemlerinde katı çözeltinin içinde yer alır. Yaklaşık 9-10 nm çapında ve 0,4-0,6 nm atom kalınlığında olan bu bölgeler, ana matrisin (100) düzlemlerinde oluşur ve bakır atomlarının alüminyumun yerini aldığı uyumlu hale gelirler. Bakır atomları, alüminyum atomlarından yaklaşık % 11 daha küçüktür ve bölgeler etrafında ana matrisin kafesinde gerilme yaratarak tetragonal bir yapı oluşmasını sağlar. GP2 bölgelerinde ise tetragonal yapıdaki θ'' fazı mevcuttur ve (100) ana matris düzlemleriyle uyumludur. Bu bölgelerin boyutları yaşlandırma zamanına bağlı olarak değişebilir, ancak 1-4 nm kalınlığında ve 10-100 nm çapındadır. θ' fazı ana matrisle uyumlu değildir ve dörtgenli bir yapıya sahiptir. Kalınlığı 10-150 nm arasında değişebilir ve uyumsuz bir fazdır. Al_2Cu bileşimindedir ve hacim merkezi tetragonal yapıdadır ($a = 0.607$ nm ve $b = 0.487$ nm). Bu faz, ya doğrudan ana fazdan ya da θ' fazından oluşabilir (Gündüz 2013) (Tekin 2014) (Çoşkun 2020). Şekil 2.12'de yaşlandırılmış Al-Cu alaşımlarında çökelen bölgelerin kristal yapıları ve boyutları görülmektedir.

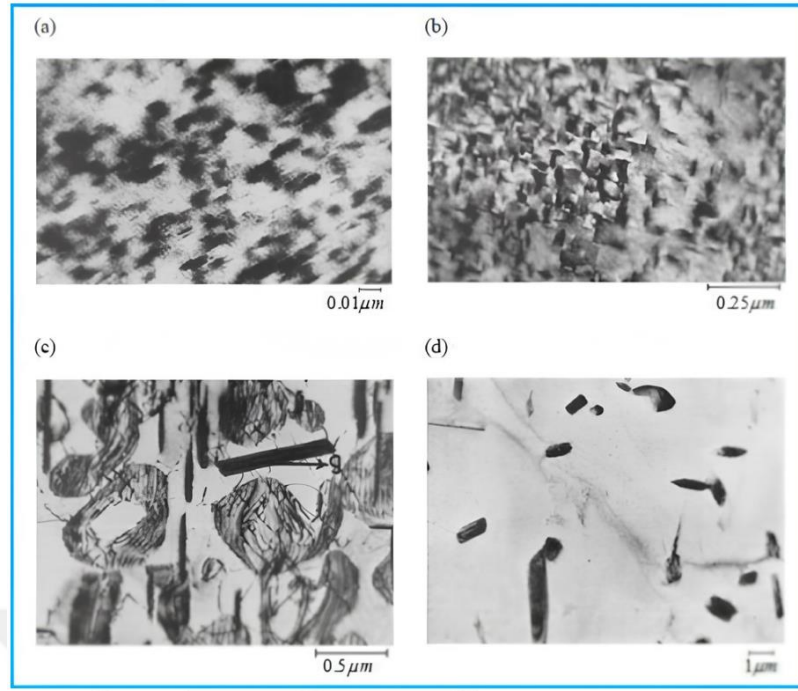
θ' bölgesindeki en üstün özellikler yaşlandırma sayesinde elde edilir. Ancak, aşırı yaşlanma durumunda çökelti boyutu ve dağılımı ideal olmaktan çıkarak, çökelti komşu çökelti birleşmesiyle aşırı derecede büyüyebilir. Bu durumda, oluşan bölgelere θ bölgeleri denir (Meyveci 2007) (Callister 2018) (Aydın 2002).



Şekil 2.12: Yaşlandırılmış ikili Al-Cu alaşımlarında çökelebilen (A) GP bölgelerinin, (B) θ'' , (C) θ' ve (D) θ (Al₂Cu) kristal yapılarını gösteren modeller. Açık toplar bakır atomlarını ve daha koyu toplar alüminyum atomlarını temsil etmektedir (Lumley 2011)

GP bölgesi oluşumu alaışımın sertliğini artırır, ancak GP bölgeleri küçük ve yapışık olduğu için dislokasyonlarla kesilebilirler. Disk şeklinde ve matrisle tamamen yapışık halde olan θ'' çökeltileri zamanla büyük ölçüde artar. θ'' hali de GP gibi dislokasyonlar ile kesilebilecek haldedir. Alaşım yaşlandırılmaya devam edildikçe θ' fazı θ'' fazının yerini almaya başlar ve dislokasyonlarla kesilemeyecek hale gelir. Dislokasyonla sertleşme mekanizmasında bir değişiklik meydana gelir ve çökeltiler kesilmeyerek Orowan mekanizması ile dislokasyon sertleşmesi gerçekleşir. Yaşlandırma sürecinin devam etmesi ile Orowan mekanizmasının da etkisiyle daha büyük çökeltiler meydana gelir. Tane sınırlarında kaba çökeltilerin çekirdeklenmesi ve büyümesi nedeniyle tane sınırlarına bitişik çökeltilisiz bölgeler oluşur. Böylece malzeme aşırı yaşlandırıldığında homojen olmayan ve oldukça kompleks olan bir yapı haline gelir (Liu 2003) (Zhan 2011).

Yaşlandırma işlemi sırasında oluşan fazlar Şekil 2.13'de TEM kullanılarak da incelenmiştir (Porter ve Easterling 2009).



Şekil 2.13: TEM ile çökeltilerin görüntüsü, (a) GP Bölgeleri, (b) θ'' oluşumu, (c) θ' oluşumu, (d) θ oluşumu (Porter ve Easterling 2009).

2.3.2 Yeni nesil ısıt işlemleri (kesintili yaşlandırma)

Tek aşamalı yaşlanmanın uygulandığı durumlarda, uygun bir sıcaklık ve süre ile yüksek dayanımlı özellikler elde edilir. Ancak bazen özellikle gerilmeli korozyon direnci ve çekme dayanımı artışının yanında uzama değerlerinde de artış arzu edildiğinde, belirli alaşımlar çoklu yaşlandırma işlemlerine tabi tutulur. Bu işlemler genellikle oda sıcaklığında birkaç günle başlar ve ardından yüksek sıcaklıklarda bir veya iki periyodu içerebilir.

Son zamanlarda yapılan araştırmalar, alaşımların yapay olarak daha yüksek sıcaklıklarda yaşlandırıldıktan sonra daha düşük sıcaklıklarda ikincil çökelmeye ve sertleşmeye maruz kalabileceğini göstermiştir. Bu etkiler, alaşım bileşimine, yapay yaşlanma süresine ve soğutma hızına bağlı olarak değişebilir. Dolayısıyla, alaşımın özellikleri, özellikle ilk olarak yüksek bir sıcaklıkta yaşlandırıldığında zamanla değişebilir. Bununla birlikte, yetersiz yaşlandırma durumunda olan bir alaşım daha sonra daha düşük bir sıcaklıkta bekleme süresinden geçirilerek yapay olarak yaşlandırılırsa, genel yaşlandırma sertleştirme seviyesi T6 temperinden daha da yüksek olabilir (Tsai 2013) (Lumley 2002) (Lumley 2003).

Son zamanlarda, Lumley ve diğ. (2005) tarafından sertleşme etkisini daha da geliştirmek için alüminyum alaşımları için çok aşamalı yaşlandırma işlemleri geliştirilmiştir. Bu yaşlandırma işlemi alaşımlara düşük-yüksek sıcaklık yaşlandırmasının verildiği çift yaşlandırmanın aksine, yüksek-düşük-yüksek çok kademeli sıcaklık değişimleri içermektedir. Bu ısı işlem “kesintili” veya “ara verilerek” yaşlandırma olarak adlandırılır (Lumley ve diğ. 2005).

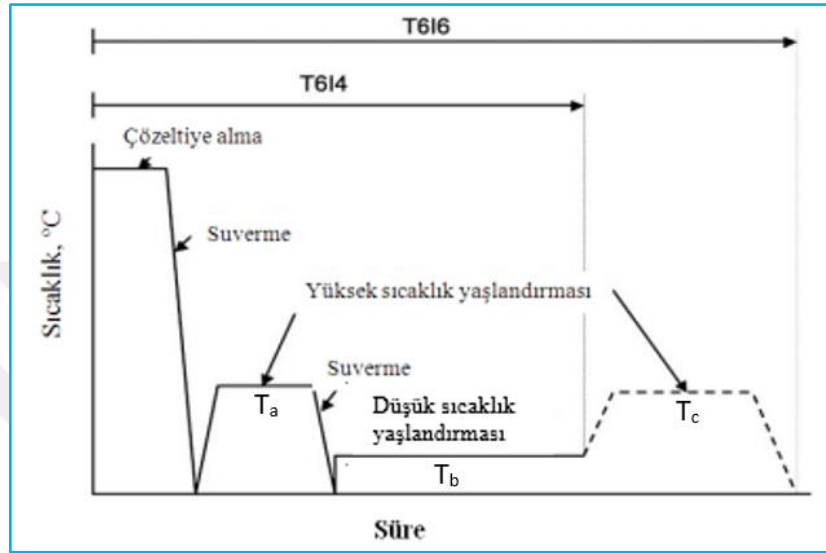
Kesintili yaşlandırma olarak adlandırılan ikincil yaşlandırma prosesleri T6 işlemine alternatif olarak yaygın olarak kullanılmaya başlanan ısı işlem proseslerinin başında gelmektedir (Haisheng 2021). Spesifik koşullar için, bu işlemin, standart bir T6 işlemi yoluyla elde edilen dayanım seviyelerinin daha da iyileştirilmesinde çok etkili olduğu daha önceki çalışmalarla da kanıtlanmıştır. Çoğu Al alaşımı için bu işlemin, dayanım ve kırılma tokluğunda eşzamanlı iyileştirmeler gösterebileceği bildirilmektedir (Lumley ve diğ. 2002) (Marceau 2010).

Kesintili yaşlandırma, genel olarak alaşımın ön yaşlandırma işleminin yüksek sıcaklıkta kısa sürelerde tamamlanması ve akabinde düşük sıcaklıkta uzun sürelerde – ki bu süreler 10.000 saate kadar olabilmektedir– ikincil yaşlandırma işlemlerine tabi tutularak özelliklerin iyileştirilmesi prosesidir (Buha 2008) (Demirtaş 2009).

Kesintili yaşlandırma prosesinde, sertleşebilir alüminyum alaşımları birinci aşamada 120-180 °C gibi yüksek sıcaklıklarda yaşlandırılır (literatürde “underage” olarak adlandırılan alt yaşlandırma işlemi) ve hızlı soğutulur. İkincil yaşlandırma işlemi oda sıcaklığından 130°C’ye kadar değişen sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilir. Kesintili yaşlandırma sonucunda, düşük sıcaklıklarda ince formda ikincil çökeltilerin çekirdeklenmesi ve buna bağlı olarak ilave dayanım artışı sağlanmaktadır. Kesintili yaşlandırma prosesinin bilimsel literatürde uygulama parametrelerine bağlı olarak farklı temper sınıfları bulunmaktadır. Bunlardan endüstriyel uygulamalarda en yaygın kullanılanı T6I4 ve T6I6 işlemleridir. Gösterimde ilk iki sırada verilen T6 konvansiyonel yaşlandırma işlemini simgelemekte olup, daha sonra gelen I harfi, “kesintili” kelimesinin İngilizce’de karşılığı olan Interrupted kelimesinin baş harfini ifade etmektedir. Örneğin, "T8I6", alaşımın yapay yaşlandırmadan önce soğuk işlendiğini anlamına gelir. İşlemin devamında alaşımlar daha yüksek bir sıcaklıkta (T6I6) yeniden yaşlandırıldığı takdirde, maksimum çekme dayanımına ilave olarak

kırılma tokluğu değerlerinde de iyileşme elde edilebilmektedir (Gül 2014) (Marceau 2010).

Şekil 2.14'te kesintili yaşlandırma prosesinin aşamaları verilmiştir ve Tablo 2.10'da kesintili yaşlandırmanın varyasyonları gösterilmektedir (Lumley ve diğ. 2004) (Baksan 2020).



Şekil 2.14: Kesintili (ikincil) yaşlandırma ısıl işleminin uygulanması (Baksan 2020)

Tablo 2.10: Alüminyuma uygulanan ısıl işlem temperleri (Lumley ve diğ. 2004)

Temper	İşlem
T6I4	Çözelti işlemi, soğutma, (T_a) ilk yaşlandırma, soğutma, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b)
T6I6	Çözelti işlemi, soğutma, (T_a) ilk yaşlandırma, soğutma, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b), yeniden yaşlandırma(T_c) $T_c \leq T_a$
T6I7	Çözelti işlemi, soğutma, (T_a) ilk yaşlandırma, yavaş soğutma (fırın veya doğal soğutma).
T6I76	Çözelti işlemi, soğutma, (T_a) ilk yaşlandırma, soğutma, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b), yeniden yaşlandırma(T_c) $T_c > T_a$
T77I4	Çözelti işlemi, soğutma, yaşlandırma (T_{a1}), tekrar yaşlandırma (T_{a2}), burada $T_{a2} > T_{a1}$, soğutma, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b)
T8I4	Çözelti işlemi, soğutma, soğuk işleme, (T_a) ilk yaşlandırma, soğutma, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b).
T8I6	Çözelti işlemi, soğutma, soğuk işleme, (T_a) ilk yaşlandırma, soğutma, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b), (T_c) yeniden yaşlandırma, $T_c \leq T_a$.
T9I4	Çözelti işlemi, soğutma, (T_a) ilk yaşlandırma, soğuk işleme, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b).
T9I6	Çözelti işlemi, soğutma, (T_a) ilk yaşlandırma, soğuk işleme, 25°C-65°C 'de yaşlandırma (T_b), (T_c) yeniden yaşlandırma, $T_c \leq T_a$.

T6I4 kesintili ısıtıl işlemi T6 temperinin ardından 25 ve 65 °C'ler arasında 10.000 saatlere kadar yapılabilir. T6I6 kesintili ısıtıl işlemi ise T6I4 işleminin devamı niteliğinde olup, T6 ısıtıl işlem sıcaklığına eşit veya daha düşük sıcaklıklarda gerçekleştirilir. T_B sıcaklığında kesintili yaşlandırma aşaması, kontrollü ikincil çökelmeyi kolaylaştırmayı amaçlar. T_B sıcaklığındaki kesinti sırasında meydana gelen ikincil çökelmenin, çökelti fazlarının boyutunu, dağılımını ve oranlarını değiştirdiği belirlenmiştir ve bunun mekanik özelliklerdeki iyileşmeyi desteklediği ortaya konmuştur (Donnell 2004) (Lumley ve diğ. 2003).

Löffler ve diğ. (1983) yüksek sıcaklıklarda yapay olarak kısa süreliğine yaşlandırılmış aşırı doymuş Al-Zn-Mg alaşımlarında, sertliğin daha düşük sıcaklıklarda uzun süreli doğal yaşlanmadan sonra değişmeye devam ettiğine dikkat çekmişlerdir. Bu olay “ikincil çökeltme” olarak adlandırılmaktadır (Buha 2008). Kesintili yaşlandırma işlemlerinde, düşük sıcaklıkta yaşlanmanın bu tür ikincil çökelmeye yol açtığı ve mikroyapısal gelişim üzerinde önemli etkilere sahip olduğu görülmüştür (Macchi 2003) (Buha 2007).

7xxx serisi Al-Zn-Mg alaşımları gibi bazı alaşımlarda, arzu edilen dayanım seviyelerine ulaşmak için iki aşamalı, düşük-yüksek sıcaklıkta “çift yaşlandırma” işlemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Düşük sıcaklıkta yaşlandırma işlemiyle dayanım arttırıcı çökelti η' için öncü görevi gören GP bölgelerinin daha yoğun dağıldığına inanılmaktadır. Kısmi geri dönüş tipik olarak gözlemlense de, alaşım daha yüksek bir yaşlanma sıcaklığına ısıtıldığında GP bölgelerinde genel bir artış sağlar, bu da η' dağılımını ve dolayısıyla dayanımı değiştirir (Wang ve diğ. 2008).

İkincil çökeltmeyi içeren deneysel kesintili (aşamalı) yaşlanma işlemleri ayrıca Al-Cu-Mg ve Al-Zn-Mg alaşımı gibi ve diğer bazı ticari alüminyum alaşımlarında kırılma dayanıklılığını artırdığı bulunmuştur. Dahası, bu gelişmelere, tokluk ve kuvvetin genellikle ters orantılı olmasına rağmen artan gerilme özellikleri eşlik edebilir (Buha 2005). Tablo 2.11’de kesintili yaşlandırmanın alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri gösterilmektedir.

Tablo 2.11: Kesintili yaşlandırmanın alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri (Polmear 2017)

Alaşım ve temperi	Akma dayanımı (MPa)	Çekme dayanımı (MPa)	Kopma uzaması (%)	Kırılma tokluğu (MPa.m ^{1/2})
2014-T6	414	488	5	26,9
2014-T6I6	436	526	10	36,2
6061-T6	267	318	13	36,8
6061-T6I6	299	340	13	58,4
6061-T6I4	302	341	16	43,2
7050-T6	546	621	14	37,6
7050-T6I6	574	639	14	41,1
7050-T6I4	527	626	16	52,0
8090-T6	349	449	4	24,2
8090-T6I6	391	512	5	31,0
357-T6	287	325	7	25,5
357-T6I6	341	375	5	26,0
357-T6I4	280	347	8	35,9

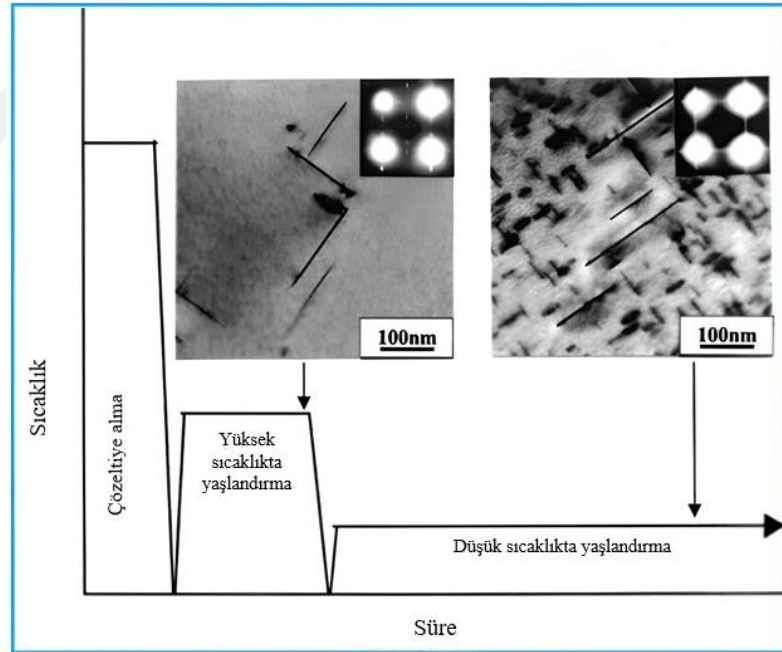
Tablo 2.11’de verilen sonuçlara göre kırılma tokluğundaki T6I4 ve T6I6 için artışlar 2014 alaşımında % 34,5, 6061 alaşımında % 58,6 ve % 17,4, 7050 alaşımında % 9,3 ve % 38,3, 8090 alaşımında % 28,1, 357 alaşımında % 2,0 ve % 38,8 şeklinde gerçekleşmiştir. Bu artışlardan görüldüğü gibi kesintili yaşlandırma işlemi hem dayanımı hem de kopma uzaması ve tokluk gibi ters özellikleri artırır (Polmear 2017).

Yaşlandırma ısı işlemi sırasında genellikle tane sınırlarında boşluk sayısının yetersiz olması nedeniyle çökelti oluşumu meydana gelmemekte, bunun yerine, tane sınırlarına bitişik bölgeler olan çökeltisiz bölgeler (PFZ) oluşmaktadır. PFZ’ler, matristen daha yumuşak bölgelerden oluştuğu için mekanik özellikler açısından zararlıdır ve malzemenin erken kırılmasına neden olabilir. Alüminyum alaşımlarının mekanik dayanımlarını arttırmak ve PFZ sorununun üstesinden gelmek için kesintili yaşlandırma ısı işlemi kullanılabilir. Bu yöntemde dayanım ve süneklik artışı, alüminyum matris içinde dağılmış çökelti parçacıklarının oluşumu sırasında çözünen atomları tüketen ikincil çökeltme yoluyla gerçekleşir. Bu süreç, malzemenin mekanik özelliklerini geliştirmek için etkili bir yol olabilir. Çünkü çökelti parçacıkları matristeki deformasyonu engelleyerek dayanımı artırır. Aynı zamanda, PFZ’lerin oluşumunu da azaltarak malzemenin dayanımını ve şekillendirilebilirliğini arttırabilir (Jacumasso 2019).

Yaşlandırma ısı işlemi, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek için kullanılan bir işlemdir. Bu işlemin ilk aşamasında, daha yüksek

sıcaklıklarda, çökelti parçacıklarının oluşumundan önce gelen GP bölgelerinin (genişleme safhasının) oluşumu hedeflenir. İkinci aşama ise daha düşük sıcaklıklarda gerçekleşir ve çökeltilerin yoğunluğunu artırarak PFZ'nin genişliğini azaltmaya yönelik olur. Bu sayede malzemenin çekme özellikleri ve kırılma tokluğu iyileştirilmiş olur (Jacumasso 2019).

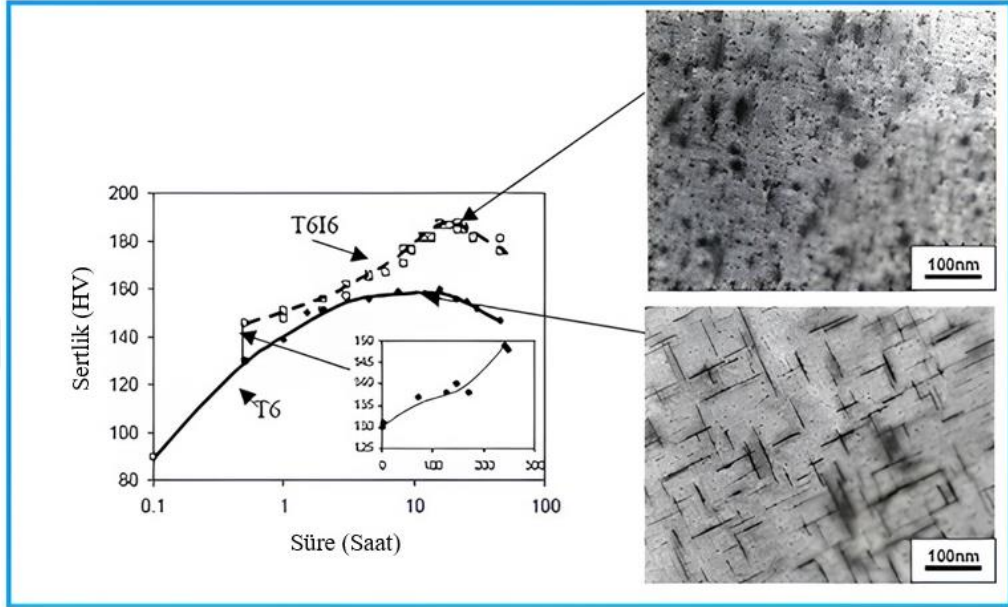
Şekil 2.15 Al-4Cu alaşımına uygulanan T6I4 işleminde yaşlanmanın iki aşaması sırasında meydana gelen tipik değişiklikleri göstermektedir. Birinci aşamada çökeltme, yüksek sıcaklıktaki yaşlanma süresine karşılık gelen şekilde devam eder ve gösterilen örnek için θ fazının plakaları oluşmuştur. Ortam sıcaklığında veya biraz üzerinde ikincil yaşlanma sırasında (65°C), matris boyunca ve θ' plakaları arasında çok daha ince bir GP bölgeleri dağılımı oluşmuştur. Bu nedenle, T6I4 işleminin bir özelliği, alaşımların mikro yapılarının bir çift yönlü çökelti dağılımı içermesidir (Lumley ve diğ. 2005).



Şekil 2.15: T6I4 sürecinde yaşlanmanın iki aşamasında Al-4Cu'da meydana gelen mikroyapısal değişikliklerin modeli (Lumley ve diğ. 2005)

Al-4Cu alaşımı üzerinde 150°C 'de T6 yaşlanmasının ilk aşamasından sonra, hızlı soğutmayı takiben geleneksel T6 ısıtma işlemine göre daha düşük bir sıcaklıkta (65°C) bekleme periyodunun eklenmesini içeren bir ikili ısıtma işlemi yapılmıştır. Nükleer manyetik rezonans (NMR), 65°C 'de ikincil yaşlanmanın mikro yapıda çok sayıda GP bölgesinin oluşumuna neden olduğunu göstermiştir. 150°C 'de daha fazla

yaşlandırmaya devam edilerek geleneksel T6 işlemiyle elde edilenin üzerinde bir sertlik artışı elde edilmiştir. Bu, mikro yapıda daha ince ve daha yoğun dağılmış çökeltiler ile ilişkilendirilir. Birkaç farklı alüminyum alaşımı üzerinde benzer deneyler yapılmış ve ikincil çökelme olgusunun hepsinde ortak olduğu ortaya çıkmıştır (Lumley ve Morton 2004).



Şekil 2.16: Al-Cu-Mg alaşımı 2014 için kesintili yaşlanma sertlik eğrileri ve mikro yapılar (T6I6 mikro yapısı, bir T6 tavından sonra % 75 daha fazla S fazı içerir) (Lumley ve Morton 2004).

T6I6 temperleme, tam veya kısmi bir T6I4 temperleme işlemine tabi tutulmuş bir alaşım daha sonra en yüksek dayanıma ulaşmak için yüksek bir sıcaklıkta tekrar yaşlandırıldığında tamamlanır. Tipik olarak, bu yaşlanma prosedürü sırasında sertlikte, akma dayanımında ve çekme dayanımında ortalama % 10-15'lik iyileşmeler meydana gelir ve çoğu alaşımda kırılma tokluğunda eş zamanlı gelişmeler olur. Bir Al-Cu-Mg alaşımı olan AA2014 için mikro yapıda meydana gelebilecek değişiklikler, T6I6 ve T6 koşulları için ilgili yaşlanma eğrileri ile birlikte Şekil 2.16'da gösterilmektedir. Çökelti fazlarının (θ' ve $S(S')$) hem boyutu hem de dağılımı, T6I6 temperi ile değiştirilmiştir. Ayrıca, bu fazların kantitatif analizi, T6I6 işleminin bir sonucu olarak $S(S')$ çökeltilerinin sayısının yaklaşık % 75 arttığını göstermiştir (Lumley ve Morton 2004).

Soumyajeet ve diğ. (2023), Al-Cu-Mg alaşımına kesintili yaşlandırma işlemleri uygulayarak bu işlemin mekanik özelliklere ve korozyon davranışına etkilerini incelemiştir. Bu alaşımı öncelikle 490°C'de 1 saat çözeltiye almışlardır ve ardından

alaşımı kesintili yaşlandırma adımları olan T6 ısıtma işlemi için 0,5 saat 180°C'de, T6I4 temperi için 65°C'de 14 gün ve son olarak T6I6 temper için 180°C'de 6 saat tuttukten sonra soğutmuşlardır. Alaşımın sertliği 64,6 HRB sertliğinden T6 ile 67,5 HRB sertliğe yükselmiş olup T6I4 durumunda 71 HRB, T6I6 temperinde 82 HRB sertliğe ulaşılmıştır. T6I6 temperinin (82 HRB) biraz daha yüksek sertlik değerini, daha yüksek sayıda GP bölgesinin ve çok ince θ'' fazının oluşumuna bağlamışlardır. Bunun da 180°C'de yaşlanmanın son aşamasında daha fazla sayıda çökelmeye ve daha homojen bir dağılıma yol açtığını bulmuşlardır. Çözelti durumunda 388 MPa olan çekme dayanımı T6 ile 393 MPa, T6I4 ile 455 MPa, T6I6 ile 466 MPa'a ulaşarak kesintili yaşlandırmanın olumlu etkisi kanıtlanmıştır (Soumyajeet ve diğ. 2023).

Su ve diğ. (2023) yaptıkları çalışmada; döküm Al-Cu-Mg (% 4,78 Cu-% 1,52 Mg-% 0,48 Mn-% 0,28 Fe-% 0,13 Si) alaşımına daha ileri özellikler kazandırmak için ikincil yaşlandırma uygulamışlardır. Numunelere çeşitli sıcaklık ve sürelerde T6, T6I4 ve T6I6 ısıtma işlemleri uygulanmıştır. Optimum T6I6 (T6I180 °C'de 2 saat, T6I4 90 °C'de 30 dakika kesintili yaşlandırma ve T6I6 170 °C'de 4 saat) işlemine sahip alaşımın çekme dayanımı ve sertliği sırasıyla 443,6 MPa ve 161.6 HV'dir. Çalışmanın sonucunda, kesintili yaşlandırmanın özelliklere olumlu etkisi olduğu belirlenmiştir. İkincil çökeltme, T6I6 alaşımdaki dayanım artırıcı fazları çoğaltabilir. Döküm Al-Cu-Mg alaşımının mekanik özelliklerindeki gelişmenin, temel olarak T6I6 işleminden sonra ince ve düzgün S fazı ve θ' fazının bir arada bulunmasından kaynaklandığı tespit edilmiştir (Su ve diğ. 2023).

Zhang ve diğ. (2023) çalışmalarında; T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma işleminin AA7075 alüminyum alaşımının işlenebilirliği ve takım aşınma mekanizması üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Yaptıkları çalışmada numuneler ilk olarak 475 °C'de 12 saat çözeltiye alma ardından 140 °C'de 1 saat tutulduktan sonra soğutma uygulanmıştır. T6I4 işlemi 65 °C'de 168 saat süre ile yapılmış ve T6I6 işlemi T6I4 üzerine 140 °C'de 1 saat daha tutma ve soğutma şeklinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonucunda T6 yaşlandırma ile karşılaştırıldığında, T6I4 ve T6I6'nın AA7075 alüminyum alaşımının işlenebilirliğini büyük ölçüde iyileştirdiğini göstermektedir. Aynı kesme parametreleri altında, AA7075-T6I4 ve AA7075-T6I6 alaşımlarının daha düşük kesme kuvvetine, kesme sıcaklığına ve yüzey pürüzlülüğüne sahip olduğunu ve AA7075-T6I4 alaşımının en iyi performansı gösterdiğini bulmuşlardır. XRD analizi,

kesme sırasında AA7075 alüminyum alaşımının çökeltilerinin birincil olarak η -fazları olduğunu gösterir. AA7075-T6I4 alaşımının ikincil çökelti faz oranının, diğer iki ısıtım işlem durumundan önemli ölçüde daha yüksek olup, tane boyutunun da daha küçük olduğu belirlenmiştir (Zhang ve diğ. 2023).

Lumley ve diğ. yaptıkları çalışmalarda, uyguladıkları farklı ısıtım işlem prosesleriyle geniş bir alaşım yelpazesinde, geliştirilmiş kırılma tokluğu ile birlikte uzama ve çekme dayanımı artışı elde etmişlerdir. T6I6 işleminin, AA2014 ve AA7050 alaşımları için % 5, AA6061, AA6013 ve AA8090 alaşımları için % 12 ve döküm alaşımı 357 için % 19 arasında değişen değerlerle akma dayanımını arttırdığı bulunmuştur. Çekme dayanımındaki artışlar AA7050 için % 3 ile AA8090 için % 14 arasında değişmiştir. Bu etkiler öncelikle kesintili yaşlandırma sonrasında elde edilen mikro yapılarda daha ince dağılmış çökeltilerin oluşumunu teşvik etmesi nedeniyle ortaya çıkmıştır. Dövme alaşımların kırılma tokluğunda T6 temper için elde edilen değerlerle karşılaştırıldığında AA7050 için % 9'dan AA6061 için % 60'a kadar değişen önemli gelişmelere yol açtığını göstermektedir. Farklı alüminyum alaşımları için yapılan çalışmalarda T6I4 yaşlandırma safhasında malzemenin mekanik özelliklerinin T6'ya göre iyileştirildiği gözlemlenmiştir. AA2001 alaşımı için çekme dayanımı % 12, kopma uzaması ise % 63 olarak belirlenmiş, A357 döküm alaşımı için ise kırılma dayanımında % 41 oranında artış gözlemlenmiştir (Lumley ve diğ. 2003) (Lumley ve diğ. 2005).

Bahrami ve diğ. (2008) yapmış oldukları çalışmada; kesintili yaşlandırmanın ilk evresi olan T6I4 aşamasındaki sıcaklığın 50 °C'nin altında olduğunda mekanik özelliklerin çok az miktarlarda değiştiğini tespit etmişlerdir. Bu yüzden bu çalışmada kesintili yaşlandırma sıcaklığını 65°C olarak seçmişlerdir (Bahrami ve diğ. 2008).

Staszczuk ve diğ. (2019), AA2024 alaşımını 4 saat boyunca 500 °C'de çözeltiye almışlar ve oda sıcaklığında soğutmuşlardır. Ardından 180 °C'de 10 saat süreyle T6 yaşlandırma işlemi uygulamışlardır. Daha sonra 25 °C'de 1 hafta ve 180 °C'de 5 saat T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma ısıtım işlemleri uygulamışlardır. Bazı haldeki alaşımın sertliği 110 HV'den T6 durumunda 138 HV'ye yükselmiştir. T6I6 kesintili yaşlandırma durumunda ise sertlikte bir miktar düşüş yaşanarak 135 HV seviyesine gerilemiştir (Staszczuk ve diğ. 2019).

Kaczmarek ve diğ. (2013) yaptıkları kapsamlı çalışmada; AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarının, T6, T6I6 veya T6I4 işlemiyle çukurlaşmaya karşı dirençlerini incelemişlerdir. İki aşamalı yapay yaşlandırma işlemi kullanılarak çökeltilerin dağılımını optimize ederek nispeten yüksek akma dayanımı 520 MPa ve yüksek nihai uzama yaklaşık % 20 ile sertliği AA7075 alaşımı için 190 HV'ye kadar artırmanın mümkün olduğunu ortaya koymuşlardır. AA2024 ve AA7075 alaşımlarının morfolojik gözlemi, iki aşamalı yaşlandırma (T6I4, T6I6) uygulamasının önemli miktarda küçük çökelti oluşumuna neden olduğunu kanıtlamıştır. Tek aşamalı yaşlanma (T6) sırasında ortaya çıkan fazların, iki aşamalı işlem sırasında ortaya çıkanlara göre daha az çökeldiği ve boyut olarak daha büyük olduğu gözlenmiştir. Çalışma AA2024 alaşımı için hem T6I4 hem de T6I6 işlemi için 160 HV_{0,1} maksimum sertliğin elde edilmesiyle sonuçlanmıştır. AA7075 alaşımında sırasıyla T6I4 ve T6I6 için 170 HV_{0,1} ve 186 HV_{0,1} maksimum sertlik elde edilmiştir. En iyi dayanım parametreleri, akma dayanımının 300MPa ve kırılma anındaki maksimum uzamanın % 42 seviyesinde olduğu T6I6 işleminden sonra elde edilmiştir. Benzer özellikler T6I4 işleminden sonra sırasıyla 299 MPa ve % 36 olarak elde edilmiştir. Bu değerler T6 işleminin 289MPa ve % 33 değerleriyle karşılaştırıldığında, iki aşamalı yaşlandırma işleminin AA2024 alaşımının çatlamaya karşı direncinde % 33'ten % 42'ye önemli bir artış ve mukavemetlendirme ile sonuçlandığı kanıtlanmıştır (Kaczmarek ve diğ. 2013).

Baksan ve diğ. (2020), AA7075 alüminyum alaşımında aralıklı yaşlanmanın dayanımı ne kadar arttırabileceğini gözlemlemişlerdir. Bunun için öncelikle 500 °C 'de 96 saat homojenizasyon işleminin ardından 500°C 'de 4 saat çözeltiye alma uygulanıp numuneler oda sıcaklığında soğutulmuştur. T6 ısıt işlemi için de 120°C 'de 24 saat yaşlandırılmıştır. T6 ısıt işleminden sonra 100°C 'de 2, 4 ve 6 saat boyunca T6I4 yaşlandırma ısıt işlemi yapmışlardır. Bu çalışmada elde edilen sertlikteki artış, normal yaşlandırılmış olanlara göre % 10'dan fazla olarak elde edilmiştir ve 100 °C 'de 6 saat T6I4 işlemi 197 HV pik sertliği ile sonuçlanmıştır (Baksan ve diğ. 2020).

Wang ve diğ. (2021), kesintili yaşlandırmanın Al-4.5Cu-3.5Zn-0.5Mg alaşımının mikro yapısına ve mekanik özelliklerine etkisini araştırmışlardır. Numuneler, 5 saat boyunca 515°C'de katı çözeltiyle işleme tabi tutulup, ardından oda sıcaklığında suda hızlı soğutulmuştur. Numuneler farklı koşullar altında

yaşlandırılmıştır. İzotermal yaşlandırma 170°C'de çeşitli zamanlarda gerçekleştirilirken, kesintili yaşlandırma 170°C'de 1 saat birincil yaşlandırmayı, ardından oda sıcaklığındaki suda soğutmayı ve çeşitli zamanlarda 150°C'de ikincil yaşlandırmayı içermektedir. T6 numunesinin nihai çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzaması sırasıyla 405,5 MPa, 341,6 MPa ve % 10,9 iken, T6I4 örneğinin çekme dayanımı 420,2 MPa, akma dayanımı 368,5 MPa, ve kopma uzaması % 12,0'ye yükselmiştir. Çekme kırılma morfolojilerinin SEM görüntüleri, T6 ve T6I4 numunelerinde farklı boyut ve şekillerde birçok çukuru ortaya çıkarmaktadır. T6I4 numunesindeki çukurlar, T6 numunesindekilerden daha küçük ve daha derindir, bu da alaşımın dayanımının ve plastisitesinin kesintili yaşlanma ile arttığını gösterir. Bu gözlemin, çekme sonuçlarıyla tutarlı olduğu belirlenmiştir (Wang ve diğ. 2021).

Lumley ve diğ. (2005) tarafından yapılan çalışmada ise, bir Al-Cu-Mg alaşımı olan AA2014 dövme alaşımı için mikro yapıda meydana gelebilecek değişiklikler incelenmiştir. Çalışmada, T6I6 ve T6 koşulları için çökelti fazlarının (θ' ve $S(S')$) hem boyutları hem de dağılımı T6I6 temper tarafından modifiye edilmiştir. Ayrıca, bu fazların nicel analizi, T6I6 işleminin bir sonucu olarak $S(S')$ çökeltilerinin sayısının yaklaşık % 75 arttığını göstermiştir. AA2014 alaşımının T6 durumunda akma dayanımı 414 MPa, çekme dayanımı 488 MPa iken T6I6 durumunda sırasıyla 436 MPa ve 526 MPa'a yükselmiştir (Lumley ve diğ. 2005).

Lipa ve diğ. (2019), AA2024 alüminyum alaşımına farklı birçok süre ve sıcaklıklarda T6, T6I4 (25°C ve 65°C) ve T6I6 (80°C, 120°C ve 160°C) yaşlandırma işlemleri uygulayarak, bu işlemlerin mekanik dayanım üzerine etkilerini incelemişlerdir. T6 temperinde 150 HV sertlik elde eden araştırmacılar kesintili yaşlandırma sonucunda 160 HV sertlik değerinin üzerine çıkmışlardır. T6 durumunda 462 MPa çekme dayanımı, % 32,9 kopma uzaması değerleri elde etmişlerdir. T6I4 temperinde 472,2 MPa çekme dayanımı, % 36,2 kopma uzaması, T6I6 temperinde ise 483,8 MPa çekme dayanımı ve % 42,2 kopma uzaması değerleri tespit etmişlerdir. Kesintili yaşlandırma sonucundaki mekanik özelliklerin artışını malzemede oluşan çökeltilerin boyutu, dağılımı ve büyüklüğü ile ilgili olduğunu açıklamışlardır. T6 sırasında oluşan fazların T6I4 ve T6I6'da oluşan fazlara göre daha az, boyutlarının ise daha büyük olduğu gözlemlenmiştir (Lipa ve diğ. 2019).

3. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

3.1 Kullanılan Alüminyum Alaşımları

Bu tez kapsamında AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarına kesintili yaşlandırma işlemleri uygulanarak alüminyum alaşımları üzerindeki etkisi detaylı olarak incelenmiştir. Çalışmada kullanılan alaşımlar ticari olarak Seykoç Alüminyum Paz. ve San. Tic. Ltd. Şti. firmasından farklı boyut, form ve temper sınıflarında temin edilmiştir. Temin edilen malzemelerin boyut, form ve temper sınıfı bilgileri Tablo 3.1’de, alaşımların kimyasal bileşimleri Tablo 3.2’de verilmiştir.

Tablo 3.1: Temin edilen alaşımların boyut, şekil ve temper sınıfları

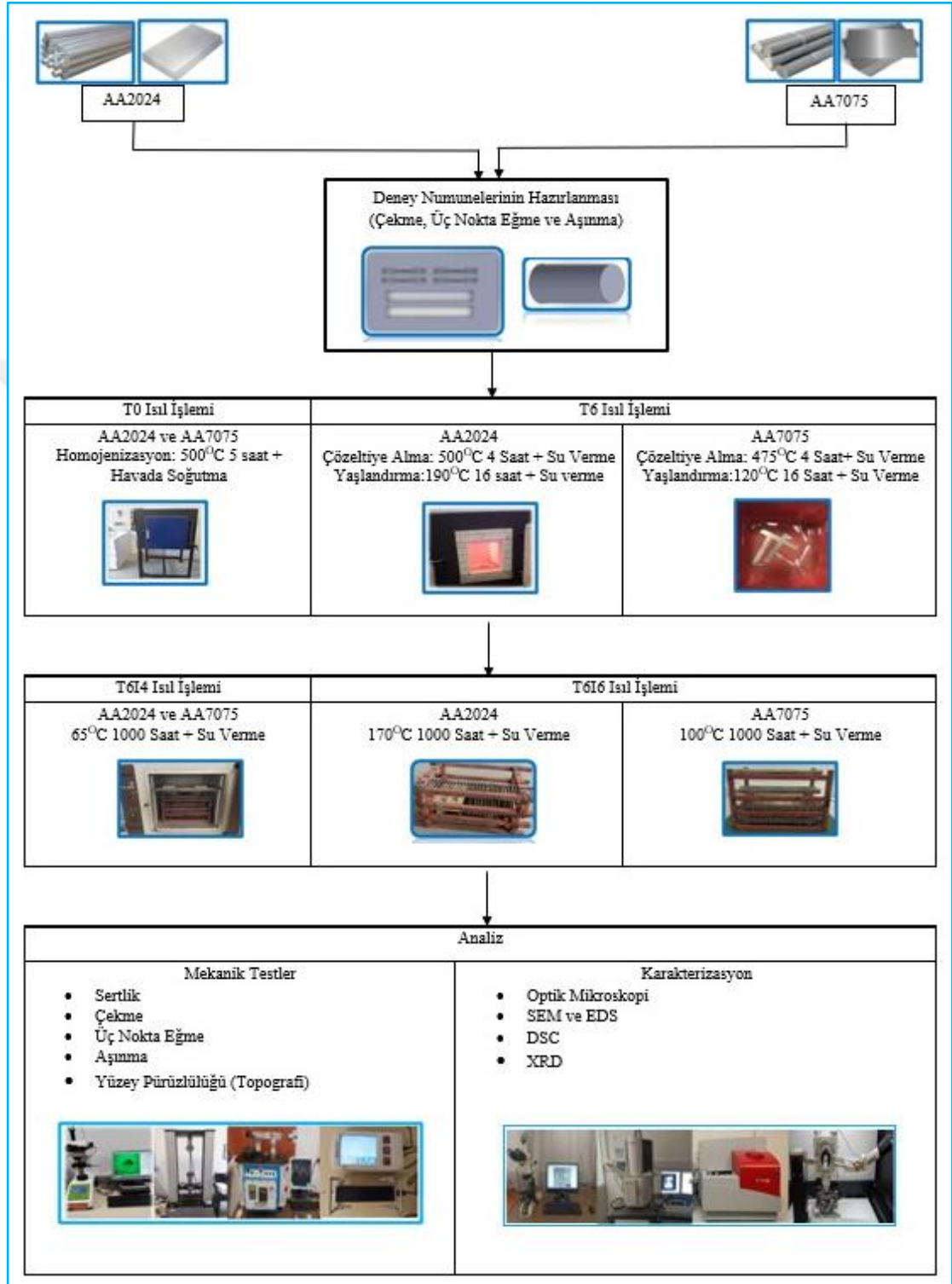
Malzeme ve Temper	Boyut (mm)
2024 Levha T3	4x1000x600
2024 Çubuk T351	Ø25,4x3050
7075 Levha T651	5x78x1000
7075 Levha T651	5x195x1000
7075 Levha T651	5x227x1250
7075 Çubuk T6	Ø10x3000

Tablo 3.2: Çalışmada kullanılan alaşımların kimyasal bileşimleri (%)

Alaşım	Cu	Zn	Mg	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al
2024 Çubuk	3,928	0,021	1,282	0,370	0,146	0,523	0,003	0,018	Kalan
2024 Levha	4,3	0,09	1,4	0,06	0,11	0,5	0,00	0,04	Kalan
7075 Çubuk	1,62	5,7	2,65	0,175	0,0526	0,046	0,237	0,0481	Kalan
7075 Levha	1,5	5,8	2,5	0,14	0,07	0,06	0,18	0,02	Kalan

3.2 Çalışmada Uygulanan Deney Akış Planı

Tez kapsamında kullanılan deney akış planı Şekil 3.1’de gösterilmiştir



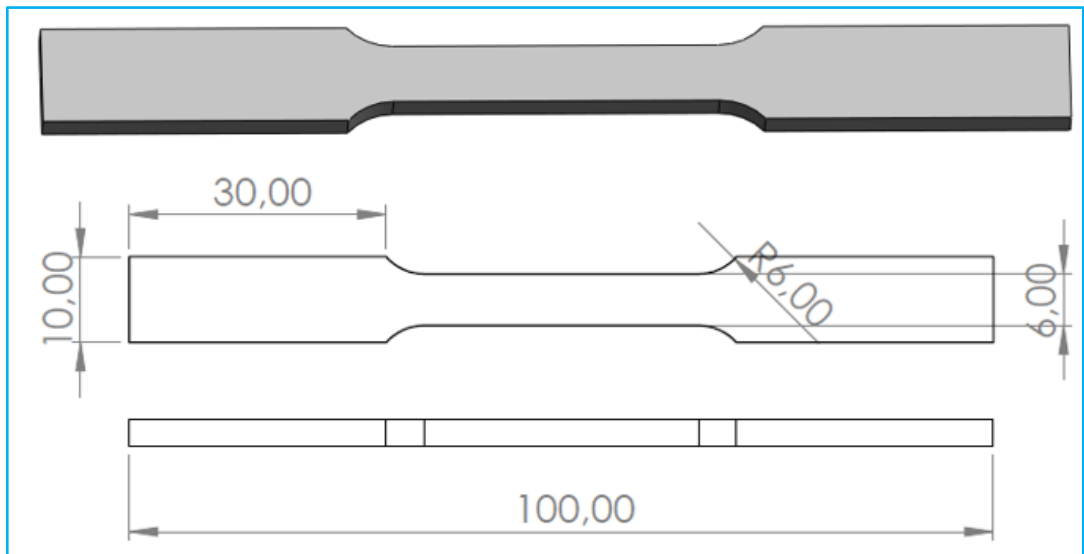
Şekil 3.1: Deney akış planı

3.3 Deney Numunelerinin Hazırlanması

Temin edilen alaşımlar; çekme, üç nokta eğme ve aşınma deneylerine tabi tutulabilmesi için ilgili standartlara uygun olarak numuneler hazırlanmıştır. Hazırlanan bu numuneler T6, T6I4 ve T6I6 ısıtıl işlemlerine tabi tutulmuşlardır. Temin edilen alaşımlar farklı temper sınıflarında olduğundan dolayı öncelikle bütün numuneler T0 temper haline getirilmesi için homojenizasyon yapılmıştır. Daha sonra farklı literatür çalışmalarının bir optimizasyonu olarak farklı süre ve sıcaklık parametrelerinde konvansiyonel T6 yaşlandırma ısıtıl işlemi uygulanmıştır. T6 numunelere sırasıyla T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma işlemleri farklı sıcaklık ve süre parametrelerinde uygulanmış ve numunelere sertlik ölçümleri ile çekme, üç nokta eğme ve aşınma testleri uygulanarak sonuçlar yorumlanmıştır.

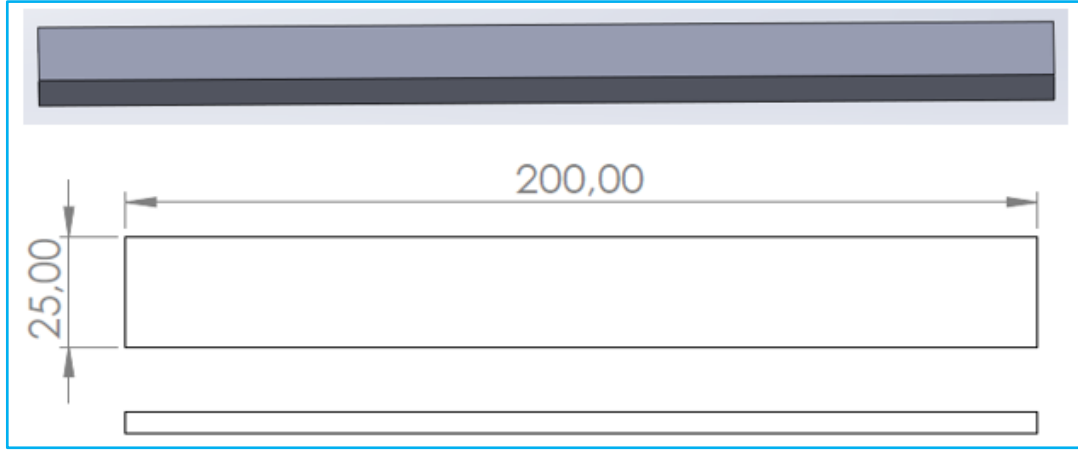
3.3.1 Çekme ve Üç Nokta Eğme Deney Numunelerinin Hazırlanması

Levha olarak temin edilen AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarından çekme numuneleri ASTM E8/E8M-09 standardına göre, üç nokta eğme numuneleri ise TS EN ISO 7438-2020 standardına göre Fatih Profil A. Ş. firmasında lazer kesim yöntemi ile hazırlanmıştır. Çalışmada kullanılan çekme numunesinin ölçüleri Şekil 3.2’de gösterilmiştir.



Şekil 3.2: Standartta göre belirlenen çekme numunesi ölçüleri

TS EN ISO 7438-2020 standardına göre belirlenen üç nokta eğme numunesi ölçüleri Şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Standartta göre belirlenen üç nokta eğme numunesi ölçüleri

Tez kapsamında;

- AA2024 alaşımından 66'şar adet çekme ve eğme numunesi,
- AA7075 alaşımından 66'şar adet çekme ve eğme numunesi,

olmak üzere toplamda 264 adet test numunesi hazırlanmıştır.

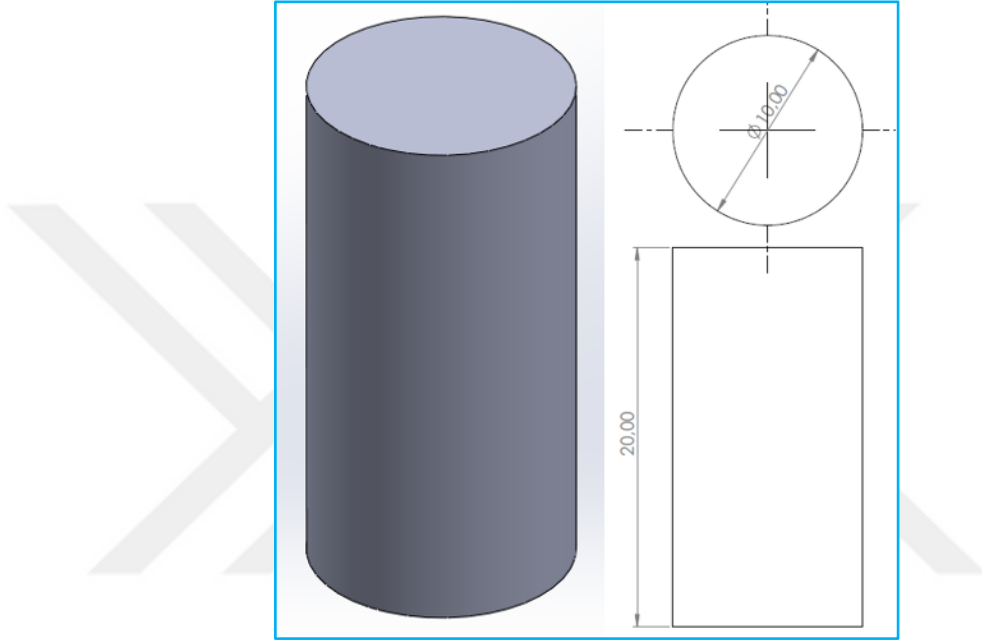
Belirlenen deney numunesi boyutları temin edilen levhalar üzerinden Fatih Profil A. Ş. firmasında alüminyum malzemeye uygun lazer gücü seçilerek numuneler hazırlanmıştır. Şekil 3.4'te levha üzerinden numunelerin çıkarılması şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4: Levha üzerinden çekme ve üç nokta eğme numunelerinin çıkarılması

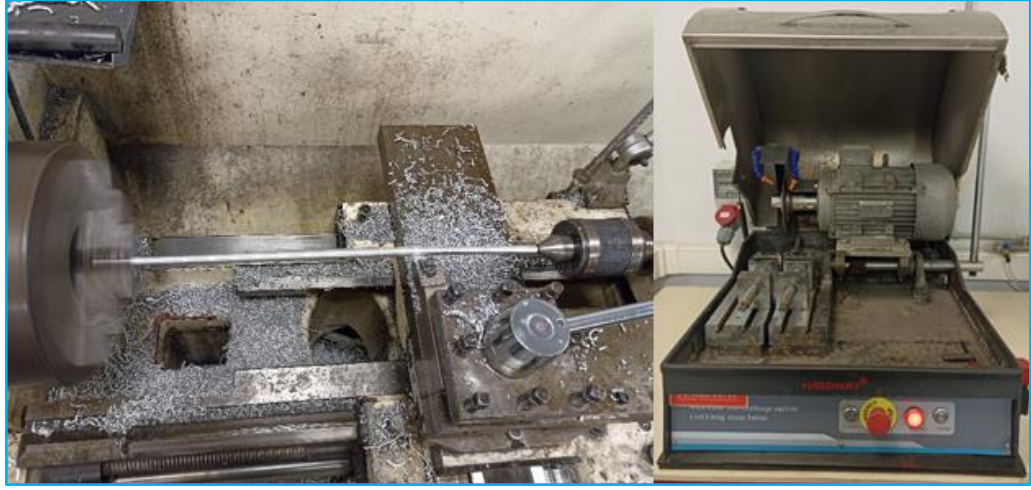
3.3.2 Aşınma Deney Numunelerinin Hazırlanması

Aşınma deney numunelerinin boyutları ASTM G99-17 standardına (ASTM G99-17 2017) göre belirlenmiş ve belirlenen ölçülere universal torna tezgâhı ve hassas kesme cihazı kullanılarak getirilmiştir. Hazırlanan numunelere pin-on-disk test cihazında aşınma testi uygulanmıştır. Şekil 3.5'te aşınma numunesinin boyutları verilmiştir.



Şekil 3.5: Çalışmada kullanılan aşınma deney numunesi boyutları

AA2024 çubuk alüminyum alaşımı Ø25 mm çapında temin edildiğinden dolayı universal torna tezgâhında işlenerek Ø10 mm'ye düşürülmüştür. AA7075 çubuk alüminyum alaşımı ise doğrudan Ø10 mm çapında temin edildiğinden dolayı sadece 20 mm uzunluğunda hassas kesme cihazında kesilmişlerdir. Bu işlemler ile 66'şar adet AA2024 alaşımı ve AA7075 alaşımı olmak üzere, toplamda 132 adet aşınma deney numunesi elde edilmiştir. Şekil 3.6'da aşınma numunesinin hazırlanmasında kullanılan universal torna tezgâhı ve hassas kesme cihazı gösterilmiştir.



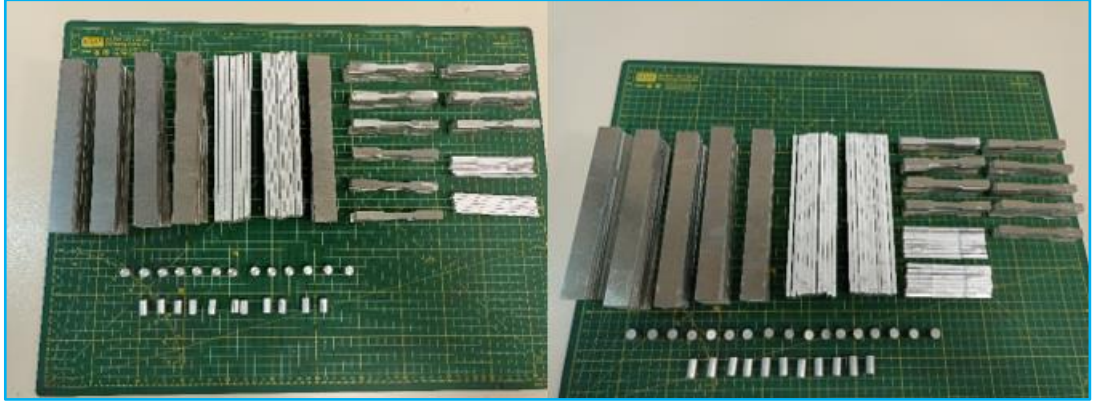
Şekil 3.6: Aşınma numunesi hazırlanmasında kullanılan universal torna tezgâhı ve hassas kesme cihazı

Torna tezgâhı ve hassas kesme cihazı kullanılarak hazırlanan numunelerin işlem öncesi ve sonrası halleri Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7: Çubuk alüminyum alaşımları ve aşınma numuneleri

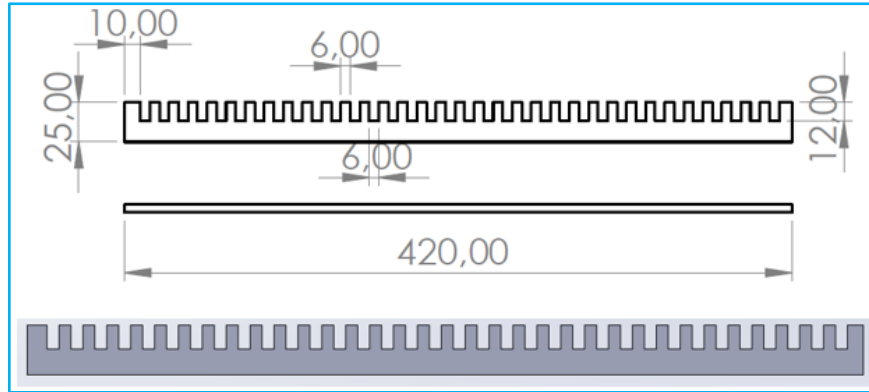
Levha ve çubuk şeklinde temin edilen AA2024 ve AA7075 alaşımları gerek lazer kesim gerekse tornalama ve kesme gibi işlemlerden geçirilerek deney numunelerinin tamamı hazırlanmıştır. AA2024 alaşımından 66’şar adet çekme-eğme-aşınma numunesi, AA7075 alaşımından da 66’şar adet çekme-eğme-aşınma numunesi olmak üzere toplamda 396 adet numune bu tez kapsamında deneye tabi tutulmak üzere hazırlanmıştır. Tez kapsamında kullanılan alüminyum alaşımlarına ait deney numunelerinin tamamı Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8: Hazırlanan AA 2024 (sol) deney numuneleri, AA 7075 (sağ) deney numuneleri

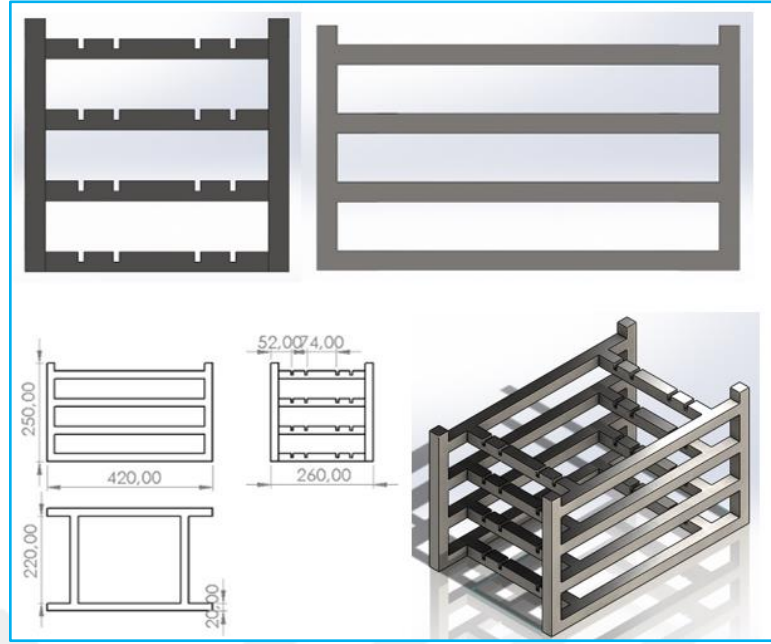
3.3.3 Deney Numunelerinin Yerleştirildiği Platformun Tasarımı

Tüm hazırlanan numunelere ısı işlem yapılacağından dolayı; fırın kapasitesini iyi kullanabilmek, numunelerin birbiri ile temasını engelleyerek doğru bir ısı iletimi sağlanabilmesi ve belirli saatlerle fırından alınacak numunelerin kolaylıkla çıkartılabilmesi için numunelerin konulabileceği bir platform sistemi tasarlanmıştır. Şekil 3.9’da çekme ve üç nokta eğme numunelerini yerleştirmek üzere tasarlanan aparat görülmektedir.



Şekil 3.9: Numunelerin yerleştirileceği aparat

Bu aparatın yerleştirilip numunelerin üzerine dizilebilmesi için 20x20 mm boyutlarında kare profillerden dört katlı bir platform sistemi tasarlanıp kaynaklanarak imal edilmiştir. Şekil 3.10’da tasarlanan platform sistemi ve ölçüleri verilmiştir.



Şekil 3.10: Numunelerin yerleştirildiği platform sistemi

Tasarlanan platform sistemine AA2024 ve AA7075 alaşımından çekme ve üç nokta eğme numunelerinin tamamı yerleştirilmiştir. Aşınma numuneleri ise ateş tuğlaları üzerine yerleştirilerek fırına konulmuşlardır. Deney numunelerinin platforma yerleştirilmiş hali Şekil 3.11’de görülmektedir.



Şekil 3.11: Tasarlanan platforma deney numunelerinin yerleştirilmiş hali

3.4 Isıl İşlemler

Deney numuneleri homojenleştirme ısı işlemi, çözeltiye alma işlemi, su verme ve yaşlandırma aşamalarından oluşan konvansiyonel T6 ısı işlemine tabi

tutulmuşlardır. Daha sonra tezin ana kapsamı olan kesintili yaşlandırma işleminin adımları olan T6I4 ve T6I6 ısıt işlemleri gerçekleştirilmiştir.

3.4.1 Homojenleştirme ve T6 Isıl İşlemi Optimizasyonu

T3, T351 ve T651 ısıt işlem formatlarında ticari olarak temin edilen alüminyum alaşımlarına ilk olarak “Homojenleştirme” ısıt işlemi uygulanmış olup, numuneler literatüre uygun olarak 500°C’de 4 saat boyunca fırında tutulmuş ve ardından hava ortamında yavaş soğutulmuştur. Homojenleştirme ısıt işlemi PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Isıl İşlem ve Döküm Laboratuvarı’nda bulunan 1200°C ısıtma kapasiteli ısıt işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Homojenleştirme sonrası numunelere T6 ısıt işlemi basamakları olan çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma ısıt işlemleri uygulanmıştır. Çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma işlemleri farklı sıcaklıklar ve sürelerde uygulanarak en yüksek sertlik değerini elde edebilmek için optimizasyon yapılmıştır. En uygun sertlik değerlerinin elde edilmesinde uygulanan T6 ısıt işlem sıcaklık ve süre parametreleri Tablo 3.3’te verilmiştir.

Tablo 3.3: T6 ısıt işlem optimizasyon sıcaklık-süre parametreleri

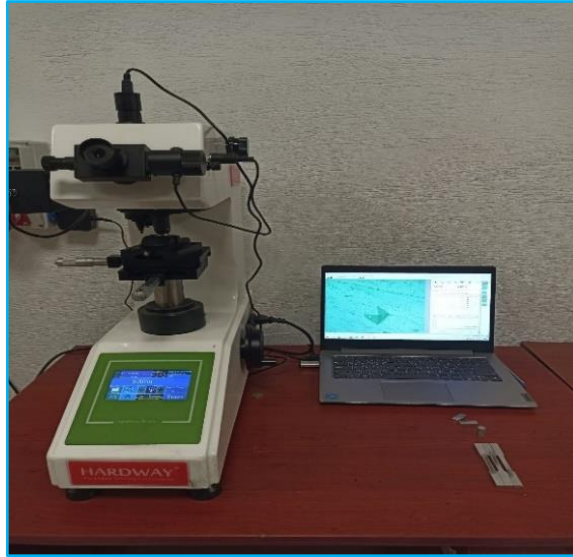
Deney No	Alaşım → Isıl İşlem ↓	AA2024	AA7075
1	Çözeltiye alma	475°C 3 h	475°C 3 h
	Yaşlandırma	180°C 3-6-9-12-15-18-21 h	120°C 3-6-9-12-15-18-21 h
2	Çözeltiye alma	485°C 2 h	485°C 2 h
	Yaşlandırma	190°C 4-8-12-16-20-24 h	120°C 4-8-12-16-20-24 h
3	Çözeltiye alma	500°C 4 h	475°C 4 h
	Yaşlandırma	190°C 4-8-12-16-20-24 h	120°C 4-8-12-16-20-24 h

T6 ısıt işlemi PAÜ Teknoloji Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü Takım Tezgâhları Atölyesi’nde bulunan ve Şekil 3.12’de gösterilen Protherm marka 1200°C sıcaklığa ulaşabilen ısıt işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları her bir alaşımdan üçer adet deney numuneleri ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.12: T6 ısıt işlemler optimizasyonu çalışmasının yapıldığı ısıt işlemler fırını

T6 ısıt işlemler uygulanan numunelerin sertlik değlerleri PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan mikro Vickers cihazında $HV_{0.1}$ olarak ölçülmüştür. Şekil 3.13'te mikro Vickers sertlik cihazı görülmektedir. Sertlik ölçümleri çekme, üç nokta eğme ve aşınma numunelerinden 6'şar adet sertlik ölçümünün ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Böylece en doğru ve homojen sertlik değlerin bulunması amaçlanmıştır.



Şekil 3.13: Mikro Vickers sertlik cihazı

3.4.2 Kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6)

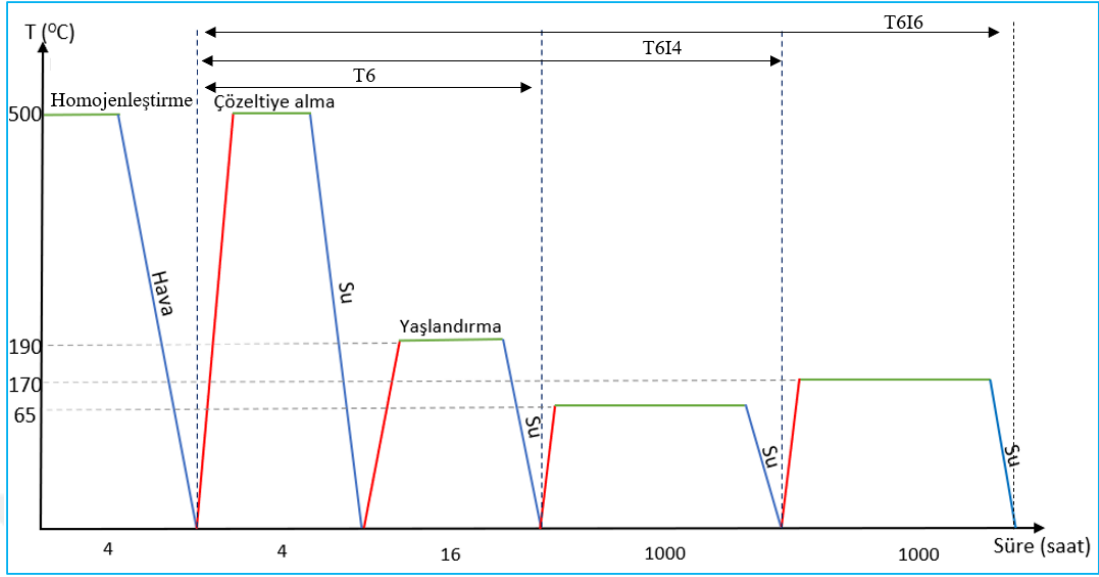
T6 ısıı işlemi sonrası sertliği ve dayanımı iyileştirilen numuneler; daha yüksek sertlik, çekme ve akma dayanımı elde etmek ve tokluk, süneklik gibi özellikleri iyileştirmek için kesintili yaşlandırma ısıı işlemine tabi tutulmuştur. T6I4 ve T6I6 temperinde gerçekteştirilen kesintili yaşlandırma ısıı işlemleri 1000 saat (yaklaşık 42 gün) süreyle uygulanmıştır. 1000'er saat yapılan ısıı işlemler sırasında numuneler 100'er saat arayla fırından alınarak oda sıcaklığındaki su ile hızlı soğutma yapılmıştır. Bu ısıı işlemler ile belirli aralıklarla fırından çıkartılan numune sayıları Tablo 3.4'te verilmiştir. Yapılan ısıı işlemler (T6, T6I4 ve T6I6) toplamda 2800 saat (yaklaşık 177 gün) sürmüş ve 396 adet gibi fazla sayıda numune ile çalışmanın kolaylaştırılması için ısıı işlem ve deney numune sayıları planı oluşturulmuştur.

Tablo 3.4'te görüldüğü üzere, her bir yaşlandırma temper uygulaması için üçer adet çekme, eğme ve aşınma numunesi hazırlanmış olup, sonuçlar üçer adet ölçümün ortalaması olarak elde edilmiştir. T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma işlemlerinde 100'er saat arayla fırından alınan numuneler belirlenen ısıı işlem proseslerine uygun olarak ölçümlere tabi tutulmuştur.

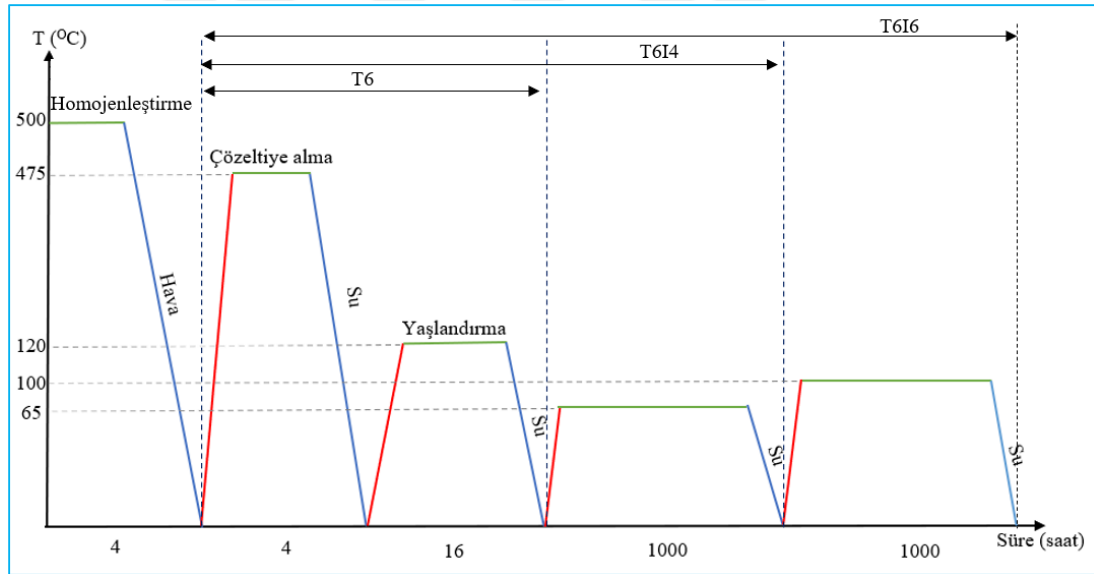
Tablo 3.4: Isıl işlem parametrelerine bağlı olarak numune sayıları

AA2024 (T6 190°C 16 h)																							
Deneyle ↓	T0	T6	T6I4 (T6+65°C)										T6I6 (T6+T6I4+170°C)										Toplam Numune Sayısı 198
			SÜRE (SAAT)										SÜRE (SAAT)										
			100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
Çekme	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	66
Eğme	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	66
Aşınma	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	66
AA7075 (T6 120°C 16 h)																							
Deneyle ↓	T0	T6	T6I4 (T6+65°C)										T6I6 (T6+T6I4+170°C)										Toplam Numune Sayısı 198
			SÜRE (SAAT)										SÜRE (SAAT)										
			100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	
Çekme	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	66
Eğme	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	66
Aşınma	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	66

Şekil 3.14’de AA2024 alüminyum alaşımına ve Şekil 3.15’de AA7075 alaşımına uygulanan ısıt işlemlerin grafikleri verilmiştir.



Şekil 3.14: AA2024 alaşımına ait uygulanan ısıt işlem grafiği



Şekil 3.15: AA7075 alaşımına ait uygulanan ısıt işlem grafiği

AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan T6 ısıt işleminden sonra deney numunelerine kesintili yaşlandırmanın ilk adımı olan T6I4 ısıt işlemi uygulanmıştır. T6I4 ısıt işlemi PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Isıl İşlem ve Döküm Laboratuvarı’nda bulunan Nüve FN-500 marka fanlı etüv fırını kullanılarak yapılmıştır. Şekil 3.16’da T6I4 ısıt işleminin yapıldığı etüv fırını ve deney numunelerinin raf sistemindeki yerleşimi gösterilmiştir.



Şekil 3.16: T6I4 ısıt işleminin AA2024 ve AA7075 alaşımlarına uygulanması

T6I4 ısıt işlemini için AA2024 alaşımından 90 adet (30 adet çekme, 30 adet üç nokta eğme, 30 adet aşınma numuneleri), AA7075 alaşımından yine 90 adet (30 adet çekme, 30 adet üç nokta eğme, 30 adet aşınma numuneleri), toplamda 180 adet numune 65°C'de 100'er saat arayla toplamda 1000 saat ısıt işleme tabi tutulmuşlardır. Her 100 saat arayla AA2024 ve AA7075 alaşımından 3'er adet çekme ve üç nokta eğme numunesi 3 adet aşınma numunesi fırından alınarak oda sıcaklığındaki su ile soğutulmuşlardır. T6I4 ısıt işleminde sırasında her 100 saatte çıkartılan numunelerin sertlikleri ölçülmüştür. Bu sertlik ölçme sonucunda AA2024 alaşımı için 800. saat en iyi sonucu vermiştir. AA7075 alaşımında ise en iyi sonuçlar 700. saatte elde edilmiştir.

T6I6 ısıt işlemini için de 90 adet AA2024 (30 adet çekme, 30 adet üç nokta eğme ve 30 adet aşınma) ve numunelerine ilk olarak homojenleştirme ve ardından optimize edilen süre ve sıcaklıkta T6 ısıt işleminde sonrasında ise 800 saat olarak belirlenen T6I4 ısıt işleminde uygulandıktan sonra 170°C'de 100'er saat arayla toplamda 1000 saat ısıt işlem uygulanmıştır. AA2024 alaşımına T6I6 ısıt işleminde PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Isıl İşlem ve Döküm Laboratuvarı'nda bulunan 1200°C kapasiteli ısıt işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.17'de AA2024 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işleminin yapıldığı ısıt işlem fırını ve numuneler görülmektedir.



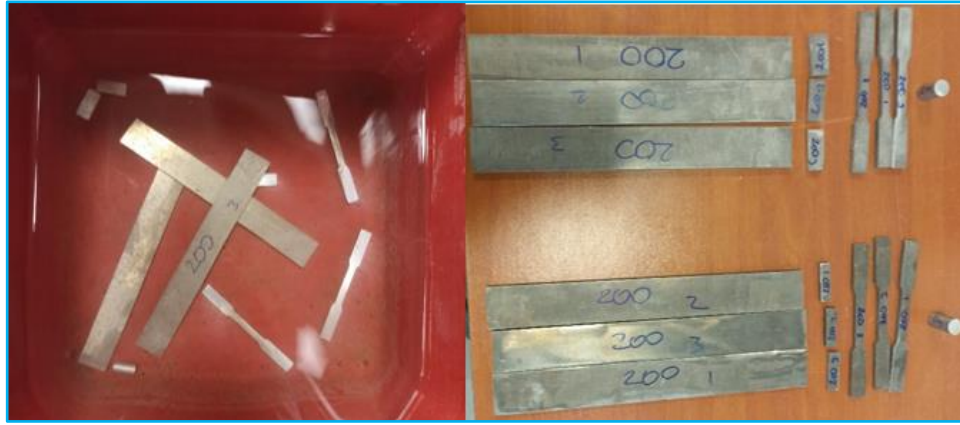
Şekil 3.17: AA2024 alaşımların T6I6 ısıtılmasının uygulanması ve deney numuneleri

90 adet AA7075 alaşımı içinde (30 adet çekme, 30 adet üç nokta eğme ve 30 adet aşınma) numuneye ilk olarak homojenleştirme ve ardından optimize edilen süre ve sıcaklıkta T6 ısıtılma işlemi sonrasında ise 700 saat olarak belirlenen T6I4 ısıtılma işlemi uygulandıktan sonra 100°C'de 100'er saat arayla toplamda 1000 saat ısıtılma işlemi uygulanmıştır. AA7075 alaşımına T6I6 ısıtılma işlemi PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Isıl İşlem ve Döküm Laboratuvarı'nda bulunan 250°C'ye çıkabilen fanlı etüv fırınında gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.18'de AA7075 alaşımına uygulanan T6I6 ısıtılma işleminin yapıldığı etüv fırını ve numuneler görülmektedir.



Şekil 3.18: AA7075 alaşımına T6I6 ısıtılmasının uygulanması ve deney numuneleri

T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma işlemleri uygulanırken 100'er saat arayla çıkartılan 3'er adet çekme, üç nokta eğme ve aşınma numunesi oda sıcaklığındaki su ile hızlı bir şekilde soğutulmuşlardır. Numunelere ısıtılma işlem süreleri yazılarak metalografik ve karakterizasyon işlemleri için ayrılmışlardır. Şekil 3.19'da deney numunelerinin soğutulması ve kodlanması görülmektedir.



Şekil 3.19: Deney numunelerinin soğutulması ve kodlanması

3.5 Karakterizasyon

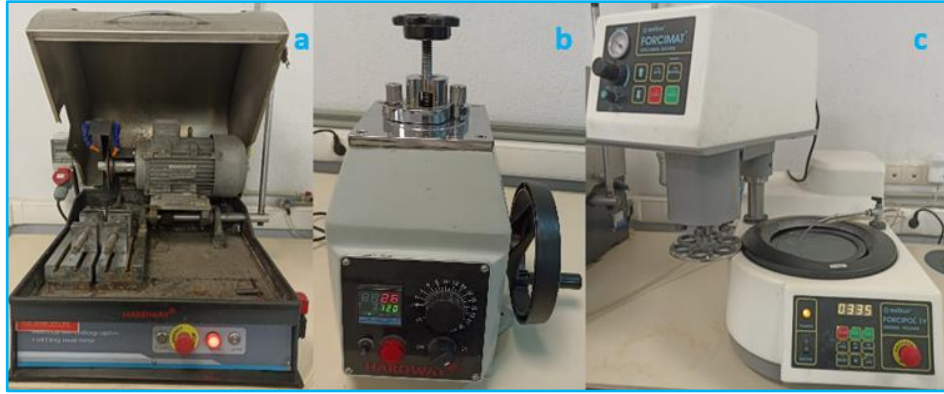
Uygulanan T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemleri sonucunda elde edilen mekanik özellikler ile mikroyapı arasındaki ilişkiyi belirlemek için optik mikroskop, Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM ve EDS), Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC) ve X-Işını Kırınımı (XRD) analizleri yapılmıştır.

3.5.1 Metalografi ve mikroskopi

Optik mikroskop görüntüleri alınacak numuneler belirli metalografik hazırlık işlemlerinden geçirilerek hazır hale getirilmiştir. Bu hazırlık aşamaları şu şekildedir; a) Kesme, b) Bakalite alma, c) Zımparalama-parlatma, d) Dağlama

Deney numunelerine uygulanan ısıt işlemler sonucu malzemelerin mikro yapısındaki değişimlerin incelenebilmesi için metalografik çalışma yapılmıştır. Bu işlemler PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Analiz Laboratuvarı'nda üç adet eğme numunesinden 1 cm'lik parçaların hassas kesme cihazı ile kesilip bakalite alınmasıyla başlamıştır. Ardından üç adet çekme ve aşınma numunesiyle birlikte, bakalite alınan üç nokta eğme numuneleri zımparalama-parlatma ve Keller çözeltisi ile 25 saniye süreyle dağlama yapılarak optik mikroskop görüntüleri alınmıştır. Zımparalama işlemleri 320-600-800-1200 mesh SiC zımpara kâğıdı kullanılarak, parlatma işlemi ise 1µ keçe ve 1µ elmas solüsyon kullanılarak Metkon FORCIPOL 1V marka otomatik zımparalama-parlatma cihazında

gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.20’de hassas kesme cihazı, bakalite alma cihazı ve bu numunelerin zımparalama-parlatma işlemlerinin uygulandığı cihaz görülmektedir.



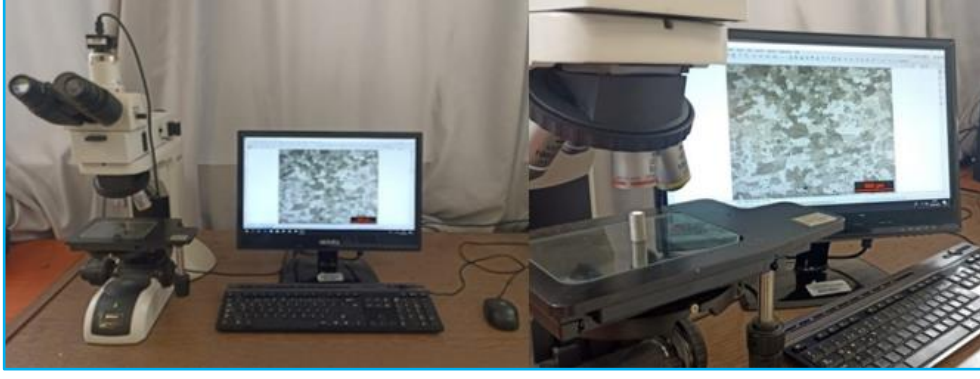
Şekil 3.20: Metalografik işlem basamakları; a) hassas kesme, b) bakalite alma, c) zımparalama-parlatma

Parlatma işlemi yapılan numuneler, optik mikroskopta incelemelerin gerçekleştirilebilmesi için % 2 HF + % 3 HCl + % 5 NHO₃ + % 90 saf su içeriğine sahip Keller dağlama çözeltisi ile dağlama işlemine tabi tutulmuştur. Parlatılan numuneler ve dağlama işleminin yapılması Şekil 3.21’de gösterilmiştir.



Şekil 3.21: Parlatılmış numuneler ve dağlama işlemi

Dağlama işlemi uygulanan numunelerin mikro yapı incelemeleri PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Analiz Laboratuvarı’nda bulunan Nikon Eclipse LV150NL marka optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir. Optik görüntüler 50X, 100X, ve 200X büyütme oranlarında alınmıştır. Mikro yapı görüntülerinin alındığı optik mikroskop Şekil 3.22’de gösterilmiştir.



Şekil 3.22: Optik mikroskop ve numunelerin görüntüsünün alınması

3.5.2 SEM ve EDS analizi

Yüksek voltajla hızlandırılan elektronların numune üzerinde yoğunlaştırılması ve elektron ve numune atomları arasındaki etkileşimler sonucunda oluşan ürünlerin algılayıcılarda toplanmasıyla SEM (Taramalı Elektron Mikroskobu) görüntüsü elde edilir. Bu teknik, malzemelerin mikro ve nano boyutlu yapılarının görüntülenmesi, elementel kompozisyonlarının belirlenmesi ve kristal bilgilerinin elde edilmesi için kullanılır. SEM, yüzey kırıkları, kusurlar, kirleticiler veya korozyon gibi çeşitli malzemelerin değerlendirilmesinde yüksek çözünürlüklü görüntüleme sağlar. EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) analiziyle birlikte kullanıldığında, yüzey malzemesinin kimyasal bileşimi hakkında daha detaylı bilgi elde etmek mümkündür (Eurolab 2023) (PAÜ İLTAM 2023).

Tez kapsamında ısıt işlemler ardından uygulanan mekanik testler (sertlik, çekme, üç nokta eğme ve aşınma) sonrası çıkan sonuçlara göre belirli ısıt işlem saatleri seçilerek SEM numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan numuneler T0 ve T6 ısıt işlem numuneleri ile kesintili yaşlandırma işleminde sonuçları en yüksek çıkan numuneler olarak seçilmiştir. İki alaşım türünden toplamda 20 adet SEM analizi yapılmıştır. SEM ve EDS analizi yapılan AA2024 ve AA7075 numuneleri Tablo 3.5’de verilmiştir.

Tablo 3.5: SEM ve EDS analizi için seçilen numuneler

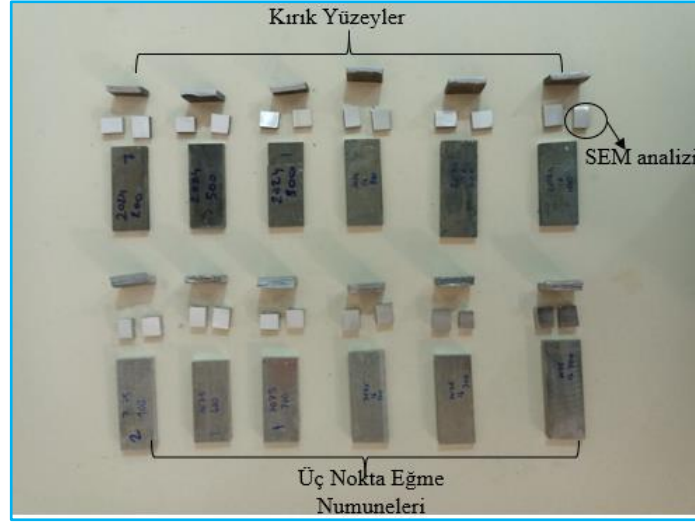
2024 (10 Adet)		
Çekme	3 Adet (T0, T6, T6I4-800)	1 Adet (T6I6-600)
Eğme	1 Adet (T6I4-700)	1 Adet (T6I6-600)
Aşınma	3 Adet (T0, T6, T6I4-800)	1 Adet (T6I6-600)
7075 (10 Adet)		
Çekme	3 Adet (T0, T6, T6I4-700)	1 Adet (T6I6-500)
Eğme	1 Adet (T6I4-700)	1 Adet (T6I6-500)
Aşınma	3 Adet (T0, T6, T6I4-700)	1 Adet (T6I6-500)

SEM ve EDS analizleri PAÜ İleri Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (İLTAM)'da bulunan ve Şekil 3.23'de gösterilen Zeiss Supra 40VP marka SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.23: Deney numunelerinin analizinde kullanılan SEM cihazı

Çekme ve üç nokta eğme testi sonrasında T0 ve T6 ısıtılma işlem numuneleri ile kesintili yaşlandırma işleminde sonuçları en yüksek çıkan numunelerin kırılma morfolojilerini belirlemek üzere kırık yüzey analizi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3.24'te üç nokta eğme numunelerinden seçilen SEM-EDS numuneleri gösterilmiştir. Çekme ve aşınma numunelerinden SEM-EDS analizi için seçilen numuneler Şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.24: Seçilen üç nokta eğme SEM-EDS numuneleri



Şekil 3.25: Seçilen çekme ve aşınma SEM numuneleri

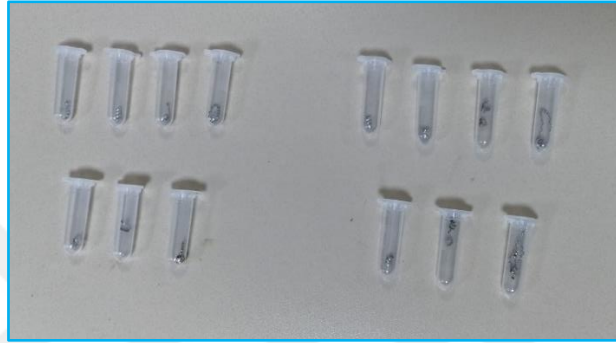
3.5.3 DSC analizi

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC), sıcaklıkla değişen malzemelerin ısı kapasitelerini analiz ederek erime, camsı geçiş, faz değişimi ve kürleşme gibi geçişlerin belirlenmesini sağlayan bir termal analiz tekniğidir. Bu tekniğin kullanımı, Al alaşımlarında katı-katı faz dönüşüm kinetiği hakkında kapsamlı bir bilgi sağlar (Rotolab 2023).

DSC mikroyapısal gelişimi ve çökelme süreçlerini incelemek için kullanılmaktadır. DSC ayrıca çökelme reaksiyonlarının ve karşılık gelen çökeltilerin tanımlanmasına yardımcı olmak için kullanılır. DSC grafiğinde oluşan pikler ile alüminyum alaşımlarında oluşabilecek GP zonları, θ'' ve θ gibi çökeltiler tespit edilebilmektedir (Matsuda ve diğ. 2001).

Şekil 3.26’da DSC deney numuneleri verilmiştir. DSC deney numuneleri 2 ila 4 mg arasında olması gerektiğinden dolayı seçilen ısıtma parametrelerindeki aşınma numunelerinden ısınma olmayacak şekilde soğutma sıvısı altında çok yavaş devirde talaş kaldırılmış ve numune kaplarına konulmuştur.

DSC analizi PAÜ İLTAM’da bulunan NETZSCH STA 449F5 marka DSC cihazında (Şekil 3.27) 25-600°C aralığında 10°C/min ısıtma hızında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.26: DSC deney numuneleri



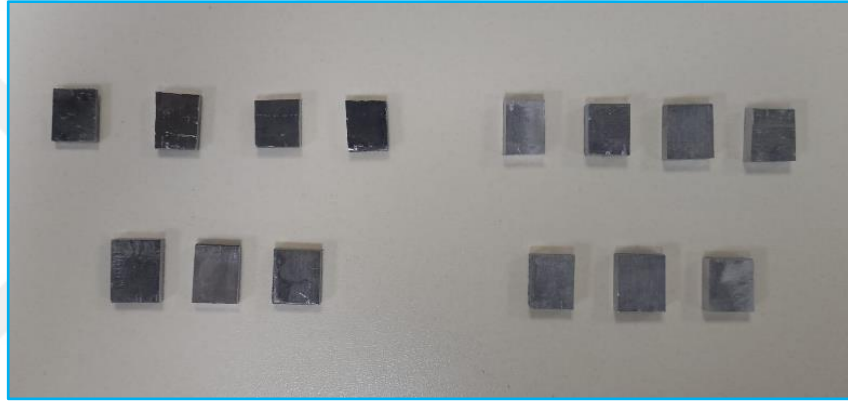
Şekil 3.27: Çalışmada kullanılan DSC cihazı

3.5.4 XRD analizi

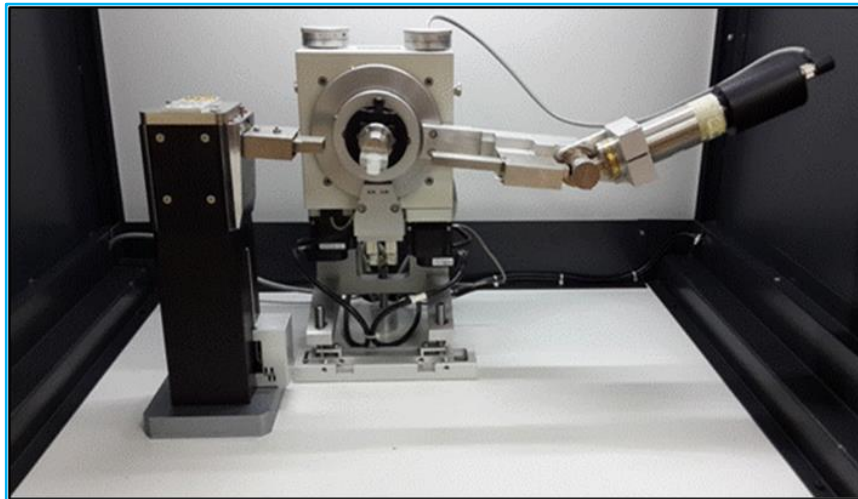
X-Işını Kırınım (XRD) yöntemi, kristalin yapıların belirlenmesinde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, her bir kristalin fazın kendine özgü atomik dizilimlerine bağlı olarak X-ışınlarını karakteristik bir düzen içerisinde kırması prensibine dayanır. Bu kırınım profilleri, her bir kristalin fazın benzersiz parmak izleri gibidir ve kristalleri tanımlamak için kullanılır (Merlab 2023).

XRD analiz metodu, numuneyi tahrip etmeksizin kristal yapıları hakkında önemli bilgiler sağlar ve çok küçük miktarlardaki numunelerin bile analizlerinin yapılmasına olanak tanır. Bu nedenle, malzeme bilimleri, mineraloji, kimya, metalurji gibi birçok bilim ve endüstri alanında yaygın olarak kullanılmaktadır.

XRD numuneleri DSC analizi için seçilen numune parametreleri ile aynıdır. XRD analizi ile oluşabilecek fazların bileşimleri belirlenmiştir. Şekil 3.28’de analizi yapılan XRD numuneleri görülmektedir. XRD analizi Gazi Üniversitesi Temel ve Mühendislik Bilimleri Merkez Laboratuvarında (GÜTMAM) bulunan XRD cihazında 20-90° aralığında gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan cihaz Şekil 3.29’de görülmektedir.



Şekil 3.28: XRD deney numuneleri



Şekil 3.29: Çalışmada kullanılan XRD cihazı

3.6 Mekanik Testler

Malzeme muayeneleri malzemenin fiziksel, kimyasal, teknolojik ve metalografik özelliklerinin belirlenmesi ve hasar nedenlerini tespit etmek için uygulanmaktadır. Hazırlanan numunelere ısıt işlemler öncesi ve sonrasında sertlik, çekme, üç nokta eğme ve aşınma gibi birçok test uygulanarak konvansiyonel T6 ısıt işlemiyle yeni nesil T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma ısıt işlemlerinin mekanik özelliklere etkileri incelenmiştir.

3.6.1 Sertlik Deneyi

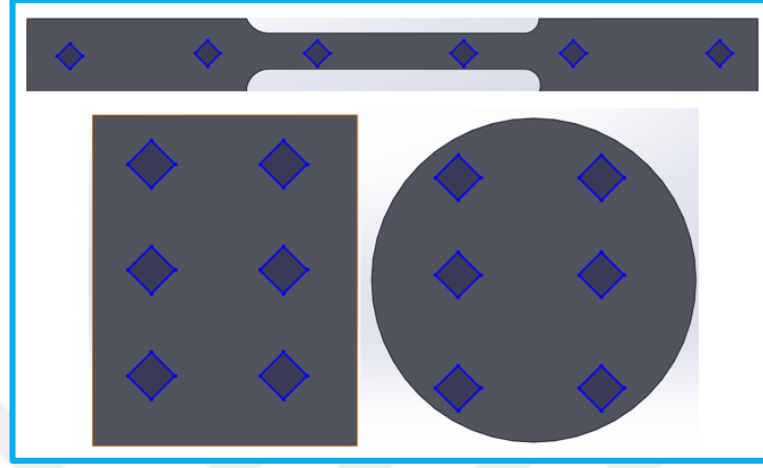
Vickers sertlik yönteminde yük/iz alanı esas alınır. Vickers sertlik ölçme yöntemi EN ISO 6507 standardına göre uygulanmaktadır. Vickers yönteminde mikroskop kullanıldığı için hassas ölçümler yapılabilmektedir. Bu yüzden de malzemelere zımparalama-parlatma yapılması zorunluluğu vardır. Tepe açısı 136° olan elmas kare piramit uç kullanılır. Bu ucun malzeme yüzeyi üzerinde oluşturduğu izin alanı belirlenerek sertlik değeri bulunur (Yüksel ve Meran 2021).

Isıl işlem uygulanan numunelere PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan Hardway DV-1AT-4.3 marka mikro Vickers sertlik cihazı kullanılarak sertlik ölçümü gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri $HV_{0,1}$ skalasında 100 g yük altında elmas piramit uç kullanılarak 10 saniyede gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro Vickers sertlik cihazı Şekil 3.30'da gösterilmiştir.



Şekil 3.30: Sertlik ölçümlerinin yapıldığı mikro Vickers cihazı

Sertlik ölçümleri çekme, üç nokta eğme ve aşınma numunelerinden 6'şar adet ölçümlerin ortalaması alınarak gerçekleştirilmiştir. Deney numunelerinden daha doğru ve homojen sonuçlar alınması için sertlik alınan bölgeler Şekil 3.31'de gösterilmiştir.



Şekil 3.31: Deney numunelerinden sertlik ölçümleri alınan bölgeler

3.6.2 Çekme deneyi

Çekme testi, malzemelerin çekme dayanımı, akma dayanımı ve yüzde kopma uzaması gibi bazı mekanik özelliklerini ölçebilmek amacıyla yapılır. ASTM E8/E8M-09 standardına göre belirli yükleme ve hızlarla gerçekleştirilir. Deney sırasında uygulanan gerilme (MPa) ve uzama miktarı (%) grafiği çizilir.

Çekme sonrasında yüzde kopma uzamasının belirlenebilmesi için öncelikle numune üzerinde L_0 ilk ölçü boyu işaretlenmiştir. L_0 ölçü boyu dikdörtgen kesitli numunelerde Denklem 3.1'de gösterildiği gibi hesaplanır (Yüksel ve Meran 2021).

$$L_0 = 5,65 \times \sqrt{S_0} \quad (3.1)$$

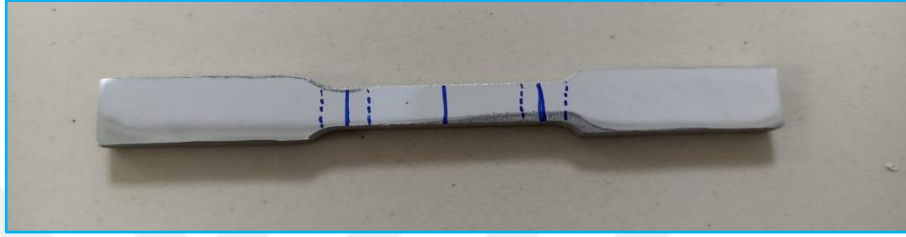
Burada S_0 gövdenin ilk kesit alanıdır ve gövde kalınlığı ile genişliğinin çarpımı ile bulunur. Birimi mm^2 'dir.

Şekil 3.3'te gösterilen AA2024 çekme numunesi ölçülerinden $S_0 = 6 \times 4 = 24 \text{ mm}^2$ 'dir. Buradan $L_0 = 5,65 \times \sqrt{24} = 27,6 \cong 28 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır.

Şekil 3.3'te gösterilen AA7075 çekme numunesi ölçülerinden $S_0=6 \times 5=30 \text{ mm}^2$ 'dir. Buradan $L_0 = 5,65 \times \sqrt{30} = 30,94 \approx 31 \text{ mm}$ olarak hesaplanmıştır (Yüksel ve Meran 2021).

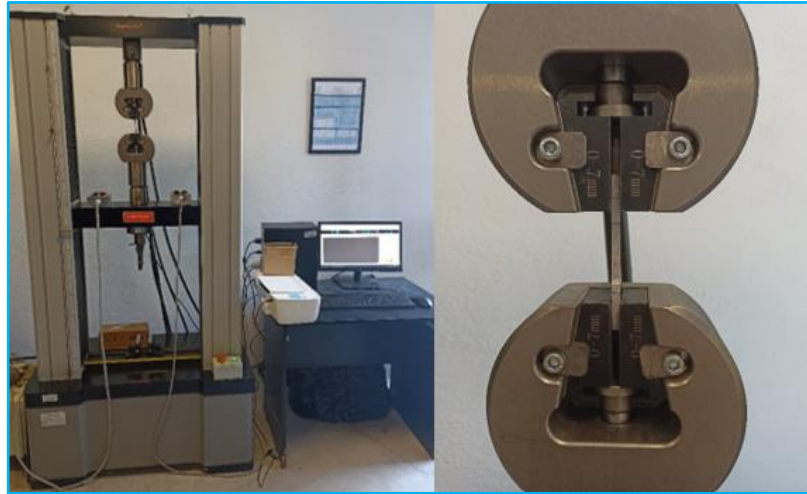
$$\% A = [(L_U - L_0) / L_0] \quad (3.2)$$

Numune üzerinde ilk ölçü boyunun işaretlenmesi Şekil 3.32'de gösterilmiştir. Böylece kopma sonrası kırık parçalar bir araya getirilerek yüzde kopma uzaması hesaplanır.



Şekil 3.32: Çekme numunesinde ilk ölçü boyunun işaretlenmesi

Çekme deneyleri PAÜ Teknoloji Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Malzeme Mekanik Laboratuvarı'nda bulunan 100 kN kapasiteli üniversal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi yapılan cihaz ve numunenin çenelere bağlanması Şekil 3.33'de gösterilmiştir.



Şekil 3.33: Üniversal test cihazı ve çekme numunesinin bağlanması

Çekme testi öncesi ve sonrasında çekme numunelerinin durumları Şekil 3.34'te verilmiştir.



Şekil 3.34: Çekme testi öncesi ve sonrası numunelerin durumları

Çekme cihazının programına çekme numunelerinin numune tipi, L_0 ilk ölçü boyu ve S_0 girildikten sonra çekme yükü ve hızı seçilerek deney başlatılmıştır. Çekme hızı 5 mm/min, yük ise 0,1 kN/s olarak belirlenmiştir. Test sırasında cihaz tarafından gerilme (MPa) - uzama miktarını (%) grafiği çizilmeye başlanır. Test sonrasında kopan numune tekrar bir araya getirilerek kumpas tarafından çizilen çizgiler Şekil 3.35'teki gibi ölçülerek son ölçü boyu programa yazılır ve Denklem 3.2'de verilen bağıntıya göre program tarafından hesaplanır. Test sonunda ise çekme dayanımı (R_m), akma dayanımı (R_p) ve yüzde kopma uzaması (%A) değerleri bulunmuş olur.



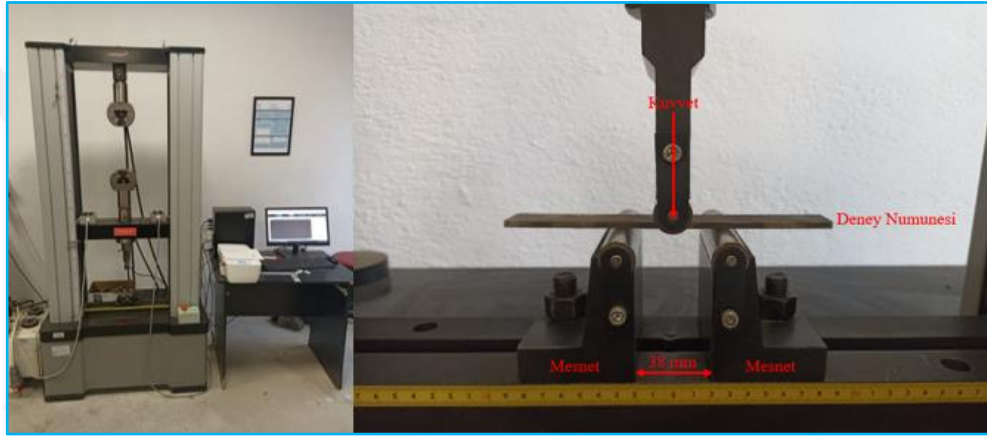
Şekil 3.35: Çekme deneyi sonrası kopan numune ve son ölçü boyunun ölçülmesi

3.6.3 Üç nokta eğme deneyi

Otomotiv endüstrisinde kullanılan haddelenmiş levhalar ve ekstrüde profiller şeklindeki alüminyum alaşımları, uygun bir dayanım ve süneklik kombinasyonuna sahip olmalıdır. Bu malzemeler, gövde panelleri veya tampon kirişleri gibi nihai şekillere dönüştürülebilecekleri için soğuk deformasyona uğrarlar. Bu nedenle,

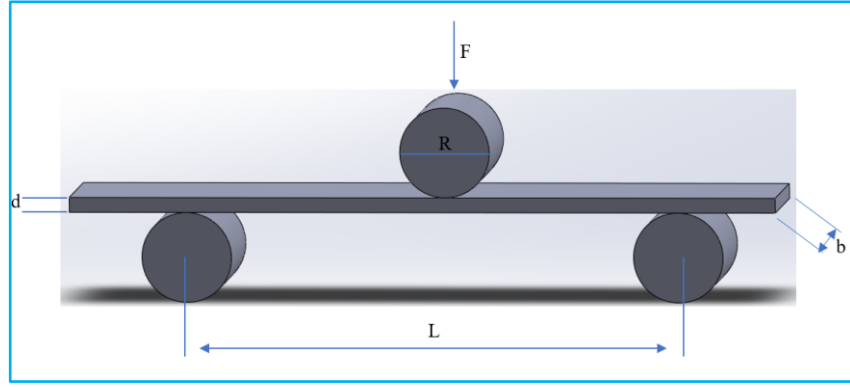
malzemenin bükülebilirliği, hem kullanımda optimum enerji Emilimi hem de imalatta büyük önem taşır. Genellikle metallerin mekanik özelliklerini belirlemek için tek eksenli çekme testi kullanılır, ancak bu test bileşenin maruz kaldığı deformasyon modunun tam olarak tanımlanmasını sağlamaz. Bu nedenle, üç nokta eğme testi, mekanik özelliklerin tam olarak tanımlanması için daha uygun bir yöntemdir (Jacono 2010).

Üç nokta eğme deneyleri çekme deneylerinde de kullanılan universal test cihazında gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme deneyi yapılan cihaz ve numunenin mesnet üzerindeki durumu Şekil 3.36’da gösterilmiştir.



Şekil 3.36: Universal üç nokta eğme deney cihazı ve numunenin durumu

Üç nokta eğme deneyinde çekme deneyinde olduğu gibi cihaz tarafından direk sonuç verilmez. Cihaz tarafından F_m (kN) ve F_p (kN) cinsinden değerler elde edilir. Bu değerler üç nokta eğme bağıntıları ile hesaplanarak istenilen sonuçlar bulunur. Hesaplamalarda kullanılan bağıntıların çıkarılmasında kullanılan şematik Şekil 3.37’de verilmiştir.



Şekil 3.37: Üç nokta eğme deney düzeneği

Şekil 3.37’de gösterilen deney numunesi ve şematığı üzerindeki sembollerin anlamı aşağıdaki gibidir.

F : Kırılmaya neden olan yük (N),

L : Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi (mm),

b : Deney numunesinin genişliği (mm),

d : Deney numunesinin kalınlığı (mm),

R: Yük ve mesnetlerin mandrel çapı (mm).

Öncelikle numunenin konulacağı mesnetler arası mesafe hesaplanır. Mesnetler arası mesafe aşağıdaki formül ile hesaplanır; (TS EN ISO 7438, 2021)

$$L = (R+3xd) \pm (d/2) \quad (3.3)$$

Mesnetler arası mesafe AA2024 alaşımının kalınlığı 4 mm olduğundan;

$$L = (20+3 \times 4) \pm (4/2) = 34 \text{ mm'dir.}$$

Mesnetler arası mesafe AA7075 alaşımının kalınlığı 5 mm olduğundan;

$$L = (20+3 \times 5) \pm (5/2) = 37,5 \cong 38 \text{ mm'dir.}$$

Numune mesnetlere yerleştirildikten sonra numune boyutları cihaza girilerek TS EN ISO 7438-2020 standardında verildiği gibi test hızı 50 mm/min, yük ise 0,2 kN/s seçilerek deney gerçekleştirilmiştir. Üç nokta eğme öncesi ve sonrası numunelerin görüntüleri Şekil 3.38’de verilmiştir. Numunelerin kırılış şekilleri ve kırık yüzeyleri incelenerek kırılma morfolojisi hakkında bilgi edinilmiştir.



Şekil 3.38: Üç nokta eğme öncesi ve sonrası numunelerin halleri

Deney sonucunda cihaz tarafından F_m (kN) ve F_p (kN) değerleri verilmiştir. Bu değerler ile maksimum eğilme dayanımı hesaplanmıştır. Test edilen malzeme homojen ve elastik bir kirişe ve üç noktadan eğme testi yapılıyorsa maksimum gerilme kirişin dış yüzeyinde orta noktada meydana gelir. Dış yüzeydeki bu gerilme yük sehim eğrisinin herhangi bir noktası için aşağıdaki bağıntıyla hesaplanır. Maksimum eğilme gerilme hesabı aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır (Askeland 2010).

$$\sigma = 3FL/2bd^2 \quad (3.4)$$

burada;

σ : Orta noktada kiriş yüzeyindeki gerilme (N/mm^2)

F : Kırılmaya neden olan yük, (N),

L : Deney numunesinin mesnetler arasındaki mesafesi, (mm),

b : Deney numunesinin genişliği, (mm),

d : Deney numunesinin kalınlığı, (mm)'dir.

3.6.4 Pin-on disk aşınma deneyi

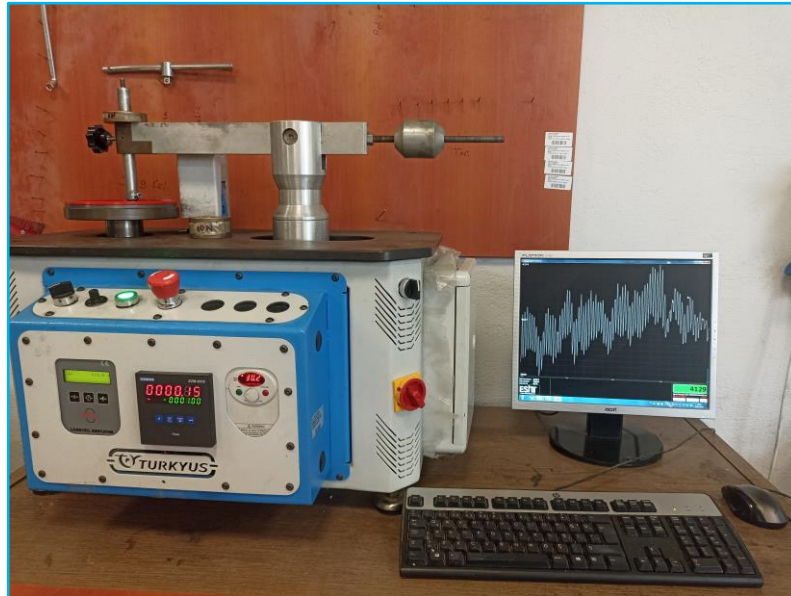
Aşınma, birbirine temas eden ve birbirine göre izafi hareket yapan cisimlerden sürtünme etkisiyle oluşan malzeme ve kütle kaybı olarak tanımlanır. Sürtünme katsayısı, malzemelerin aşınma karakterizasyonu için yaygın olarak kullanılan bir değerlendirme parametresidir. Aşınma deneyi sonucunda elde edilecek ağırlık kaybı sürtünme katsayısı, hacim kaybı, aşınma oranı gibi parametreler, aşınmaya maruz kalacak malzeme seçiminde ve tasarım uygulamalarında iyi belirlenmelidir (Ersöz ve Ovalı 2018).

Malzemenin aşınmasındaki önemli etkenlerden olan sıcaklık, hız, basınç, malzemenin sertliği, yüzey pürüzlülüğü gibi etkenler aşınmayı hızlandırabilirler. Nem ve korozyon etkilere maruz kalmak aşınmayı hızlandırır. Özellikle yüzey pürüzlülüğü, aşınmayı arttıran önemli bir parametredir (Karabaşoğlu 2008).

Tez kapsamında aşınma numunelerine 3m/s hız altında 100 m, 200 m ve 300 m kayma mesafesinde 5N, 10N ve 15N yükler altında aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma deneyi 600 mesh zımpara kâğıdı kullanılarak gerçekleştirilip her numunede zımpara kâğıdı değiştirilmiştir. Aşınma yapılmadan önce numuneler 1000 mesh SiC zımpara kâğıdı ile zımparalanıp parlatılmıştır. Aşınma deney numuneleri Şekil 3.39’da gösterilmektedir. Tezde kullanılan pin-on disk aşınma cihazı Şekil 3.40’da verilmiştir.



Şekil 3.39: Aşınma deney numuneleri



Şekil 3.40: Pin-on disk aşınma test cihazı

Numune cihaza bağlanmadan önce hassas terazi ile ağırlığı ölçüldükten sonra kaydedilmiş ve test sonunda tekrar ağırlık ölçülerek ağırlık kaybı belirlenmiştir.

Ayrıca test sırasında cihaz tarafından Şekil 3.40’da da görüldüğü gibi loadcell tarafından sürtünme grafiği sürekli olarak kaydedilmiştir.

Bulunan ağırlık kayıp değerleri ile hacim kaybı-kayma mesafesi grafiği ve aşınma oranı-kayma mesafesi grafiği çizilmiştir. Hacim kaybı ve spesifik aşınma oranı değerleri her bir kuvvet değeri (5-10-15N) ile her bir kayma mesafesi (100-200-300 m) için bulunmuştur. Gerekli hesaplamalar aşağıdaki bağıntılara göre yapılmıştır (Ovalı, 2017).

Hacim kaybı aşağıdaki bağıntı ile hesaplanır;

$$[\text{Ağırlık kaybı (g)} / \text{yoğunluk(g/cm}^3\text{)}] \times 1000 \quad (3.8)$$

Spesifik aşınma oranı bağıntısı aşağıdaki gibidir.

$$\text{Hacim kaybı (mm}^3\text{)} / [\text{kuvvet (N)} \times \text{kayma mesafesi (m)}] \quad (3.9)$$

Sürtünme katsayısı bağıntısı ise;

$$\text{Sürtünme katsayısı } (\mu) = F/P \quad (3.10)$$

Burada F yük hücresi (load cell) tarafından ölçülen sürtünme kuvveti ve P numunelere uygulanan normal yüküdür. Son olarak aşınma yüzeylerine SEM ve EDS analizleri yapılarak aşınma morfolojisi incelenmiştir.

3.6.4.1 Yüzey pürüzlülüğü

Son yıllarda teknolojinin gelişmesiyle birlikte imalat sektöründe gelişme ve mükemmellik hedeflenmektedir. Özellikle tüm dünyada olduğu gibi ülkemizde de hava ve uzay sanayi, savunma sanayi ve otomotiv sanayi gibi alanlarda beklentiler gün geçtikçe artmaktadır. Bu da üretim kalitesiyle doğru orantılıdır. Malzemelerin yüzey pürüzlülüğü de bu kaliteyi etkileyen faktörlerdendir. Yüzey kalitesinin artırılmasıyla malzemelerde yüzeyde oluşan mikro çatlaklar sonucu meydana gelen yorulma kırılması, korozyon dayanımı ve estetiklik gibi özellikler geliştirilmiş olur (Kuark 2017).

Aşınma deneyi sonrası numune yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü de sertlik ile ters orantılıdır. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri TMTECK-462 marka yüzey pürüzlülüğü cihazında numuneler mengeneye bağlanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. ölçümler sonunda ortalama pürüzlülük değeri R_a ve yüzey profili (μ) – ölçüm uzunluğu (mm) grafikleri elde edilerek uygulanan ısıt işlemlerin malzeme yüzey kalitesine etkisi incelenmiştir. Şekil 3.41’de yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı gösterilmiştir.



Şekil 3.41: Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı

4. BULGULAR

4.1 Mekanik deneylerin sonuçları

AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemleri sonrası sertlik, çekme, üç nokta eğme, aşınma ve aşınma sonrası yüzey pürüzlülüğü ölçüm deneyleri uygulanmıştır.

4.1.1 T6 optimizasyon, T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sertlik sonuçları

AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan (500°C’de 4 saat + havada soğutma) homojenleştirme işlemi sonrası sertlik değeri AA2024 alaşımı için 69 HV_{0,1}, AA7075 alaşımı için 77 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür. Tablo 3.3’te görülen T6 ısıt işlem üç farklı sıcaklık ve süre parametreleri ile yapılan ısıt işlemler sonucunda ölçülen sertlik değerleri Tablo 4.1, Tablo 4.2 ve Tablo 4.3’te verilmiştir.

Tablo 4.1: Optimizasyon işlemi için yapılan deneyler-1

Çözeltiliye Alma:475 °C - 3 Saat + Su Verme		
Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	180 °C	120 °C
Yaşlandırma Süresi (Saat)	2024 T6 Sertlik	7075 T6 Sertlik
0	76,3	104,2
3	96,2	135,2
6	107,5	143,5
9	110,3	155,6
12	115,3	156,2
15	118,2	160,8
18	102,2	165,3
21	98,8	142,2

Tablo 4.1’de verilen sıcaklık ve sürelerde iki alaşım için yukarıda sertlik değerleri elde edilmiştir. İlk 18 saate kadar sertliğin artması yaşlandırmanın etkisidir, daha uzun sürelerde sertliğin düşmesi ise aşırı yaşlanma mekanizmasından dolayıdır.

Tablo 4.2: Optimizasyon işlemi için yapılan deneyler-2

Çözeltiliye Alma:485 °C - 2 Saat + Su Verme		
Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	190 °C	120 °C
Yaşlandırma Süresi (Saat)	2024 T6 Sertlik	7075 T6 Sertlik
0	91,8	94,3
4	129,2	152,6
8	130,2	159,2
12	131,5	164,3
16	133,3	171,5
20	138,5	172,6
24	131,2	185,6

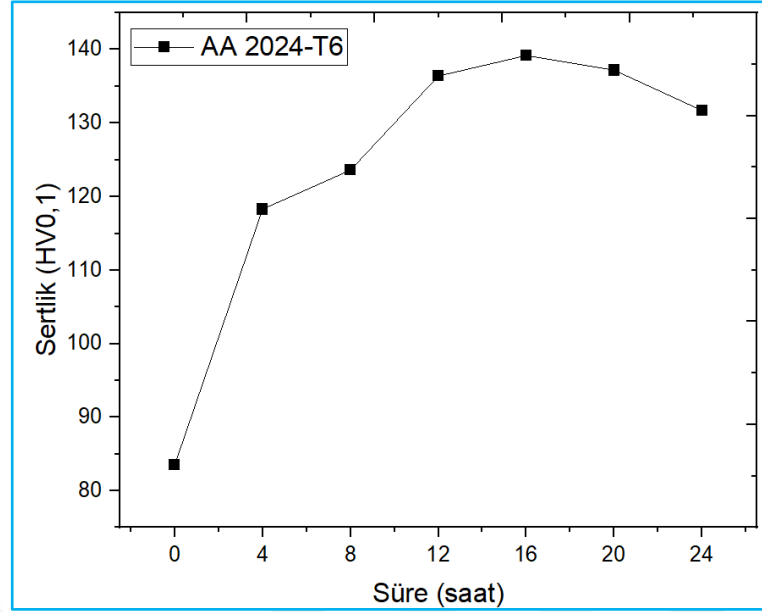
Tablo 4.2’de görülen sıcaklık ve sürelerde yapılan ısıt işlemler sonucu sertlik 20. saate kadar artmıştır. Daha sonra yine aşırı yaşlanmadan dolayı düşüş yaşanmıştır.

Tablo 4.3: Optimizasyon işlemi için yapılan deneyler-3

Çözeltiliye Alma	500 °C - 4 Saat + Su Verme	475 °C – 4saat + Su Verme
Yaşlandırma Sıcaklığı (°C)	190°C	120 °C
Yaşlandırma Süresi (Saat)	2024 T6 Sertlik	7075 T6 Sertlik
0	83,5	96,5
4	118,3	147,4
8	123,6	165,2
12	136,4	176,9
16	139,2	192,3
20	137,2	185,3
24	131,7	173,9

Uygulanan farklı sıcaklık ve sürelerde en iyi sonuç Tablo 4.3’te görüldüğü gibi AA 2024 alaşımı için çözeltiliye alma 500°C -4h ve T6 sıcaklığı 190°C, 7075 alaşımı için çözeltiliye alma 475 °C -4h ve T6 sıcaklığı 120 °C olarak iki alaşımda da 16 saatte elde edilmiştir. Belirlenen bu sıcaklık ve süre parametrelerinden sonra numunelere kesintili yaşlandırmanın adımları olan T6I4 ve T6I6 ısıt işlemleri uygulanmıştır.

AA2024 alaşımına ait yaşlandırma sürelerine bağlı sertlik değişimleri Şekil 4.1’de verilmiştir.

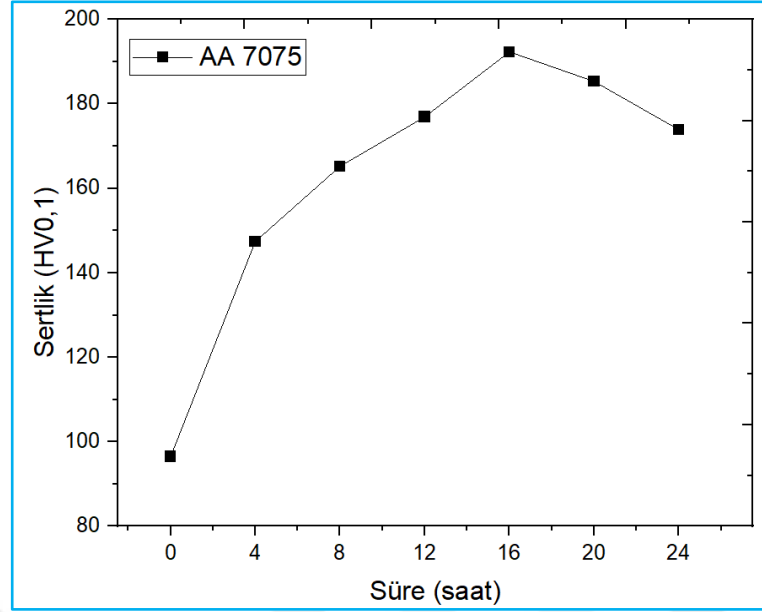


Şekil 4.1: AA2024 alaşımına uygulanan T6 ısıt işlem sonrası sertlik değişimi

Şekil 4.1’de görüldüğü üzere en yüksek sertlik 16. saatte elde edilmiştir. Daha uzun süredeki yaşlandırma sürelerinde aşırı yaşlanmadan dolayı sertlikte düşüş yaşanmıştır. Sertlik düşüşü çökeltilerin etkileşimiyle çökelti boyutunun büyümesinden ve sayılarının azalmasından dolayıdır. Bunun sonucunda dislokasyon hareketleri engellenemez duruma gelir ve sertlikte düşüş olur (Çoşkun 2020).

Yaşlandırma işlemi öncesi 69 HV_{0,1} olan sertlik % 101 artış ile 139,2 HV_{0,1}’ye yükselmiştir. Sertlik artışı, ana matris fazı ile yarı uyumlu ve uyumsuz çökeltilerin (GPB bölgeleri) oluşumu ve bu çökeltilerin dislokasyon hareketlerini engellenmesi ile sağlanmaktadır (Meyveci 2007).

AA7075 alaşımına ait yaşlandırma sürelerine bağlı sertlik değişimleri Şekil 4.2’de verilmiştir.

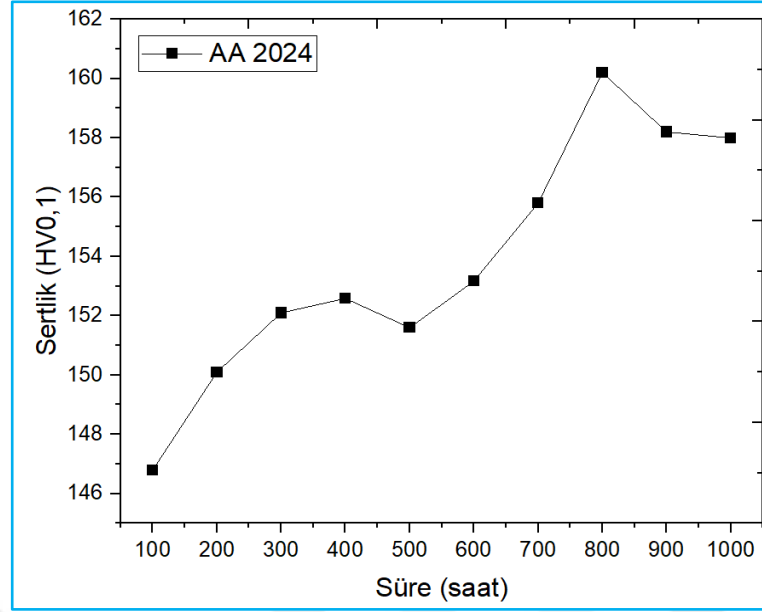


Şekil 4.2: AA7075 alaşımına uygulanan T6 ısıt işlem sonrası sertlik değişimi

Şekil 4.2’de görüldüğü üzere AA7075 alaşımında da en yüksek sertlik 16 saat yaşlandırma sonunda elde edilmiştir. Daha uzun süredeki yaşlandırma sürelerinde aşırı yaşlanmadan dolayı sertlikte düşüş yaşanmıştır. Yaşlandırma işlemi öncesi 77 HV_{0,1} olan sertlik % 149,7 artış ile 192,3 HV_{0,1}’ye yükselmiştir. Sertlikte görülen bu önemli artış yaşlanma sırasında çökelen MgZn₂ gibi ikinci fazların yapı içerisinde dağılarak dislokasyon hareketlerini zorlaştırılması ile açıklanabilir (Isadere ve diğ. 2013).

Al-Zn-Mg-Cu alaşımları yarı tutarlı η' denge dışı fazların ve az miktarda η denge fazlarının çökmesi nedeniyle 120-170°C sıcaklıkta T6 yaşlandırma işleminden sonra yüksek dayanım ve sertliğe sahip olma eğilimindedir (Luo 2022).

AA2024 ve AA7075 alaşımlarına uygulanan T6 ısıt işlemi sonrası kesintili yaşlandırmanın Şekil 4.3’de AA2024 alaşımının T6I4 ısıt işlemi sonucundaki sertlik değişimleri verilmiştir.



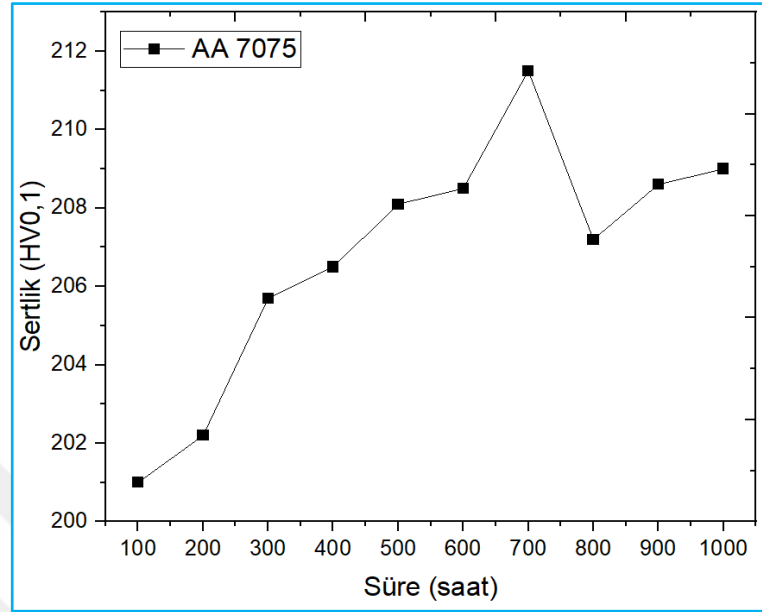
Şekil 4.3: AA2024 alaşımına uygulanan T6I4 ısıt işlem sonrası sertlik değişimi

Şekil 4.3’de görüldüğü üzere en yüksek sertlik 800. Saatte elde edilmiştir. Daha uzun süredeki yaşlandırma işleminde sertlikte çok az bir düşüş görülmüştür. AA2024 T6 139,2 HV_{0,1} olan sertlik % 15 artış ile 800. saatte 160,2 HV_{0,1}’ye yükselmiştir. 900 ve 1000 saat ısıt işlem süreleri sonucunda çok az bir düşüş görülmüş olup sırasıyla 158,2 HV_{0,1} ve 158 HV_{0,1} sertlik elde edilmiştir. 800. saatte elde edilen sertlik değeri ve çekme sonucunda elde edilen kopma uzaması ise daha yüksektir.

T6I4 kesintili yaşlandırma ısıt işlemi ile konvansiyonel T6 ısıt işleminden daha yüksek bir sertlik elde edilmiştir. Kesintili yaşlandırma sırasında ikincil çökeltme gerçekleşir. Kısa yaşlanma süresi ile S çökeltisi oluşurken, daha uzun yaşlanma süresiyle daha fazla S^{II} çökeltisi sağlanır. Kesintili yaşlandırma, çökeltilerin tipini, boyutunu ve dağılımını belirler. Kesinti yaşlandırma, daha fazla miktarda S^{II} fazının oluşmasına neden olur. S ve S^{II} fazlarının bir arada bulunması hem sertlik, çekme dayanımı gibi özellikleri hem de yüzde uzama değerini artırır (Risanti ve diğ. 2010^a).

T6 işlemi GP bölgelerinin oluşumu ve S fazının çökmesiyle sonuçlanırken, T6I4 işleminde ikincil yaşlanma, daha fazla sayıda çözünen küme oluşumunu teşvik eder. T6I4 kesintili yaşlanmasından sonra, T6 yaşlanmasına kıyasla <10 atom boyutuna sahip Mg–Mg ve Cu–Mg kümelerinin sayı yoğunluğu daha yüksektir. İkincil yaşlanma sırasında sayı yoğunluğunda en büyük artışa sahip olan Cu-Mg kümeleridir. Bu durum da sertlik artışına katkı sağlar (Marceau 2010).

Şekil 4.4'te AA7075 alaşımının T6I4 ısıt işlemleri sırasında sertlik değışimleri verilmiştir.



Şekil 4.4: AA7075 alaşımına uygulanan T6I4 ısıt işlem sonrası sertlik değışimi

Şekil 4.4'de görüldüğü üzere en yüksek sertlik 700. saatte elde edilmiştir. AA7075-T6 191,2 HV_{0,1} olan sertlik % 10 artış ile 800. saatte 211,5 HV_{0,1}'ye yükselmiştir.

7xxx serisi alaşımlarda kesintili T6I4 yaşlandırma işlemi sonucundaki sertlik artışı η' fazının, ilk kısa süreli yüksek sıcaklıkta yaşlanma işlemi (T6) sırasında alüminyum alaşımlarında hızla çekirdeklenir ve sıcaklıktaki düşüş (65°C), matris aşırı doymunluğunda artışa ve çözünen atomik difüzyon hızında azalmaya yol açarak çökeltilerin tekrar çekirdeklenmesine ve daha ince çökeltilerin ortaya çıkmasına neden olur (Wang ve diğ. 2020).

Carvalho ve diğ. (2022), AA7050 alüminyum alaşımına T6I4 (65°C) ısıt işlemini iki ay boyunca uygulamışlar ve $207,3 \pm 5,6$ HV_{0,1} sertliğe ulaşmışlardır (Carvalho ve diğ. 2022).

Lumley ve diğ. (2004), 65°C'de tutulan AA7075 alaşımına 35.000 saati aşan uzun süreli T6I4 işlemleri gerçekleştirildiğinde AA7075'in 65°C 'de ikincil yaşlandırması için sertlik, T6 (197 HV) 222 HV değeriye yükseldiğini tespit etmişlerdir (Lumley ve diğ. 2004).

65°C’de uzun sürelerde yapılan kesintili T6I4 ısıt işlemleri sonucunda hem AA2024 hem de AA7075 alüminyum alaşımlarında sertlik artışı görülmüştür. Bu sertlik artışının sebeplerinden bir diğeri de T6I4 ısıt işlemlerinden sonra, toplam çökelti hacim fraksiyonu/sayı yoğunluğunda bir artış gözlemlenmesidir. Tsai tarafından yapılan çalışma; T6 ısıt işlemleri ile karşılaştırıldığında, T6I4 ısıt işlemleri sonrası oluşan çökeltilerin daha yüksek bir hacim fraksiyonuna sahip olduğunu göstermektedir (Tsai 2013).

Lumley ve diğ. (2003) yaptıkları çalışmada; T6I4 ısıt işlemleri sonucunda sertlik artışını, sonucunda katı çözültideki Cu miktarının, 65°C’de artan bekleme süreleri boyunca istikrarlı bir şekilde azalmasına bağlamışlardır ve bu durumu Nükleer Manyetik Rezonans (NMR) analizleri ile belirlemişlerdir. Çalışmada aynı zamanda daha fazla GP bölgesinin oluştuğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlar, 65°C’de görülen ikincil sertleşmenin bu ek GP bölgelerinin oluşumundan kaynaklandığını göstermiştir (Lumley ve diğ. 2003).

Yapılan literatür çalışmalarında tek aşamalı yaşlandırma işlemleri (T6) sırasında oluşan fazların iki aşamalı yaşlandırma (T6I4) durumunda oluşan fazlara göre daha az, boyutlarının ise daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Lipa ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada, AA2024 alaşımlarında T6 ısıt işlemleri sonrası, çökeltilerin α fazına göre hacim payının yaklaşık % 1,5 olduğunu belirlemişlerdir. Buna karşılık, bu durumda çökeltiler arasındaki ortalama mesafe 3,8 μm seviyesinde iken, çökeltilerin ortalama büyüklüğünün 6,2 μm ’ye eşit olduğu gözlemlenmiştir. İki aşamalı yaşlandırma işlemleri T6I4 (65°C), çökeltiler arasındaki ortalama mesafenin 0,6 μm değerine kadar ve analiz edilen fazların hacim payının (160 HV_{0.1}) % 1,3 seviyesine düşmesine neden olur. T6I4 işlemleri sonucunda elde edilen çökelti boyutunun ortalama değeri ise 4,03 μm ’dir (Lipa ve diğ. 2019).

Jacumasso ve diğ. (2019) yaptıkları çalışmada; dayanım artışının çökeltiler ile doğrudan ilişkili olduğunu tespit etmişlerdir. T6I4 ısıt işlemleri sonrasında, boyutları 2 ila 5 nm arasında olan küçük yuvarlak parçacıklar oluştuğunu tespit etmişlerdir. Bu durum da dayanımı arttırmıştır. GP2 bölgelerini, fazların boyutu, morfolojisini spesifik elektron kırınım modeli aracılığıyla tanımlamışlardır. T6 ısıt işlemlerinde, çökeltilerin 20 ile 30 nm arasında değiştiğini ve çökeltisiz bölgelerin (PFZ) yaklaşık 60 nm genişliğinde olduğunu bulmuşlardır. Isıt işlemleri sonrasında boyutları 2 ila 5 nm

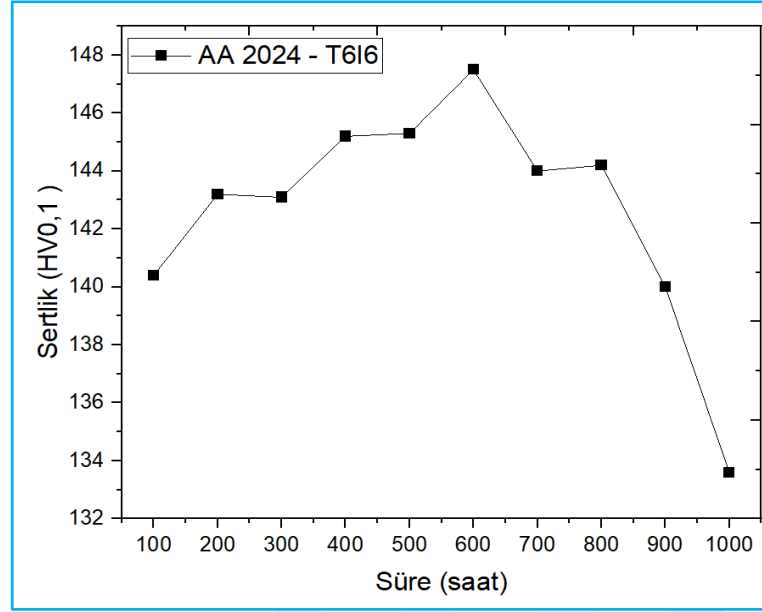
arasında olan GP2 bölgelerinin ve boyutları 10 ila 40 nm arasında olan η' , η , T ve S fazlarının bulunduğu bir mikro yapı oluşur. Ayrıca T6I4 (65°C) sonrası çökeltisiz bölgeler (PFZ) 25 nm genişliğindedir (Jacumasso ve diğ. 2019).

Literatür incelemelerinde T6I4 işleminin matris içinde daha yüksek bir hacim fraksiyonuna sahip ve ince bir şekilde dağılmış dayanım artırıcı çökelti sağladığı sonucuna varılmıştır. Antunes ve diğ.nin (2019) yaptıkları çalışmada; AA7050-T6I4'te T6'ya göre biraz daha yüksek bir ortalama çökelti hacim oranı mevcuttur. T6I4 temperindeki (5,5nm) dayanım artırıcı çökelti, yaklaşık altı kat daha küçüktür. Daha küçük çökeltilerin daha yüksek hacim fraksiyonunun, T6I4 durumu için gelişmiş bir mekanik özellikler kombinasyonu sağlamasının beklenmesi doğaldır. T6I4 temper koşulu daha küçük kalınlıkta (yaklaşık 20 nm) bir çökeltisiz bölge (PFZ) oluşturur. Bu nedenle, AA7050-T6I4 için yaşlanmanın ikinci aşamasında kullanılan daha düşük sıcaklık, büyümeden daha etkili bir çekirdeklenme sürecine izin vererek, daha yüksek yoğunlukta dayanım artırıcı çökeltilerin boyutunu küçültmesine neden olur. Ayrıca T6I4 ısıtma işlemi gerinim sertleşmesini artıran dislokasyon halkaları oluşumuna yardımcı olur (Antunes ve diğ. 2019).

AA2024 ve AA7075 alaşımlarına uygulanan T6+T6I4 ısıtma işlemleri sonrası kesintili yaşlandırmanın son adımı olan T6I6 ısıtma işlemi;

- AA 2024 alaşımı için (T6 ve T6I4-800 sonrası) 170°C'de,
- AA 7075 alaşımı için (T6 ve T6I4-700 sonrası) 100°C'de

100'er saat arayla 1000 saat boyunca uygulanmıştır. Şekil 4.5'te AA2024 alaşımının T6I6 ısıtma işlemi sırasındaki sertlik değişimleri verilmiştir.



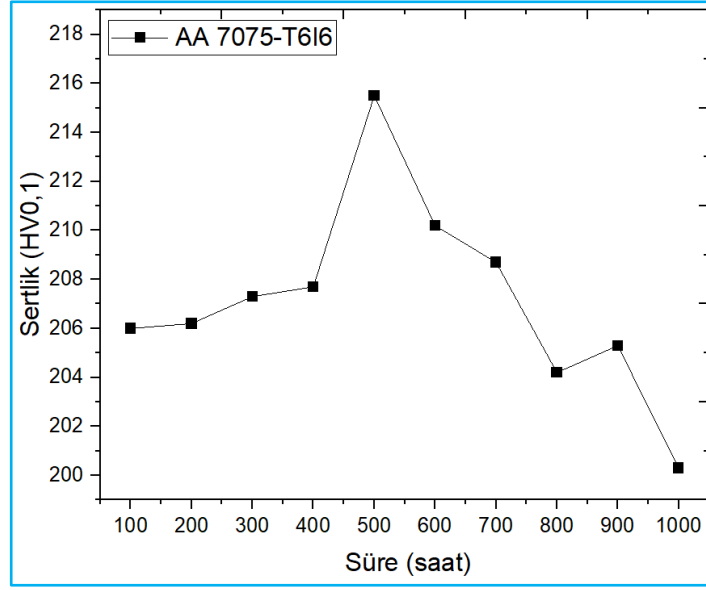
Şekil 4.5: AA2024 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlem sonrası sertlik değişimi

AA2024 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlemi sonucunda Şekil 4.5'te görüldüğü gibi en yüksek sertlik 600. saatte 147,2 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür. AA2024-T6 ısıt işlemi sonucunda 139,2 HV_{0,1} olan sertlik değerinde T6I6 ısıt işlemi sonucunda % 6'lık bir artış görülmüştür.

Al-Cu-Mg gibi ısıt işlem uygulanabilen alaşımlarda bir T6I4 işleminden sonra ikincil sertleşme gözlemlenirken, T6I6 işlemlerinden sonra beklenen gelişmeler geleneksel T6 işlemine yakın olmuştur (Gao ve diğ. 2007).

Staszczuk ve diğ. (2019) üç farklı kompozisyona sahip AA2024 alaşımına uyguladıkları T6I6 ısıt işleminden sonra T6 ısıt işlemine göre aynı ve daha düşük sertlik sonuçlarıyla karşılaşmışlardır (Staszczuk ve diğ. 2019).

Şekil 4.6'da AA7075 alaşımının T6I6 ısıt işlemi sırasındaki sertlik değişimleri verilmiştir.



Şekil 4 6: AA7075 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlem sonrası sertlik değişimi

AA7075 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlemi sonucunda Şekil 4.6'da görüldüğü gibi en yüksek sertlik 500. saatte elde 215,5 HV_{0,1} olarak ölçülmüştür. Bu sertlik T6I4-700'de (211,5 HV_{0,1}) elde edilen sertlik değerinden de yüksektir. T6 (191,2 HV_{0,1}) ısıt işlemine göre % 17'lik bir artış görülmüştür. AA7075 alüminyum alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlemi sonrası dayanım özelliklerinin artması literatür çalışmaları ile uyum içindedir.

Li ve diğ. (2008) yaptıkları çalışmada, AA7075-T6I6 alaşımının taneleri içerisinde η' kaba çökeltilerini gözlemlemiştir ve bir diğer ısıt işleme göre yoğunluğu ve çökelti hacim fraksiyonu daha yüksektir. Bu durum dayanımın ve sertliğin artmasını sağlamaktadır. T6I6 ısıt işleminin ilk adımında (T6) η' fazlarının tane içinde çekirdeklendiğini tespit etmişlerdir. Çok daha uzun bir süre boyunca 65°C'lik daha düşük bir sıcaklıkta kesintili yaşlandırma sırasında, daha yüksek aşırı doyma derecesi daha fazla sayıda, daha ince ve daha yoğun dağılmış çökeltilere neden olur. T6I6 yeniden yaşlandırma işlemi sırasında bazı η' çökeltiler bir miktar büyüyüp irileşse de, AA7075-T6 alaşımına kıyasla AA7075-T6I6 alaşımının nihai mikro yapısında daha fazla tam çökelti hacim fraksiyonu vardır (L1 ve diğ. 2008).

Çeşitli literatür çalışmalarında T6I4 işlemlerinde AA6111 alaşımında da sertlik artışı görülmüştür. T6I6'dan sonra AA6111 alaşımlarında sertlikte iyileştirmeler görülse de çok düşük bir miktarda (4 HV'lik bir artış) bir iyileşmenin önemli bir gelişme olmadığı görülmektedir. Daha önce Buha ve diğ. nin (2006) yaptıkları

çalışmada, T6I6 yaşlandırma işleminin aslında bazı alaşımlarda sertlik artışı için efektif olmadığı sonucu çıkarılabilir (Buha 2006) (Buha 2008).

Lumley ve diğ. (2005) yaptıkları çalışmalarda; T6I4 yaşlandırma sırasında sertlikte önemli bir artış elde etseler de, T6I6 yeniden ısıtma sırasında yumuşama meydana geldiğini ve geleneksel tek aşamalı T6 davranışına göre önemli bir iyileşme olmadığını gözlemlememişlerdir. Sertlik düşüşünün 65°C'de oluşan 1 nm'lik ikincil çökeltilerin tersine dönmesinden (büyümesinden) kaynaklandığı düşünülmektedir. Bu çalışmada yürütülen tam T6I6 kesintili yaşlanmanın etkisizliğinin, 1 nm kümelerinin kısmen veya tamamen tersine çevrilmesinden (büyümesinden) kaynaklandığı gösterilmiştir (Lumley ve diğ. 2005).

Yaşlanma süresi, daha fazla çökelme için uygun hale gelen matristeki aşırı doymuş çözünen maddenin derecesini değiştirerek daha fazla sertleşmenin derecesini kontrol eder. Bununla birlikte, bu etki T6I6 ısıtma işleminden sonra görülmemiştir. T6I6 işlemine tabi tutulan tüm numuneler, 65°C'de T6I4 ısıtma işlemi uygulandığında T6 temperine kıyasla daha yüksek sertlik göstermiştir (Risanti ve diğ. 2009).

Yin ve diğ. (2010) yaptıkları AA2024 alaşımına uyguladıkları T6I6 ısıtma işlemi sonucunda elde edilen sertlik değerlerinin T6 temperine kıyasla daha düşük kaldığını gözlemlemişlerdir (Yin ve diğ. 2010).

Tablo 4.4'de AA2024 ve AA7075 alaşımlarının T0, T6, T6I4 ve T6I6 temper durumlarındaki sertlikleri verilmiştir.

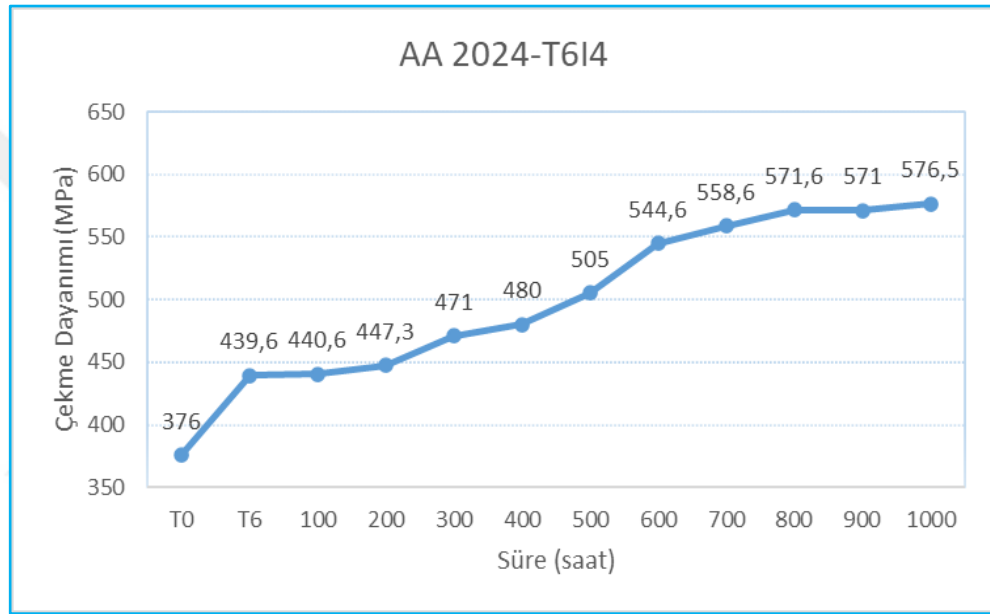
Tablo 4.4: Kesintili yaşlandırmanın AA2024 ve AA7075 alaşımlarının sertliği üzerindeki etkisi

Alaşım	Temper	Sertlik (HV _{0,1})
AA2024	T0	102,9
	T6	139,2
	T6I4-800	160,2
	T6I6-600	147,5
AA7075	T0	104,6
	T6	191,2
	T6I4-700	211,5
	T6I6-500	215,5

4.1.2 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası yapılan çekme deneyi sonuçları

AA2024 ve AA7075 alaşımlarına T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemler sonrasında çekme deneyi uygulanmıştır. Çekme deneyi sonrasında çekme dayanımı (MPa), akma dayanımı (MPa) ve kopma uzaması (%) değerleri ölçülmüştür.

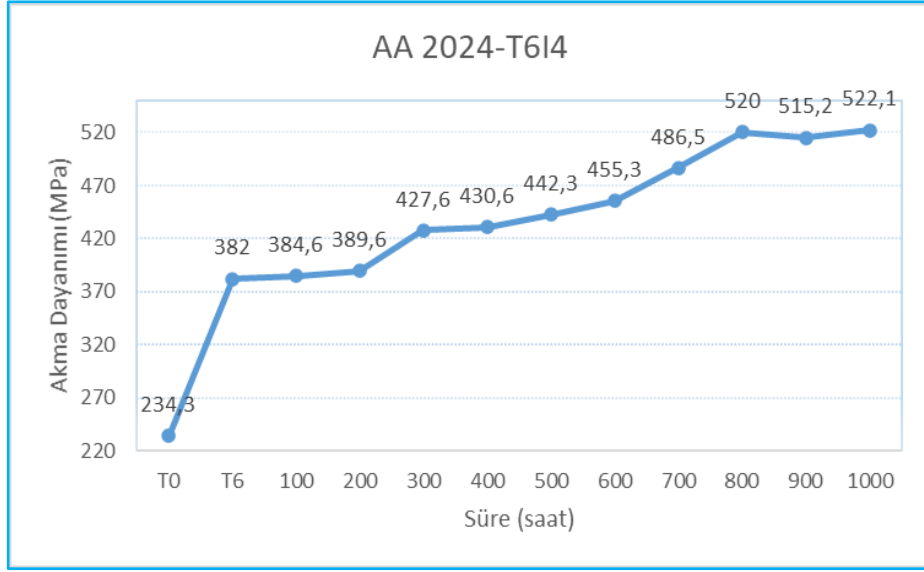
Şekil 4.7’de AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlem sonrası çekme dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.7: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlem sonrası çekme dayanımı değişimi

Şekil 4.7’de görüldüğü gibi uzun sürelerde yapılan ısıt işlemler sonucu çekme dayanımında büyük bir artış yaşanmıştır. T6 durumunda 439,6 MPa olan çekme dayanımı % 30’luk bir artışla T6I4-800 durumunda 571,6 MPa seviyesine yükselmiştir.

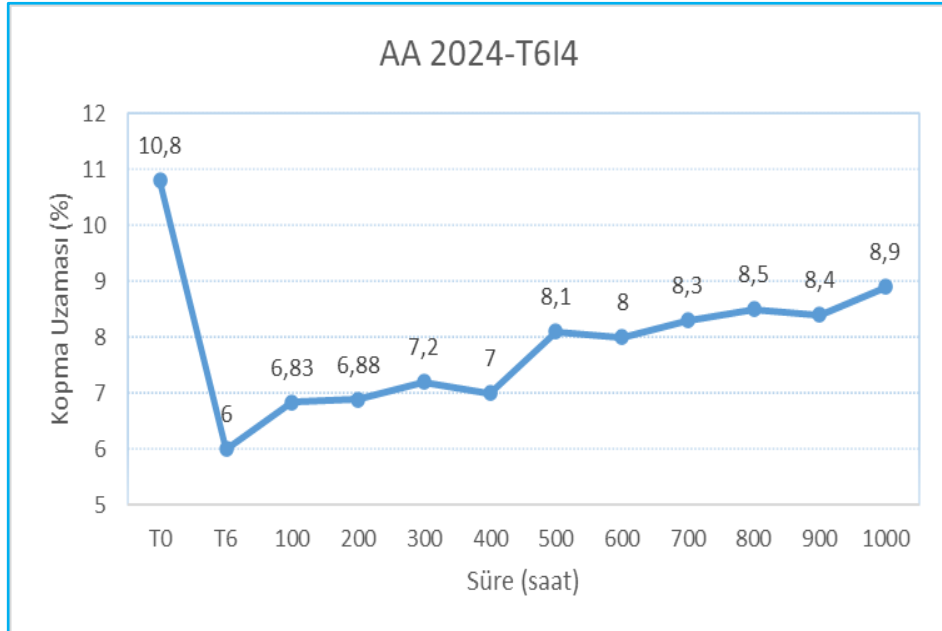
Şekil 4.8’de AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlem sonrası akma dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.8: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıtım sonrası akma dayanımı değişimi

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi uzun sürelerde yapılan ısıtım işlemleri sonucu akma dayanımında büyük bir artış yaşanmıştır. T6 durumunda 382 MPa olan akma dayanımı % 36,1’lik bir artışla T6I4-800 durumunda 520 MPa seviyesine yükselmiştir.

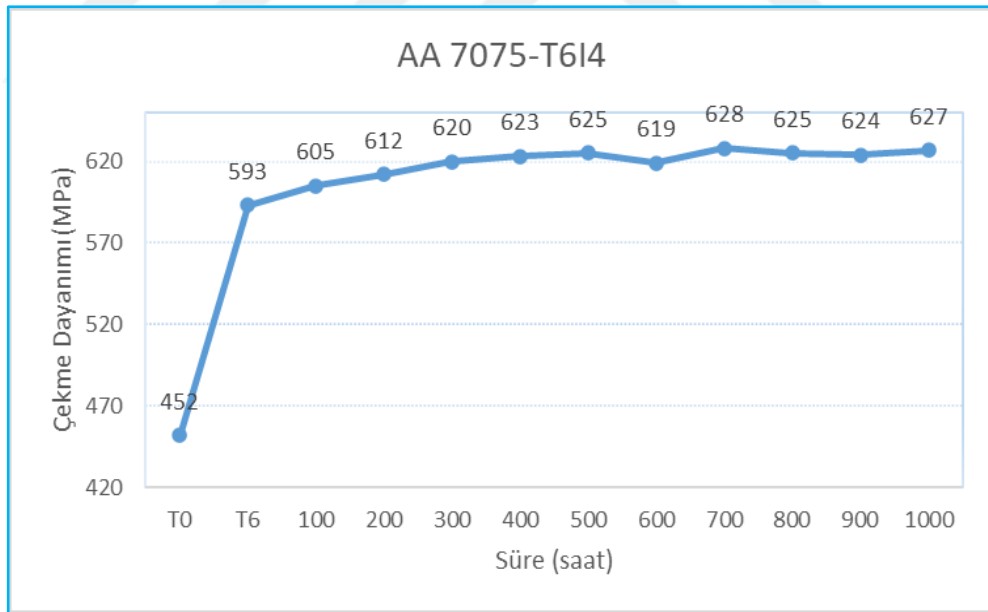
Şekil 4.9’da AA2024 alaşımına ait T0, T6 ve T6I4 ısıtım sonrası kopma uzaması verilmiştir.



Şekil 4.9: AA2024 alaşımına ait T0, T6 ve T6I4 ısıtım sonrası kopma uzaması değişimi

Şekil 4.9’da görüldüğü üzere T6 durumunda AA2024 alaşımı % 6’lık bir kopma uzamasına sahip iken, bu değer T6I4-800 durumunda % 41,66’lık bir artış ile % 8,5 seviyesine yükselmiştir. T6I4 kesintili yaşlandırma ile çekme ve akma dayanımı artarken ters bir özellik olan kopma uzaması da artmıştır. Literatürle uyumlu olan bu sonuçlar, T6I4 temperinin, gelişmiş kırılma tokluğu ile birlikte T6 koşuluna yakın ve daha yüksek çekme özellikleri sağladığını göstermiştir (Lumley 2004). Böylece spesifik dayanım gerektiren alanlarda kullanılan alüminyum alaşımları için daha fazla şekillendirme kabiliyeti sunarak endüstriyel uygulamalarda geniş bir dayanım/tokluk skalasında kullanım imkanı sağlanabilecektir. Bu sonuçlarla uyumlu bir başka çalışmada Buha ve diğ. (2008), T6I4 kesintili yaşlandırma işleminin, T6 yaşlandırma işlemine kıyasla AA7050 alaşımında ince taneli çökeltilerin sayısal yoğunluğunu arttırdığını, özellikle çıta şeklindeki η' fazlarının dayanımını ve aynı zamanda kırılma tokluğunu iyileştirdiğini yorumlamışlardır (Buha ve diğ. 2008).

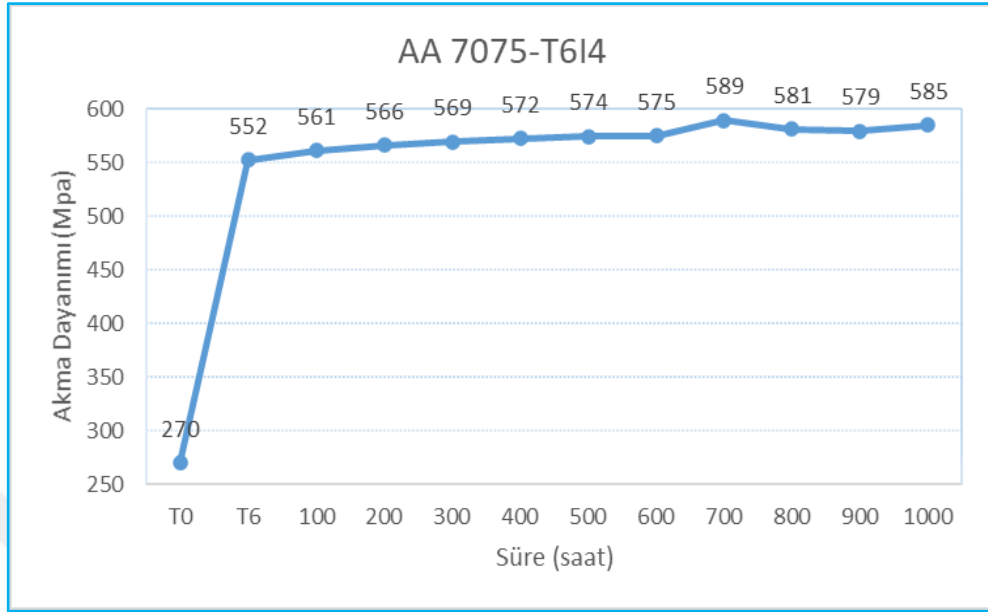
Şekil 4.10’da AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıtıl işlem sonrası çekme dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.10: AA 7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıtıl işlem sonrası çekme dayanımı değişimi

Şekil 4.10’da görüldüğü gibi uzun sürelerde yapılan ısıtıl işlemler sonucu çekme dayanımında büyük bir artış yaşanmıştır. T6 durumunda 593 MPa olan çekme dayanımı % 5,9’luk bir artışla T6I4-700 durumunda 628 MPa seviyesine yükselmiştir.

Şekil 4.11’de AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlemler sonrası akma dayanımı değışimi verilmiştir.

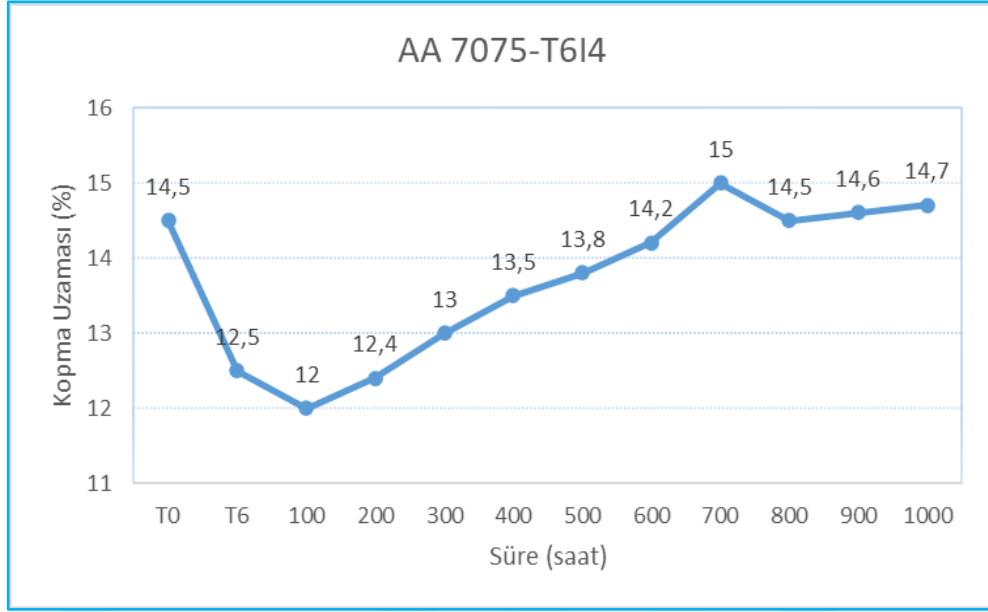


Şekil 4.11: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlemler sonrası akma dayanımı değışimi

Şekil 4.11’de görüldüğü gibi AA2024 alaşımına benzer şekilde AA7075 alaşımında da uzun sürelerde yapılan ısıt işlemler sonucu çekme dayanımında büyük bir artış yaşanmıştır. T6 durumunda 552 MPa olan akma dayanımı % 6,7’lik bir artışla T6I4-700 durumunda 589 MPa seviyesine yükselmiştir.

GP bölgeleri ve yoğun η' fazları, T6I4 kesintili yaşlandırma sonrası çökeltilerin en önemli özellikleri olan alaşımın maksimum çekme özelliğinin ana nedenlerindendir. Kaba η fazı, η' fazından η fazına geçişin kafes tutarlılık derecesini düşürmesi nedeniyle çökelme kuvvetlendirmesini zayıflatır. İnce yaşlandırma çökeltileri ve fazla sayısal yoğunluğu olan alaşımlar yüksek dayanıma sahip olma eğilimindedir. T6I4 işleminin çökelmeyi kuvvetlendirme etkisi T6 yaşlandırmasından daha iyidir (Luo, 2022).

Şekil 4.12’de AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlemler sonrası kopma uzaması değışimi verilmiştir.



Şekil 4.12: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıtıl işlem sonrası kopma uzaması değişimi

Şekil 4.12’de görüldüğü üzere T6 durumunda alaşım % 12,5’lik bir kopma uzamasına sahip iken T6I4-700 durumunda bu değer % 17’lik bir artış ile % 15,2 seviyesine yükselmiştir. Bu durumda da çekme ve akma dayanımı artarken ters bir özellik olan kopma uzaması da artmıştır.

Çökelti ve hareketli dislokasyonlar arasındaki etkileşimin bir sonucu olarak, mekanik özellikleri daha da geliştirmek için alüminyum alaşımları için çok aşamalı yaşlandırma işlemleri geliştirilmiştir. Ayrıca, hem kesilebilir GP bölgeleri hem de kaymaya dayanıklı η' çökelti içeren çift modlu mikro yapılar, T6I4 (65°C) kesintili yaşlandırma işlemi sonucunda oluşur. Bir arada bulunan bu fazlar alüminyum alaşımının akma dayanımı ve sünekliği ile kırılma tokluğu arasındaki ters ilişkiyi azaltacak şekilde güçlendirme mekanizmalarının kombinasyonunu sağlar. Süneklikteki artış, deformasyon işlemi sırasında oluşan ve dislokasyonlar tarafından kesilebilir GP bölgelerinin çözünmesinden kaynaklanabilir. Bu mekanizma, kesilebilir çökelti gerinim kaynaklı çözünmesi olarak bilinir ve çözünenin GP bölgelerinden Al matrisine yeniden bölünmesi, Al matrisinin plastisitesinde gerinim sertleşmesine ve süneklikte iyileşmeye olumlu bir katkı sağlar (Carvalho ve diğ. 2022). Bu durum Orowan mekanizmasının uygulaması için iyi bir örnek teşkil eder.

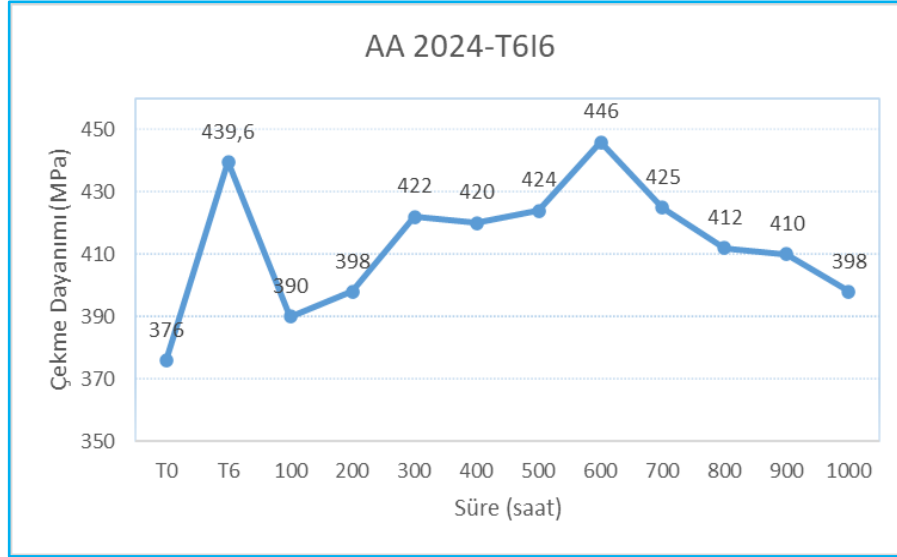
T6I4 işlemine tabi tutulan Al-4Cu bazlı bir alaşımın transmisyon elektron mikroskopisi incelendiğinde ortaya çıkan çökelti yapısı iki modlu bir boyut dağılımı

sergiler. T6 yaşlandırma sıcaklığında plaka şeklinde, kaymaya dirençli θ' (Al_2Cu) çökelti oluşur ve T6I4 (65°C) sıcaklıkta kesilebilir Guinier-Preston (GP) bölgeleri oluşur.

T6I4 işlemi tarafından üretilen iki modlu çökelti dağılımlarının, bir T6 işleminden daha yüksek bir akma dayanımı sağlar. Al-Cu bazlı alaşımlar, T6 işlemi sırasında θ' büyötmek için kullanılacak olan Cu'nun bir kısmının bunun yerine daha düşük bir sıcaklıkta büyük bir GP bölgesi yoğunluğu oluşturmak için kullanılabileceğı düşünölebilir. Mekanik özelliklerdeki değışim pozitiftir. Kesintili yaşlandırma işlemleri ile ters mekanik özellikler olan akma dayanımı ve yüzde uzama değeri aynı anda artabilir. Bu sonuçlar Chen ve diğ.'nin yaptığı çalışma ile uyumludur. GP bölgelerinin gerilme kaynaklı çözünmesinin ve bunun sonucunda Cu'nun katı çözeltiliye yeniden bölünmesinin, kesintili yaşlanmanın Al-Cu alaşımlarında akma dayanımı ve uzama üzerinde olumlu etki sağlar (Chen ve diğ. 2013).

Gerinme sırasında Cu'nun GP bölgelerinden katı çözeltiliye dinamik olarak yeniden bölünmesi, gerinme ile artan bir katı çözeltili dayanım artırma katkısı ile sonuçlanır. Bu, gerinim sertleşmesine pozitif fakat küçük bir katkı sağlar. Germe sırasında katı çözeltilide artan bir Cu konsantrasyonu, Al matrisinin içsel plastisitesini değıştirir. Al-Cu katı çözeltilerinde baskın mekanizma, çözeltilideki Cu'nun dislokasyon-dislokasyon birleşim noktası kuvveti üzerindeki etkisidir. Katı çözeltilideki Cu, dislokasyon-dislokasyon bağlantı kuvvetini güçlü bir şekilde etkiler ve bu, alaşımların gelişmiş bir gerinim sertleşmesine yol açabilir (Chen ve diğ. 2013).

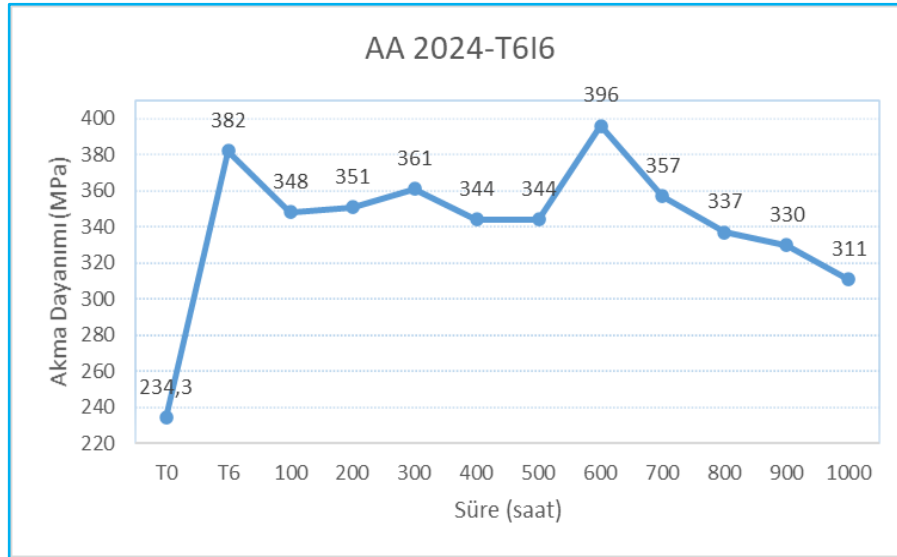
T6I4 ısıt işleminde belirlenen ısıt işlem süresinin ardından numunelere T6I6 ısıt işlemi uygulanmıştır. Şekil 4.13'te AA2024 alaşımına ait T6I6 ısıt işlem sonrası çekme dayanımı değışimi verilmiştir.



Şekil 4.13: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası çekme dayanımı değişimi

Şekil 4.13'te görüldüğü gibi AA2024 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlemi sonucunda çekme dayanımı T6 (439,6 MPa) ısıt işlemine göre yaklaşık % 2'lik bir artış ile 446 MPa değerine ulaşmıştır.

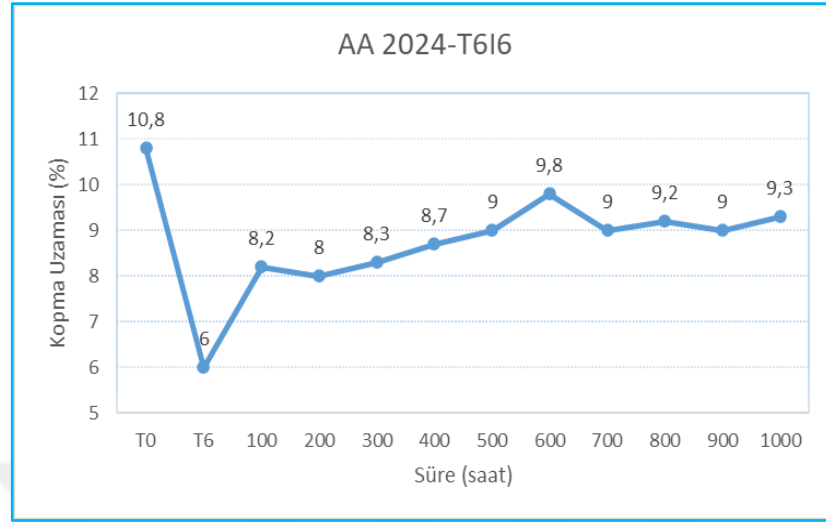
Şekil 4.14'te AA2024 alaşımına ait T6I6 ısıt işlem sonrası akma dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.14: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası akma dayanımı değişimi

Şekil 4.14'de görüldüğü üzere AA2024 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlemi sonucunda akma dayanımı T6 ısıt işlemine göre % 3,6'lık az bir artış ile 396 MPa değerine ulaşmıştır.

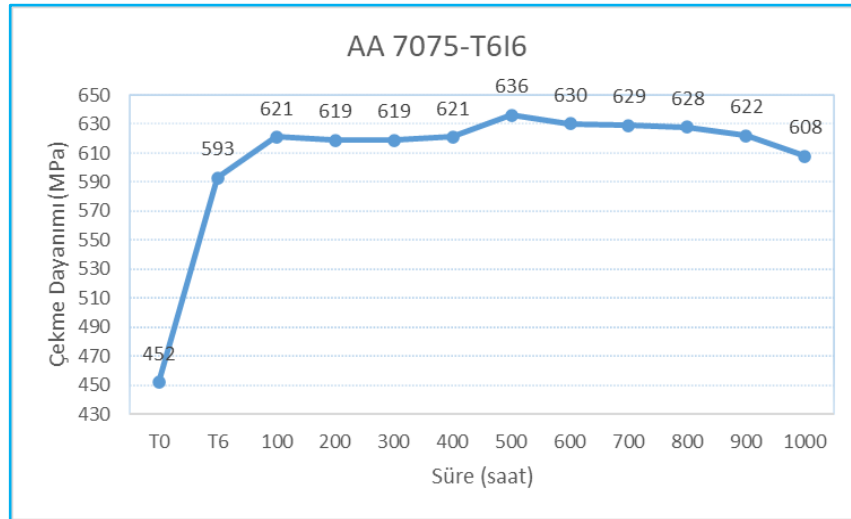
Şekil 4.15’de AA2024 alaşımına ait T6I6 ısıt işlem sonrası kopma uzaması değişimi verilmiştir.



Şekil 4.15: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası kopma uzaması değişimi

Şekil 4.15’te görüldüğü gibi kopma uzaması değeri ise T6 durumunda % 6 iken T6I6 kesintili ısıt işlem sonrasında % 63 ‘lük bir artış ile %9,8 değerine ulaşmıştır.

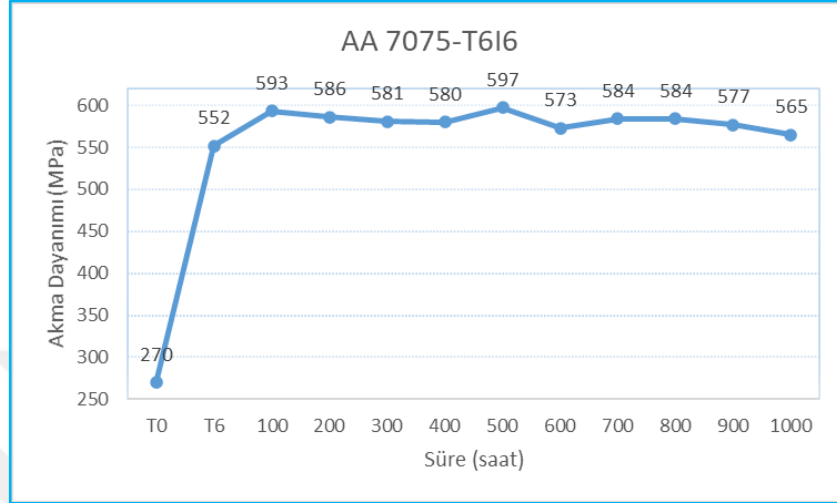
Şekil 4.16’da AA7075 alaşımına ait T6I6 ısıt işlem sonrası çekme dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.16: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası çekme dayanımı değişimi

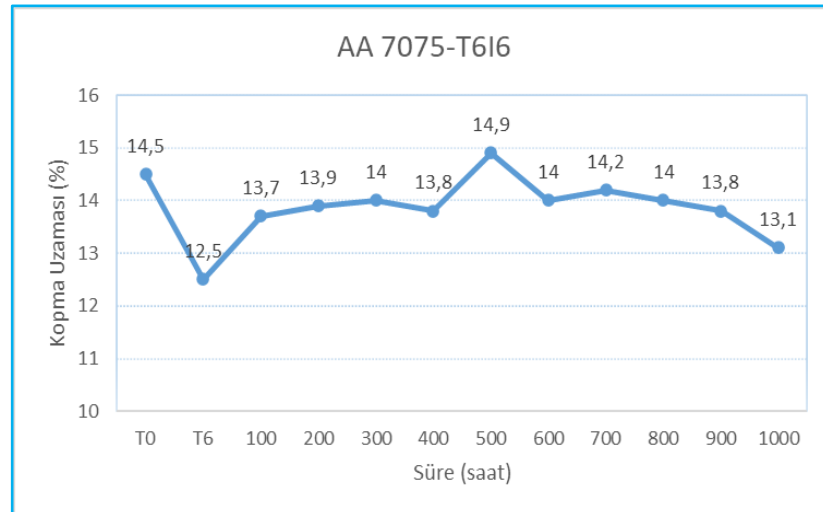
Şekil 4.16’da görüldüğü gibi AA7075 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlemi sonucunda çekme dayanımı T6 (593 MPa) ısıt işlemine göre yaklaşık % 7 artış ile 636 MPa değerine ulaşmıştır.

Şekil 4.17’de AA7075 alaşımına ait T6I6 ısıt işlem sonrası akma dayanımı değişimi verilmiştir. Şekil 4.17’de görüldüğü üzere AA 7075 alaşımına uygulanan T6I6 ısıt işlemi sonucunda akma dayanımı T6 ısıt işlemine göre % 8 artış yaşanarak 597 MPa değerine yükselmiştir.



Şekil 4.17: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası akma dayanımı değişimi

Şekil 4.18’de AA 7075 alaşımına ait T6I6 ısıt işlem sonrası kopma uzaması değişimi verilmiştir. Şekil 4.18’de görüldüğü gibi kopma uzaması değeri ise T6 durumunda % 12,5 iken T6I6 kesintili ısıt işlem sonrasında % 21,6’lık bir artış ile % 15,2 değerine ulaşmıştır.



Şekil 4.18: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası kopma uzaması değişimi

Genel olarak incelendiğinde AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma ısıt işlemleri sonrasında geleneksel T6 ısıt işlemine göre her iki alaşımda da artış görülmüştür.

AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımları üzerindeki çekme özelliklerine etkisi Tablo 4.5’de gösterilmiştir

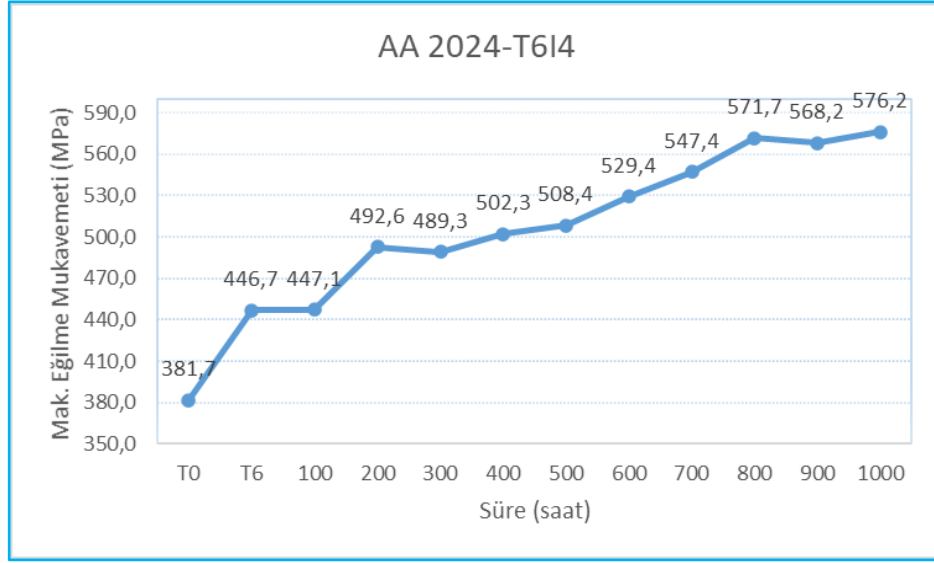
Tablo 4.5: Kesintili yaşlandırmanın AA2024 ve AA7075 alaşımlarındaki çekme özelliklerine etkisi

Alaşıım		Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Kopma Uzaması (%)
AA 2024	T6	439,6	382	6
	T6I4-800	571,6	502,6	8,5
	T6I6-600	446	396	9,8
AA 7075	T6	593	552	12,5
	T6I4-700	628	589	14,6
	T6I6-500	636	597	15,2

4.1.3 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası yapılan üç nokta eğme deneyi sonuçları

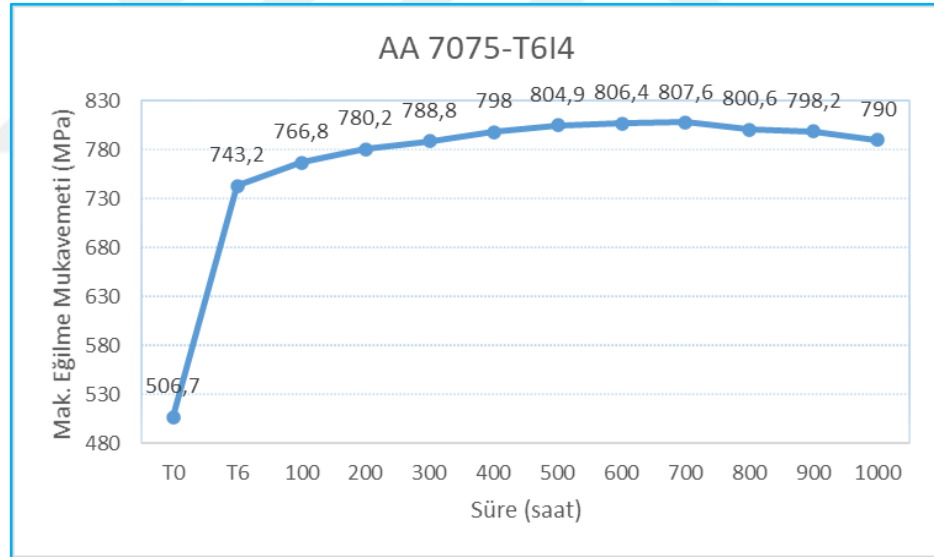
AA2024 ve AA7075 alaşımlarına T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemler sonrasında üç nokta eğme deneyi uygulanmıştır. Üç nokta eğme deneyi sonrasında maksimum eğilme dayanımı hesaplanmıştır.

Şekil 4.19’da AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi verilmiştir. Şekil 4.19’da görüldüğü gibi uzun sürelerde yapılan ısıt işlemler sonucu maksimum eğilme dayanımında artış yaşanmıştır. T6 durumunda 446,7 MPa olan maksimum eğilme dayanımı % 29’luk bir artışla T6I4-800 durumunda 571,2 MPa seviyesine yükselmiştir.



Şekil 4.19: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi

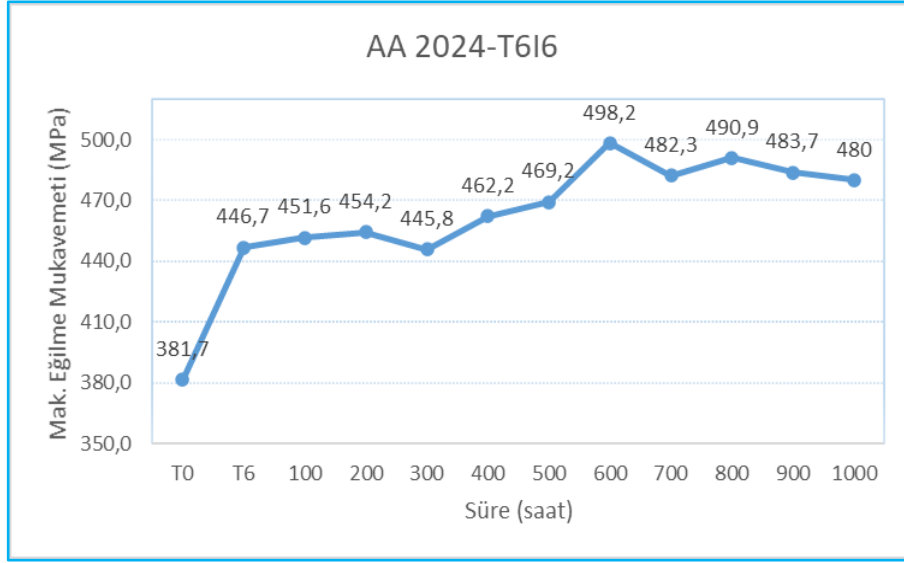
Şekil 4.20’de AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.20: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I4 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi

Şekil 4.20’de görüldüğü gibi uzun sürelerde yapılan ısıt işlemler sonucu maksimum eğilme dayanımında artış yaşanmıştır. T6 durumunda 743,2 MPa olan maksimum eğilme dayanımı % 8,5’luk bir artışla T6I4-700 durumunda 807,6 MPa seviyesine yükselmiştir.

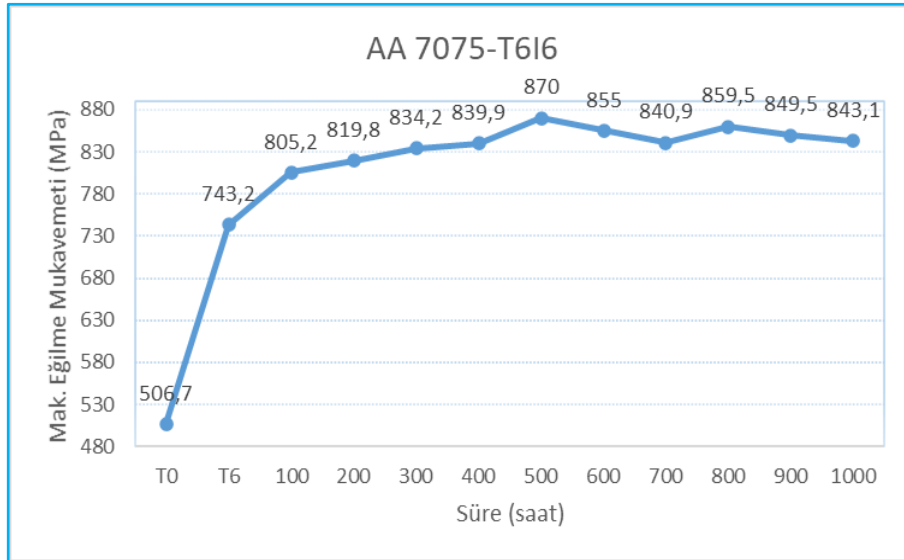
Şekil 4.21’de AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.21: AA2024 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi

T6I6 ısıt işlemi sonrası AA2024 alaşımı için maksimum eğilme dayanımı T6'da 446,7 MPa seviyesinden T6I6-600'de % 11,5'lik artış ile 498,2 MPa seviyesine yükselmiştir.

Şekil 4.22'de AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi verilmiştir.



Şekil 4.22: AA7075 alaşımına ait T6 ve T6I6 ısıt işlem sonrası maksimum eğilme dayanımı değişimi

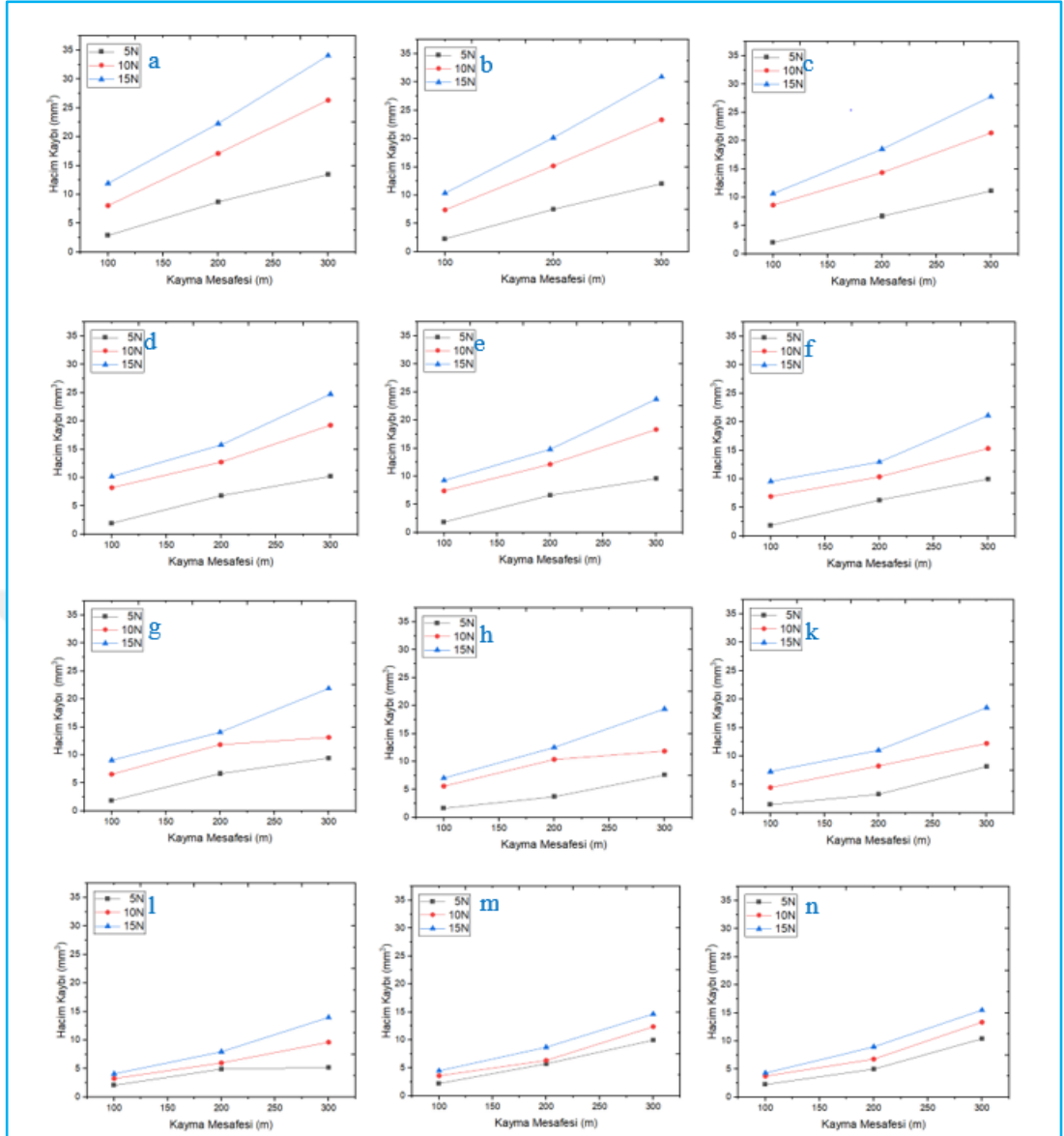
Şekil 4.22 incelendiğinde T6I6 ısıt işlemi AA7075 alaşımı için maksimum eğilme dayanımı T6'da 743,2 MPa seviyesinden T6I6-500'de % 17 artış ile 870 MPa seviyesine yükselmiştir.

Kafes yapıda bulunan boşluklar, yaşlandırma süresi arttıkça GP bölgelerinin oluşumuna neden olur. GP bölgeleri, yaşlandırma işleminin ilk aşamalarında meydana gelirler. Bu bölgeler, matrsten daha küçük atom topluluklarının aşırı doymuş katı eriyikten çökmesi sonucu oluşurlar. GP bölgeleri matrisle uyumlu olsalar da kararsızdırlar. Yapıda meydana gelen bölgesel segregasyonlar, GP bölgeleri içindeki kafes düzlemlerinin distorsiyona uğramasına sebep olur ve matris içindeki atom tabakalarını genişletir. Ayrıca, yaşlandırma işleminin neden olduğu çöktiller, dislokasyon hareketini engelleyerek dayanımda artışa yol açarlar. Bu artış aynı zamanda malzemenin sertliğini de artırır. Sertlik artışı da eğme dayanımını artırır (Özkavak ve Bıçaklı 2018).

4.1.4 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası yapılan aşınma deneyi sonuçları

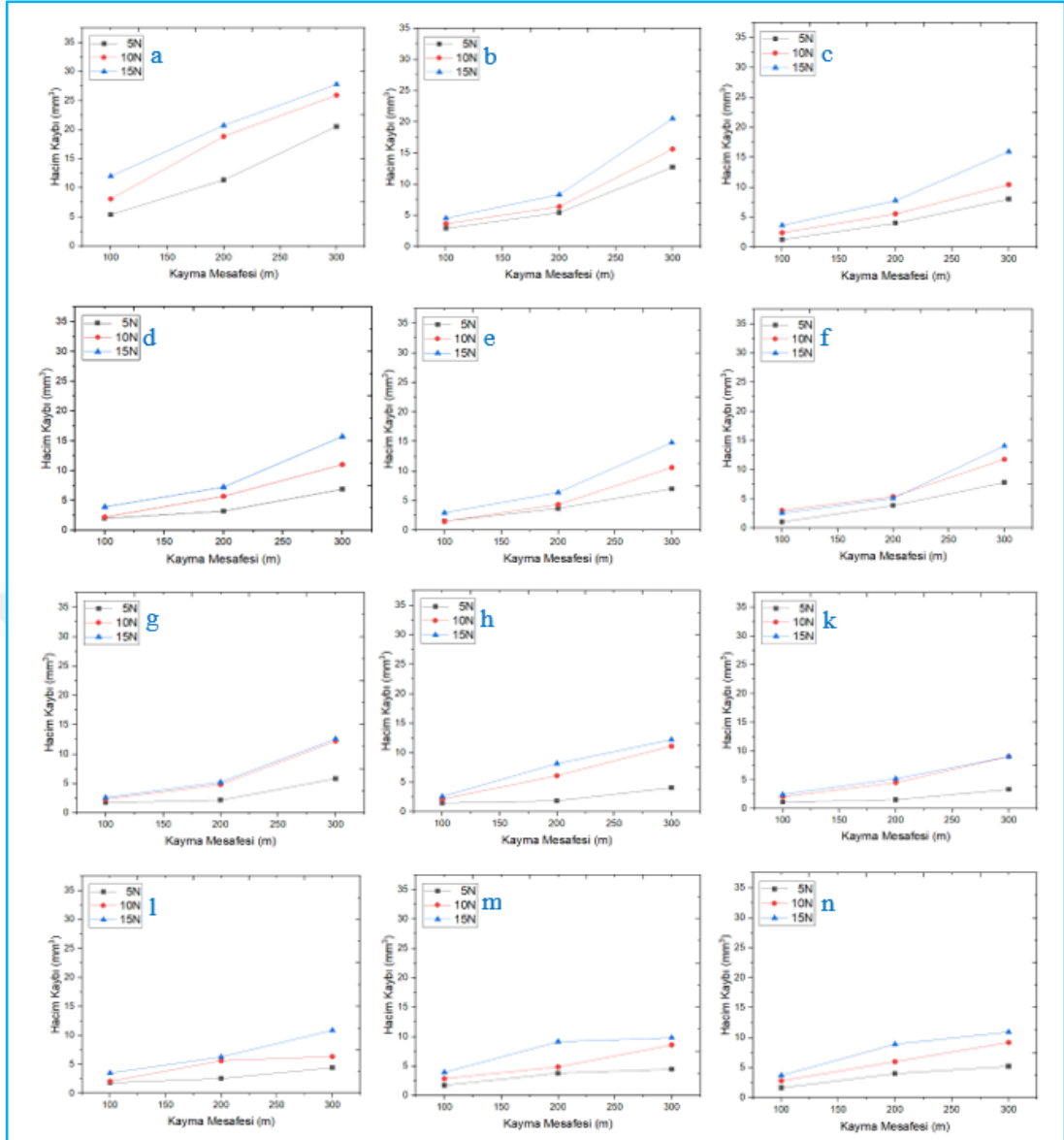
AA2024 ve AA7075 alaşımlarına T0 ve T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemler sonrasında aşınma deneyi uygulanmıştır. Aşınma deneyi sonrasında hacim kaybı-kayma mesafesi, aşınma oranı-kayma mesafesi ve sürtünme katsayısı-kayma mesafesi grafikleri çizilmiştir.

Şekil 4.23’de AA2024 alaşımının T6I4 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki hacim kaybı (mm^3) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir. Şekil 4.23 incelendiğinde AA2024 alaşımına uygulanan T6I4 ısıt işleminin numunelerin hacim kayıpları ile ilişkili olduğu görülmektedir. Isıl işlem süresine bağlı olarak hacim kayıpları 800. saate kadar azalmıştır. T6 durumunda numunede 15 N yük altında 30 mm^3 hacim kaybı görülmüştür. En düşük hacim kaybına uğrayan numune ise $13,56 \text{ mm}^3$ ile T6I4-800 numunesidir. Bu sonuçlar sertlik ile uyum içersindedir.



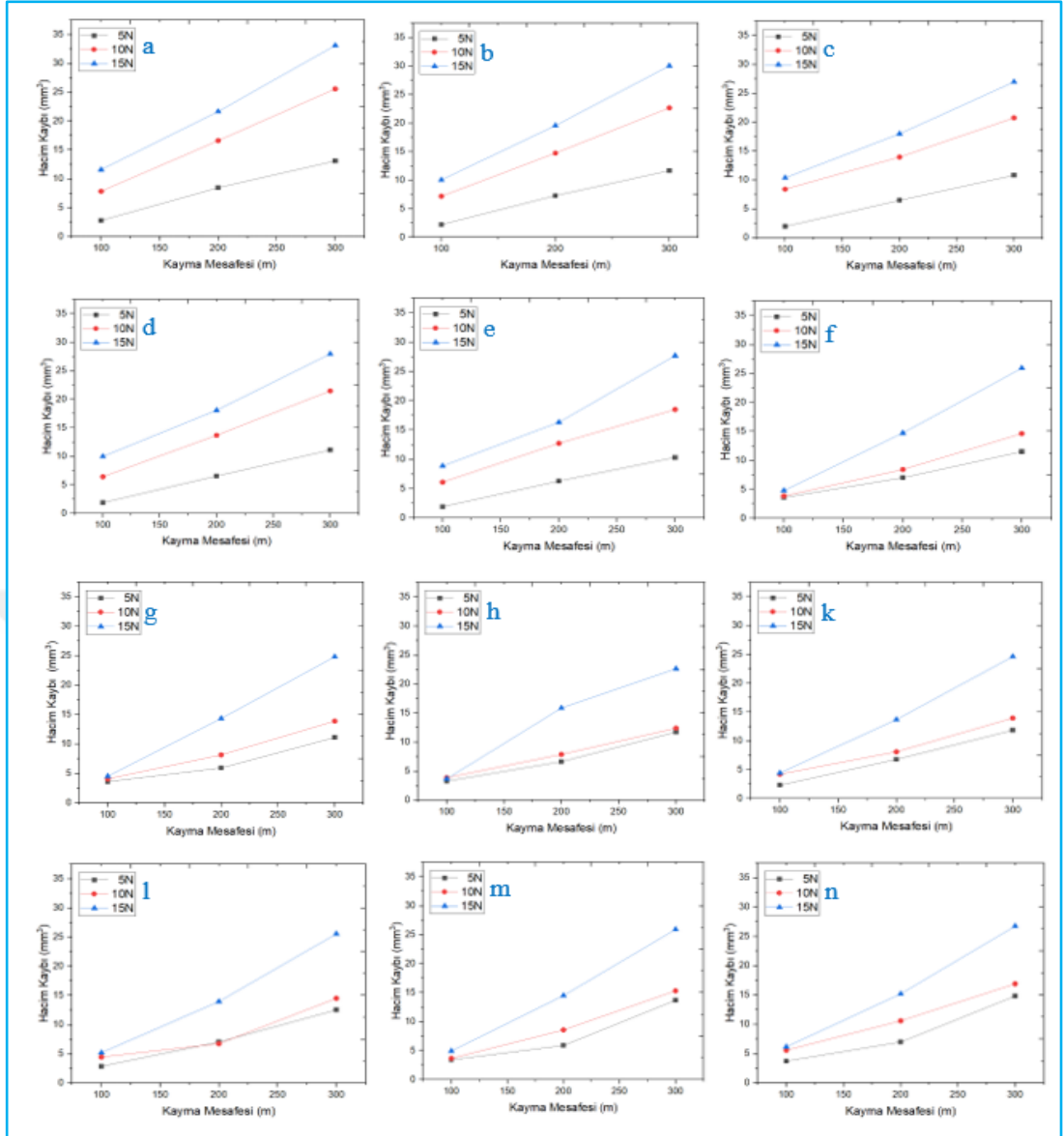
Şekil 4.23: AA2024 T6I4 işleme göre kayma mesafesine bağlı hacim kaybı oranları
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.24’de AA7075 alaşımının T6I4 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki hacim kaybı (mm^3) -kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir. Şekil 4.24 incelendiğinde AA7075 alaşımına uygulanan T6I4 ısıtıl işleminin numunelerin hacim kayıpları ile ilişkili olduğu görülmektedir. Isıl işlem süresine bağlı olarak hacim kayıpları 700. saate kadar azalmıştır. T6 durumunda numunede 15 N yük altında $20,5 \text{ mm}^3$ hacim kaybı görülmüştür. En düşük hacim kaybına uğrayan numune ise $9,2 \text{ mm}^3$ ile T6I4-700 numunesidir. Bu sonuçlar sertlik ile uyum içerisindedir.



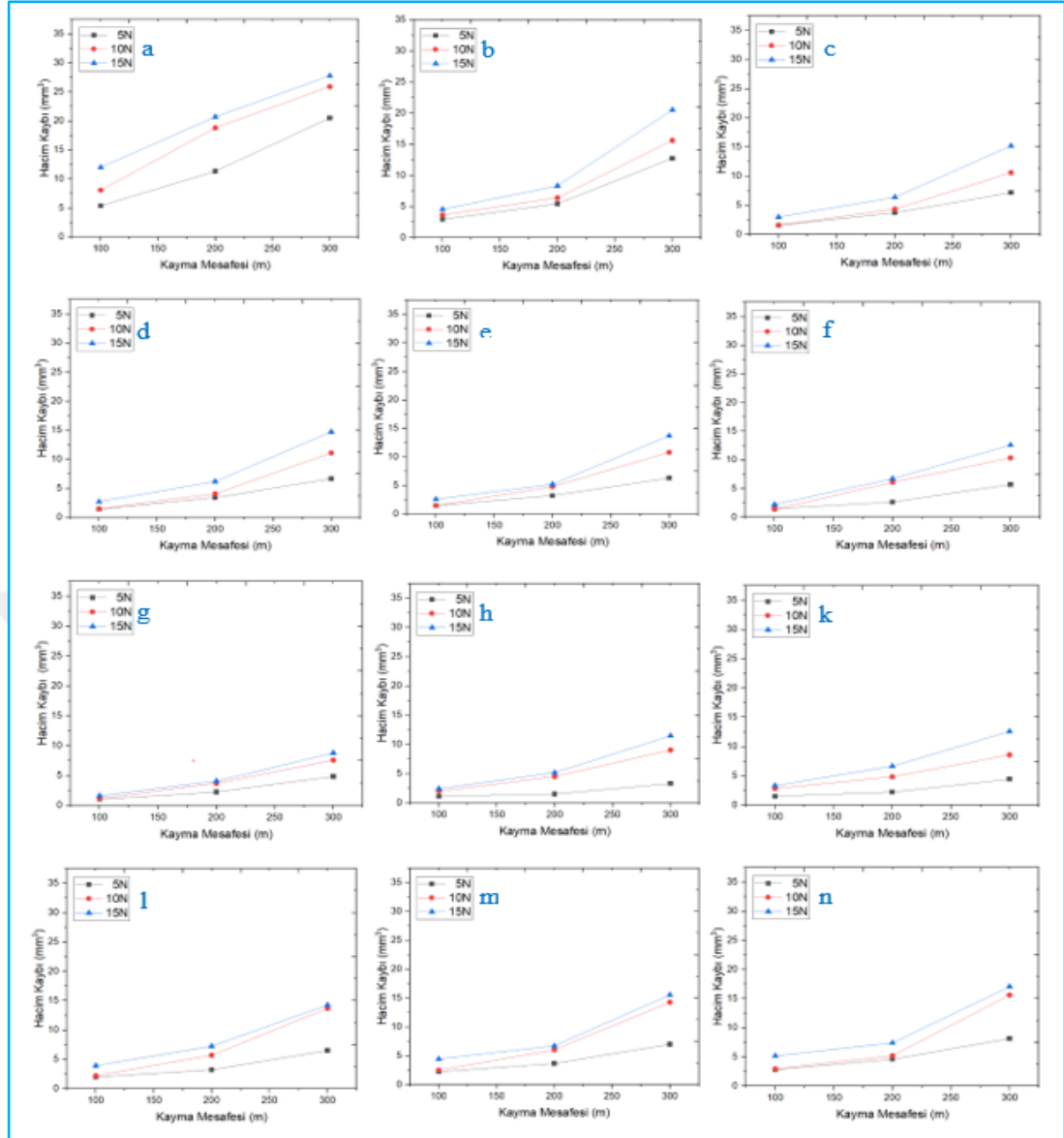
Şekil 4.24: AA7075 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı hacim kaybı oranları
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.25’de AA2024 alaşımının T6I6 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki hacim kaybı (mm^3) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir. Şekil 4.25 incelendiğinde AA2024 alaşımına uygulanan T6I4 ısıtıl işleminin numunelerin hacim kayıpları ile ilişkili olduğu görülmektedir. Isıl işlem süresine bağlı olarak hacim kayıpları 600. saate kadar azalmıştır. T6 durumunda numunede 15 N yük 30 mm^3 hacim kaybı görülmüştür. En düşük hacim kaybına uğrayan numune ise $22,6 \text{ mm}^3$ ile T6I4-600 numunesidir. Bu sonuçlar sertlik ile uyum içersindedir.



Şekil 4.25: AA2024 T616 işlemine göre kayma mesafesine bağlı hacim kaybı oranları
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.26’da AA7075 alaşımının T616 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki hacim kaybı (mm^3) -kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir. Şekil 4.26 incelendiğinde AA 7075 alaşımına uygulanan T616 ısıtılmasının numunelerin hacim kayıpları ile ilişkili olduğu görülmektedir. Isıl işlem süresine bağlı olarak hacim kayıpları 500. saate kadar azalmıştır. T6 durumunda numunede 15 N yük altında $20,5 \text{ mm}^3$ hacim kaybı görülmüştür. Maksimum yük altında (15 N) en düşük hacim kaybına uğrayan numune ise $8,8 \text{ mm}^3$ ile T616-500 numunesidir. Bu sonuçlar sertlik ile uyum içerisindedir.



Şekil 4.26: AA7075 T616 işlemine göre kayma mesafesine bağlı hacim kaybı oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Aşınma davranışlarının karakterize edilmesinde en yaygın olarak kullanılan parametrelerden biri hacim kaybıdır. T6, T6I4 ve T6I6 ısıtıl işlemlerinin AA2024 ve AA7075 alaşımları üzerindeki etkisinin belirlemek amacıyla hacim kaybı incelenmiştir (T6I4 için Şekil 4.23 ve Şekil 4.24, T6I6 için Şekil 25 ve Şekil 26).

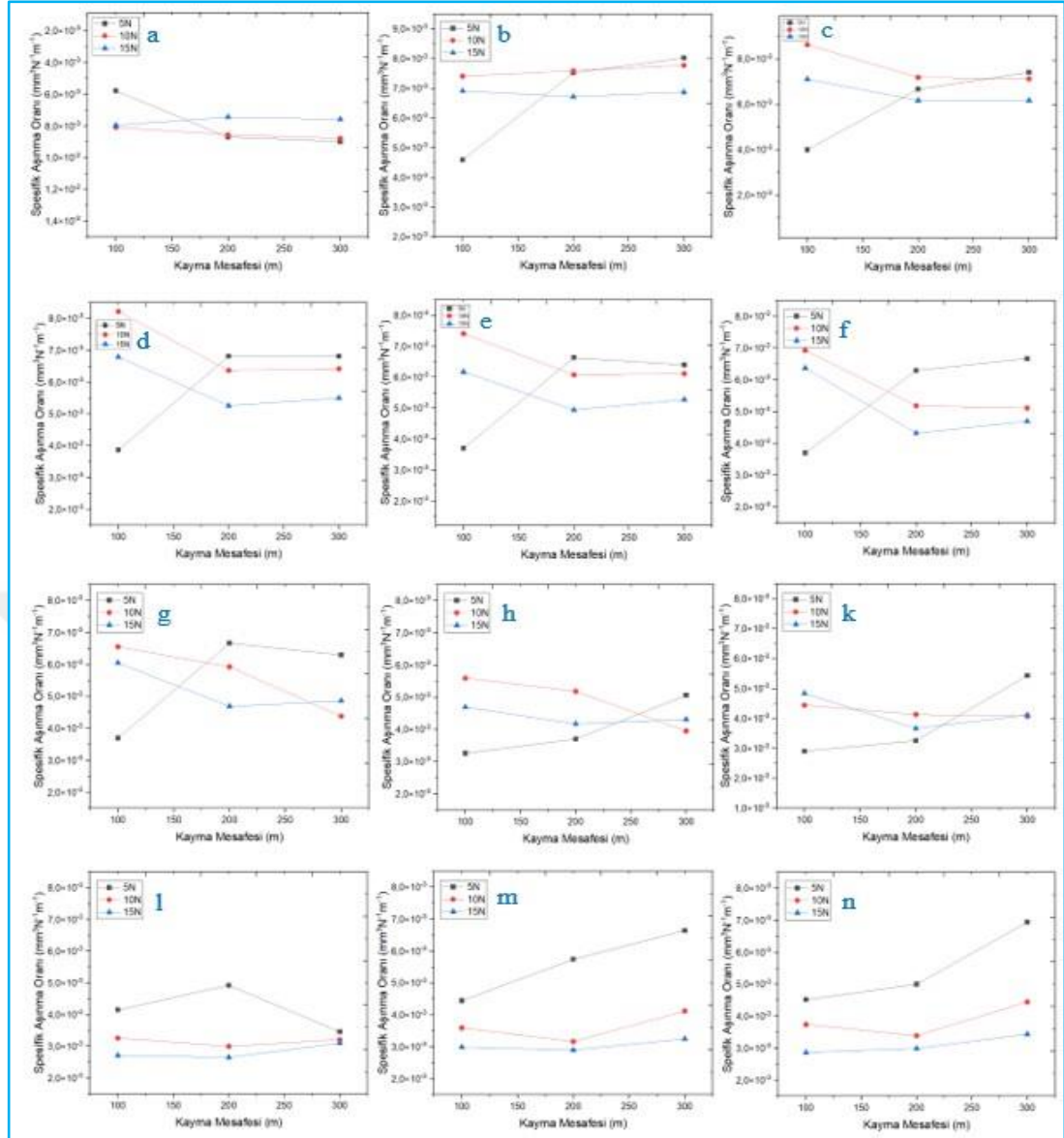
Hacim kaybı (mm^3) grafikleri detaylı incelendiğinde T6, T6I4 ve T6I6 ısıtıl işlemlerinin AA2024 ve AA7075 alaşımlarının aşınma davranışlarını doğrudan etkilediği belirlenmiştir. T6 ve T6I4 ısıtıl işlemleri karşılaştırıldığında T6I4 ısıtıl işlem uygulanmış numunelerin daha yüksek bir aşınma direncine sahip olduğu görülmüştür. T6I4 ısıtıl işlem numunelerinde AA2024 için T6I4-800 numunesinin, AA7075 için

T6I4-700 numunesinin tüm numuneler içinde en yüksek aşınma direncine sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu iki numunedeki aşınma direncinin yüksek olması numunelerin diğer numunelerden daha yüksek sertliğe sahip olmasıyla açıklanabilir. Diğer bir taraftan en düşük aşınma direncinin T0 numunelerde olduğu belirlenmiştir.

Tüm numunelerde literatürle uygunluk göstererek artan kayma mesafesi ve artan yük ile hacim kayıplarının önemli derecede arttığı belirlenmiştir (Ersöz ve Ovalı 2018). Yüksek kuvvet ve kayma mesafelerinde artan hacim kaybı aşınma temas alanı ve yüzeyindeki artan sıcaklık ile açıklanabilir. T6I4 ısıtılmasının aşınma direnci üzerindeki pozitif etki T6I4 ısıtılma sırasında çökeltilerin daha ince ve homojen olarak oluşması ile ifade edilebilir (Kaczmarek ve diğ 2013).

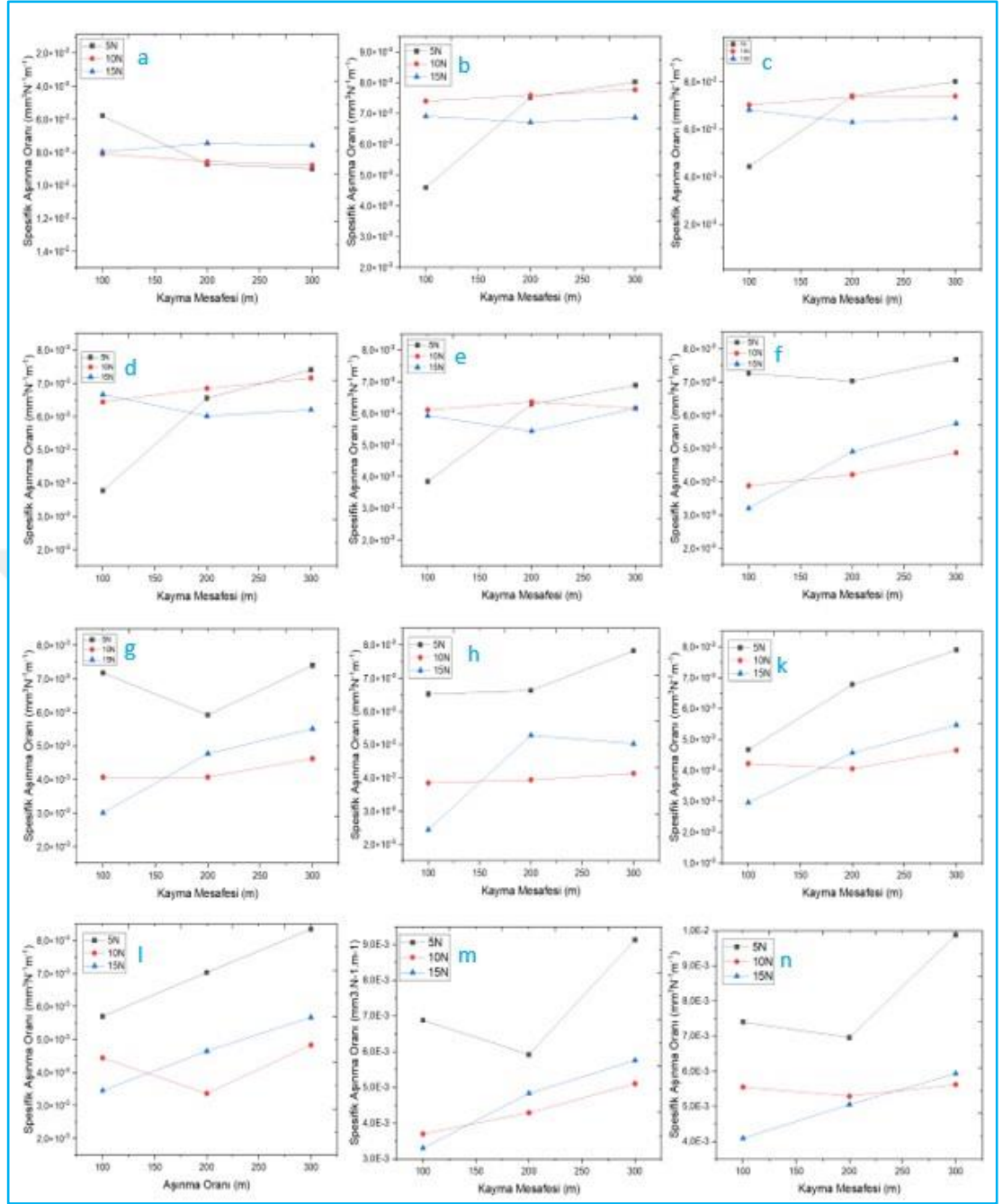
T6 ve T6I6 ısıtılma işlemleri karşılaştırıldığında T6I6 ısıtılma işlemiyle AA2024 alaşımının hacim kaybı değeri azalmıştır. Bu durumun T6I6 ısıtılmasının T6 ısıtılma işlemine göre numunenin sertliğini artırmasından dolayı olduğu söylenebilir. Aynı durum AA7075 alaşımında da görülmüştür. T6I6 ısıtılmasının hacim kaybını büyük ölçüde azalttığı görülmüştür.

Şekil 4.27’de AA2024 alaşımının T6I4 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki spesifik aşınma oranı ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



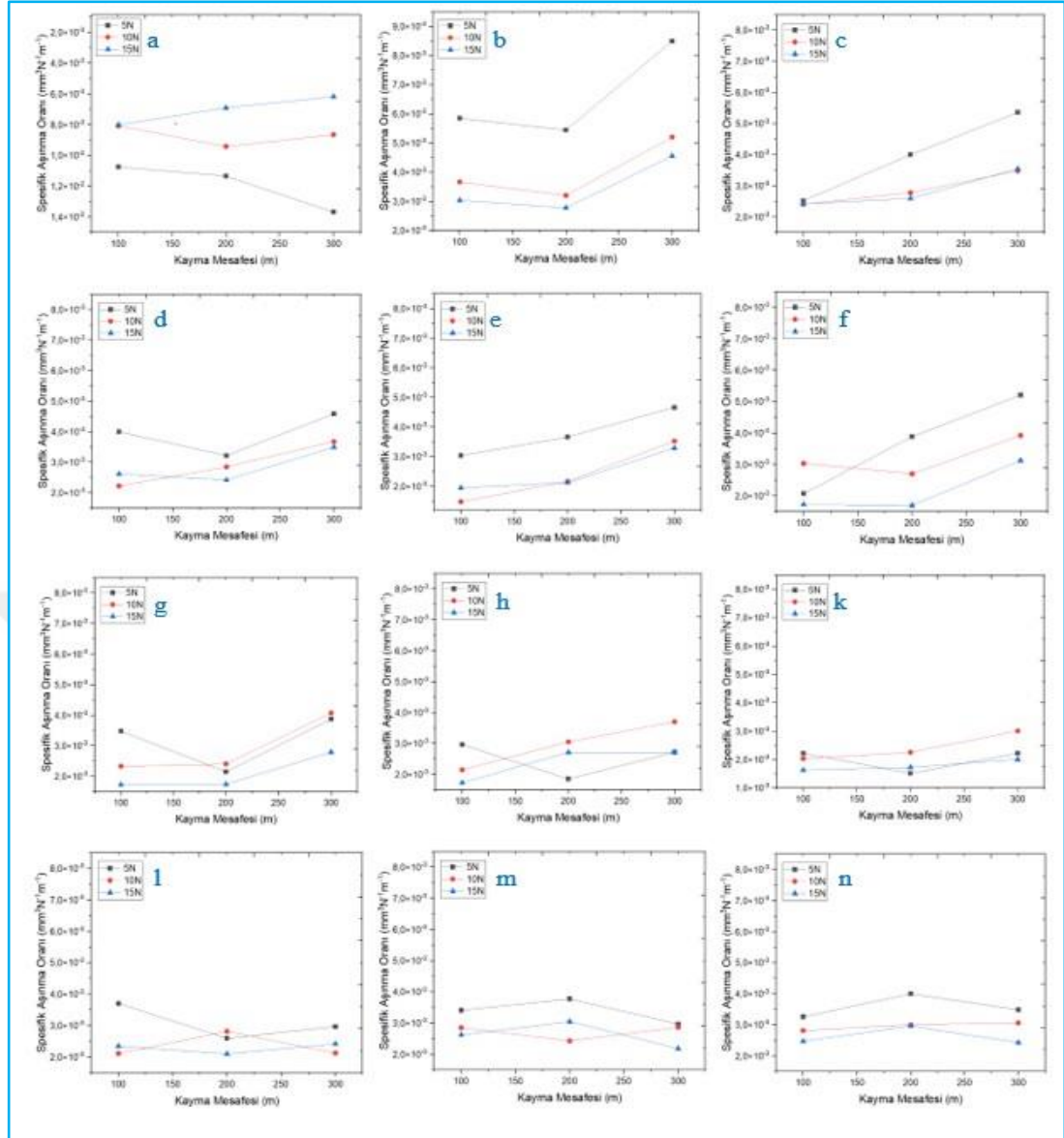
Şekil 4.27: AA2024 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.28’de AA2024 alaşımının T6I6 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki spesifik aşınma oranı ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



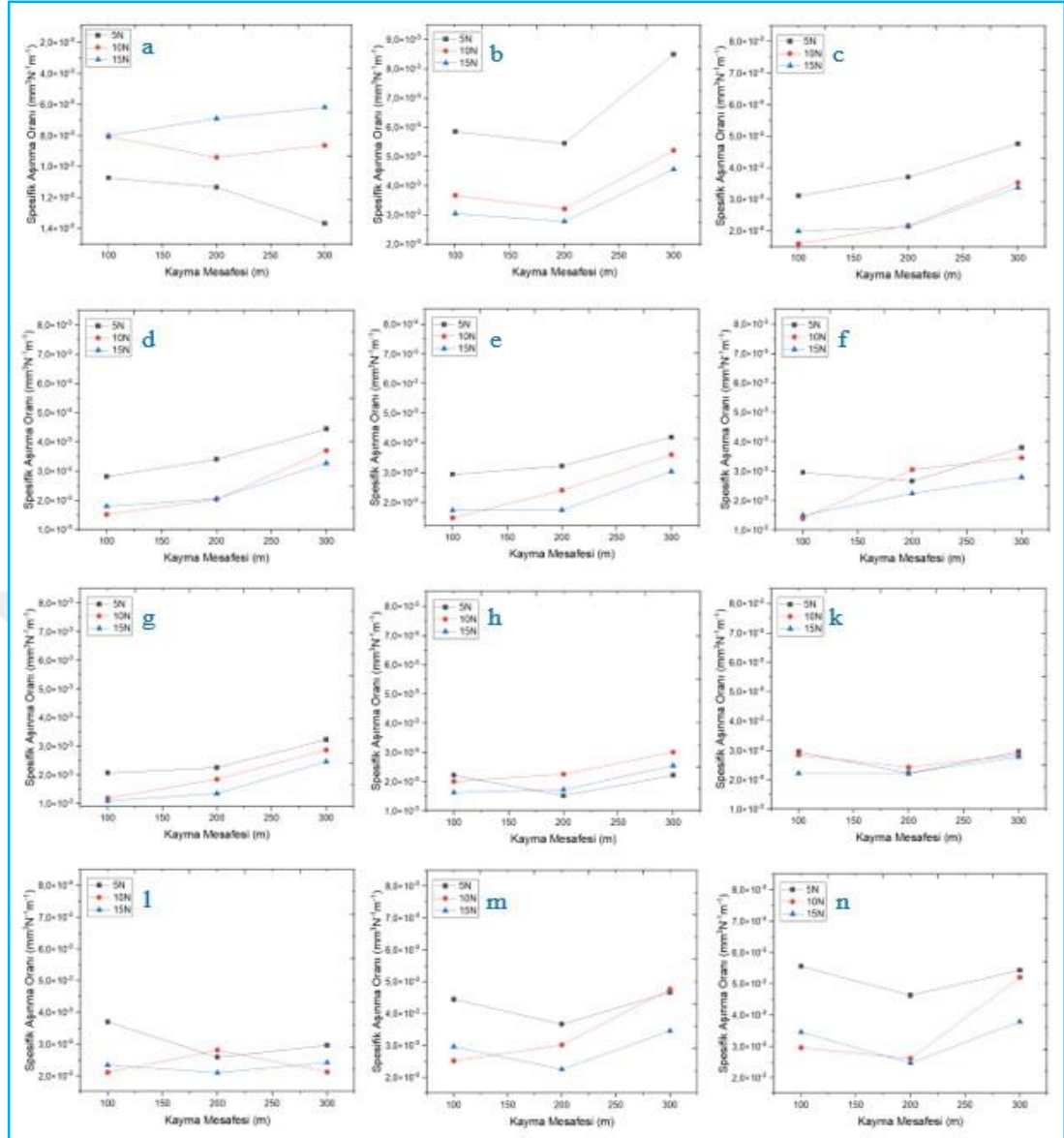
Şekil 4.28: AA2024 T616 işleme göre kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranları
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.29’da AA7075 alaşımının T614 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki spesifik aşınma oranı ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.29: AA7075 T614 işleme göre kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranları
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

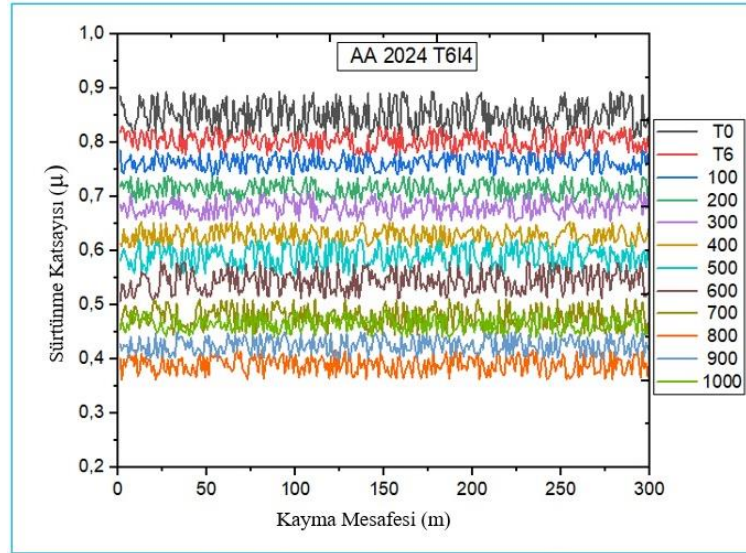
Şekil 4.30'da AA7075 alaşımının T616 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki spesifik aşınma oranı ($\text{mm}^3\text{N}^{-1}\text{m}^{-1}$) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4. 30: AA7075 T616 işlemine göre kayma mesafesine bağlı spesifik aşınma oranları. a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Aşınma davranışlarının karakterizasyonunda kayma mesafesi ve yükün hacim kaybı üzerindeki etkisinin eş zamanlı olarak belirlemek amacıyla Şekil 4.26-Şekil 4.30'da aşınma oranları incelenmiştir. Kayma mesafesi ile aşınma oranlarının ilişkisi incelendiğinde, genel olarak kayma mesafesi arttıkça aşınma oranında artma trendi olduğu saptanmıştır. Bazı verilerde bu trendden sapmalar olsa da bu değişimler aşınma oranı eşitliğindeki parametreler ile açıklanabilir.

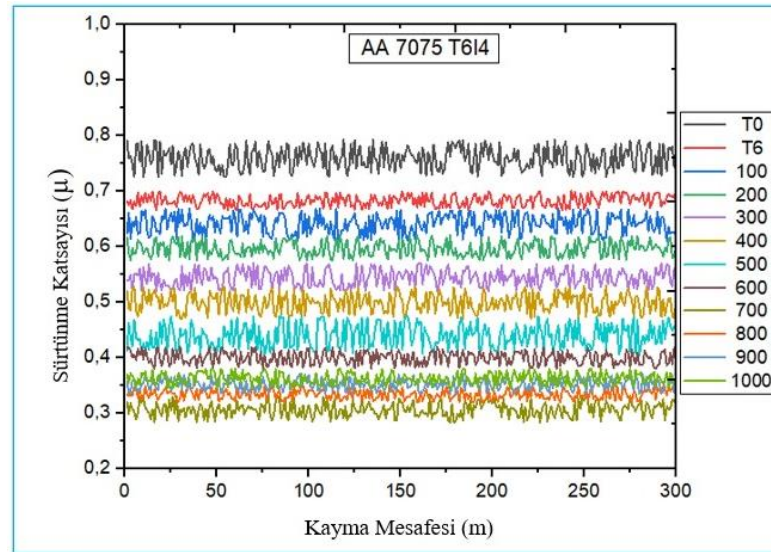
Şekil 4.31'de AA2024 alaşımının T614 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı (μ) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.31: AA2024 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı

En yüksek sürtünme katsayısı AA2024-T0 numunesinde (yaklaşık 0,83-0,88 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise AA2024 T6I4-800 numunesinde (0,4-0,36 μ) elde edilmiştir. T6I4-800 numunesinin düşük sürtünme katsayısı uygulanan ısıtım işlemi ile birlikte sertlikteki önemli artış ile açıklanabilir.

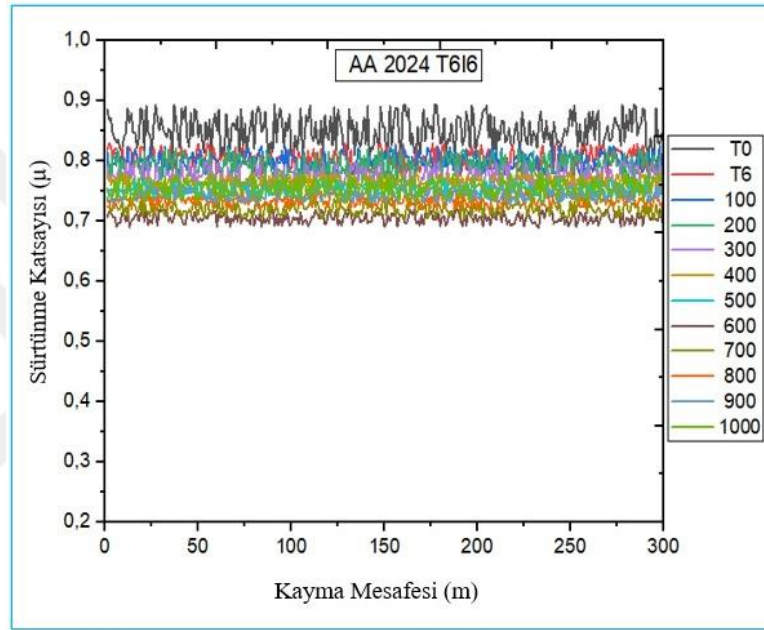
Şekil 4.32’de AA7075 alaşımının T6I4 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı (μ) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.32: AA7075 T6I4 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı

En yüksek sürtünme katsayısı AA7075-T0 numunesinde (yaklaşık 0,79-0,73 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise AA7075 T6I4-700 numunesinde (0,33-0,29 μ) elde edilmiştir. T6I4-700 numunesinin düşük sürtünme katsayısı uygulanan ısıtıl işlem ile birlikte sertlikteki önemli artış ile açıklanabilir.

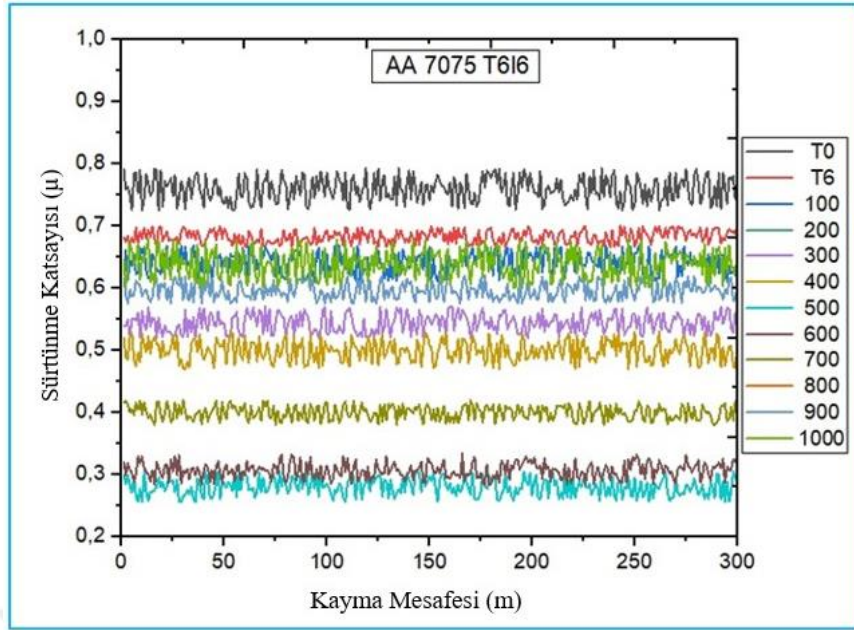
Şekil 4.33'te AA2024 alaşımının T6I6 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı (μ)- kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.33: AA2024 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı

En yüksek sürtünme katsayısı AA2024-T0 numunesinde (yaklaşık 0,83-0,88 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise AA 2024 T6I6-600 numunesinde (0,69-0,72 μ) elde edilmiştir. T6I4-600 numunesinin düşük sürtünme katsayısı uygulanan ısıtıl işlem ile birlikte sertlikteki önemli artış ile açıklanabilir. Şekil 4.33'de yüzey pürüzlülükleri birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu da (bkz. Şekil 4.5) AA2024 alaşımına uygulanan T6I6 ısıtıl işlem sonucundaki sertlik sonuçları açıklanabilir. T6I6 ısıtıl işlemi sonucunda ısıtıl işlem süreleri ile sertlik değerleri arasındaki değişim çok azdır.

Şekil 4.34'te AA7075 alaşımının T6I6 işlemine göre 5-10-15N yük ve 100-200-300 m kayma mesafesindeki sürtünme katsayısı (μ) - kayma mesafesi (m) grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.34: AA7075 T6I6 işlemine göre kayma mesafesine bağlı sürtünme katsayısı.

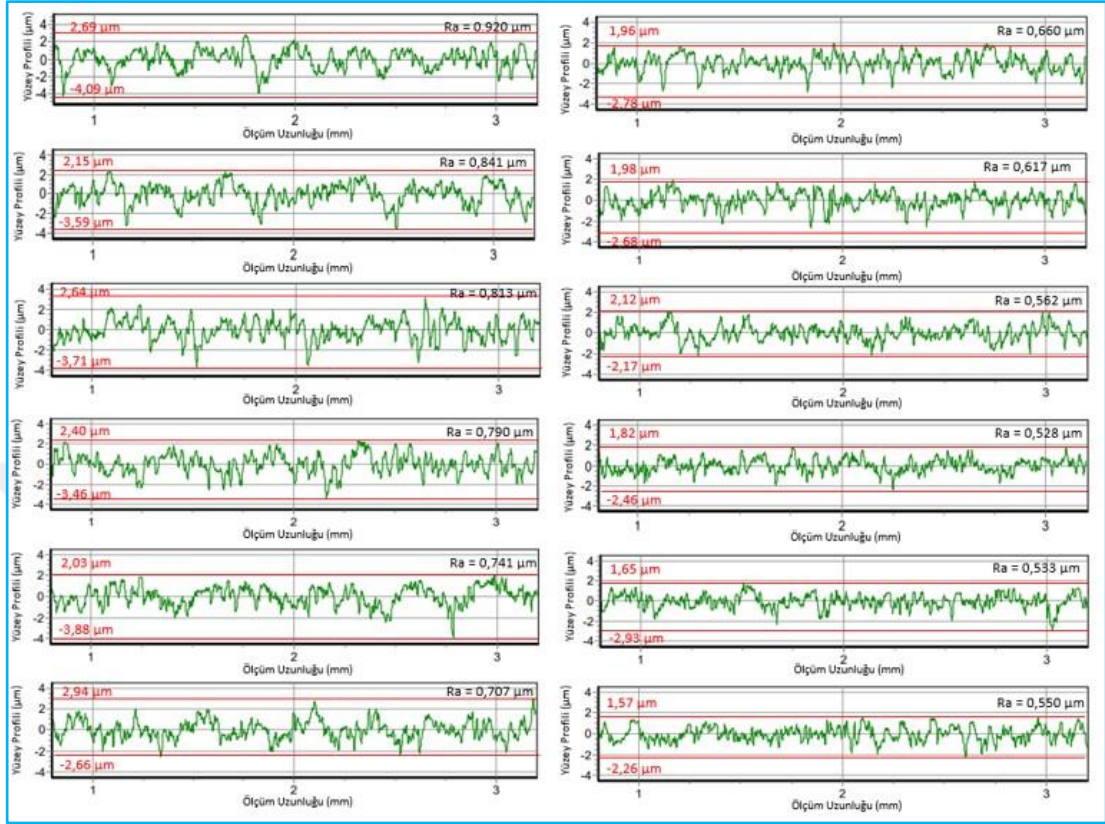
En yüksek sürtünme katsayısı AA7075-T0 numunesinde (yaklaşık 0,79-0,73 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise AA7075 T6I6-500 numunesinde (0,331-0,26 μ) elde edilmiştir. T6I6-500 numunesinin düşük sürtünme katsayısı uygulanan ısıtıl işlem ile birlikte sertlikteki önemli artış ile açıklanabilir.

Sürtünme katsayısı (μ) - kayma mesafesi (m) grafikleri incelendiğinde, bütün numuneler ve ısıtıl işlem koşulları için sertliğin artmasıyla birlikte sürtünme katsayısının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, aşınma esnasında kaynaklanan değişimlerden dolayı malzemeye etkileyen kuvvetin değişkenlik göstermesi nedeniyle dalgalanmalar gözlenir. Bu dalgalanmalar, yapışma ve kopma gibi olaylar sırasında malzemeye etki eden kuvvetin değişkenliğiyle ilişkilidir (Ovalı ve Kızılkaya, 2018).

4.1.4.1 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıtıl işlemleri sonrası yapılan yüzey pürüzlülüğü ölçümü sonuçları

AA2024 ve AA7075 alaşımlarına T6, T6I4 ve T6I6 ısıtıl işlemler sonrasında aşınma deneyi uygulanmıştır. Aşınma deneylerinin ardından numune yüzeylerinin yüzey pürüzlülüğü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri 15N yük uygulanan yüzeyden ve 300 m kayma mesafesi sonrası aşınma izleri üzerinden gerçekleştirilmiştir.

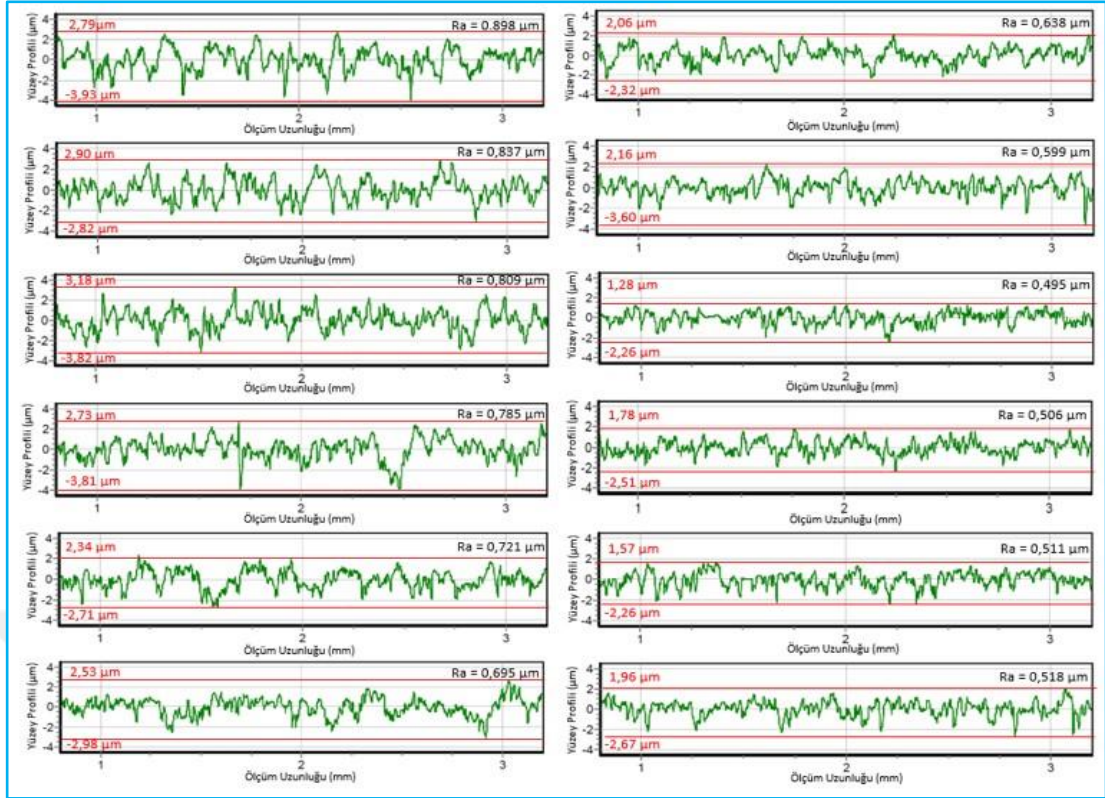
Şekil 4.35'te AA2024 alaşımının T6I4 ısıl işlemine bağlı yüzey pürüzlülüğü grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.35: AA2024 T6I4 ısıl işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.35 incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra değeri T6I4-800 numunesine kadar düşüş göstermiştir. T6 ısıl işlem sonrası 0,841 μ olan Ra değeri T6I4-800 durumunda 0,528 μ değerine kadar azalmıştır. Yüzey pürüzlüğündeki bu azalış sertlik değerleriyle uyum içerisindedir.

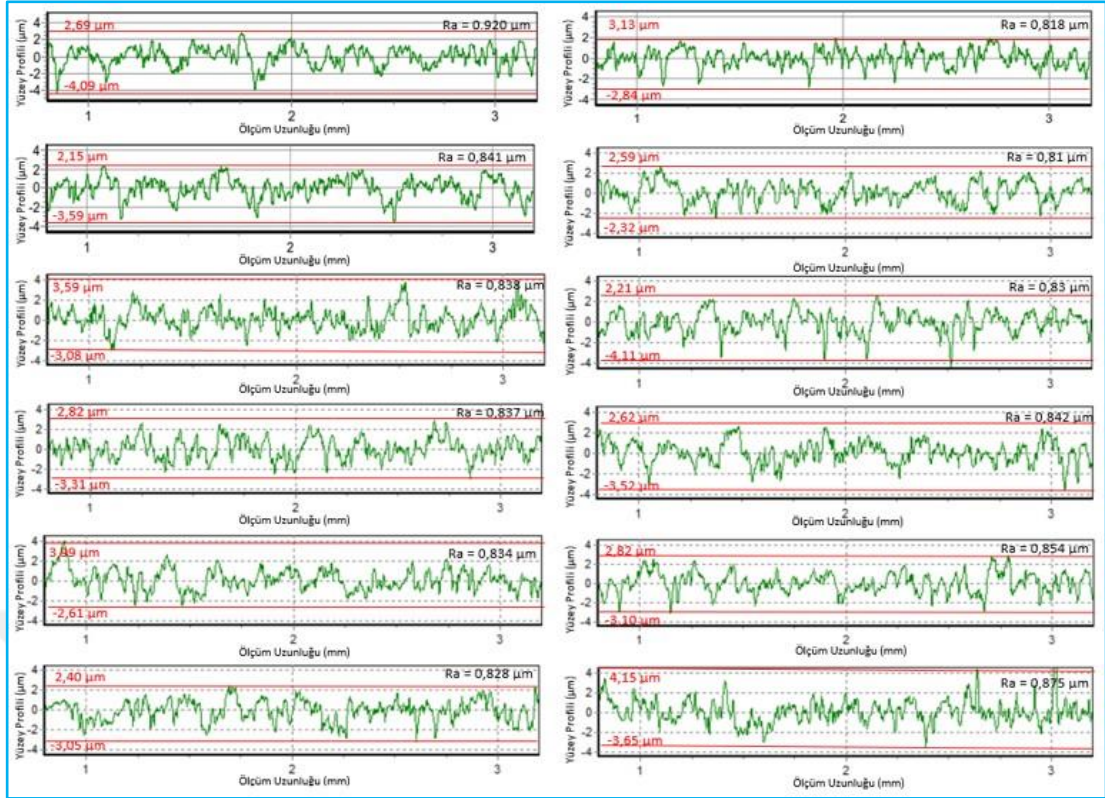
Şekil 4.36'da AA7075 alaşımının T6I4 ısıl işleminin bağlı yüzey pürüzlülüğü grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.36: AA7075 T6I4 ısıtıl işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.36 incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra değeri T6I4-700 numunesine kadar düşüş göstermiştir. T6 ısıtıl işlem sonrası 0,8371 μ olan Ra değeri T6I4-700 durumunda 0,495 μ değerine kadar azalmıştır. Yüzey pürüzlüğündeki bu azalış sertlik değerleriyle uyum içerisindedir.

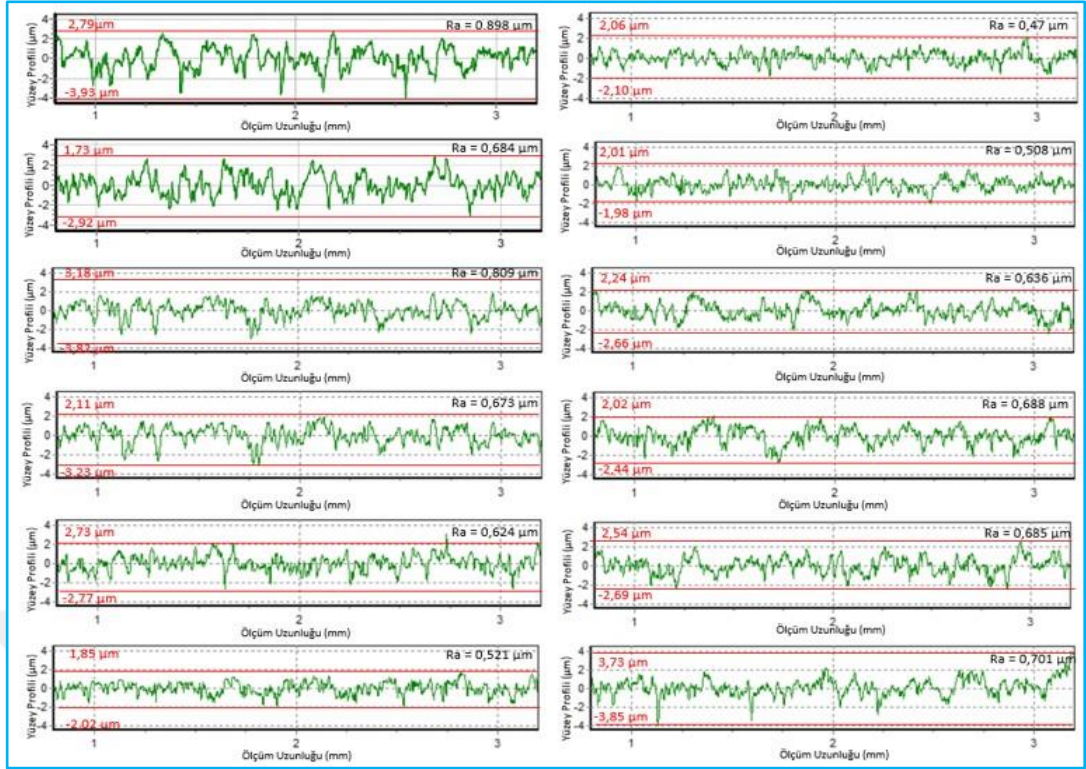
Şekil 4.37’de AA2024 alaşımının T6I6 ısıtıl işleminin bağlı yüzey pürüzlülüğü grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.37: AA2024 T6I6 ısıt işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.37 incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra değeri T6I4-600 numunesine kadar düşüş göstermiştir. T6 ısıt işlem sonrası 0,841 μ olan Ra değeri T6I6-600 durumunda 0,81 μ değerine kadar azalmıştır. Yüzey pürüzlüğündeki bu azalış sertlik değerleriyle uyum içerisindedir. Daha sonraki ısıt işlem sürelerinde sertliğin düşmesi ile birlikte pürüzlülük değeri artmaya başlamıştır.

Şekil 4.38’de AA7075 alaşımının T6I6 ısıt işleminin bağlı yüzey pürüzlülüğü grafikleri verilmiştir.



Şekil 4.38: AA7075 T6I6 ısıtılma işlem parametrelerine bağlı yüzey pürüzlülüğü ölçümleri
a)T0, b)T6, c)100, d)200, e)300, f)400, g)500, h)600, k)700, l)800, m)900, n)1000

Şekil 4.38 incelendiğinde ortalama yüzey pürüzlülüğü Ra değeri T6I6-500 numunesine kadar düşüş göstermiştir. T6 ısıtılma işlem sonrası 0,684 μ olan Ra değeri T6I6-500 durumunda 0,470 μ değerine kadar azalmıştır. Yüzey pürüzlülüğündeki bu azalış sertlik değerleriyle uyum içerisinde. Daha sonraki ısıtılma süreçlerinde sertliğin düşmesi ile birlikte pürüzlülük değeri artmaya başlamıştır.

Aşınma karakteristiğinin incelenmesinde önemli parametrelerden bir tanesi de yüzey pürüzlülüğüdür. Uygulanan ısıtılma işlemleri ile aşınma direnci arasındaki ilişkiyi karakterize etmek amacıyla numunelerin yüzey pürüzlülükleri ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü şekilleri incelendiğinde açıkça görülmektedir ki uygulanan ısıtılma işlemleri (T6I4 ve T6I6) yüzey pürüzlülüğü üzerinde doğrudan bir etkiye sahiptir. Tüm numunelerde sertliğin artmasıyla birlikte yüzey pürüzlülüğünün önemli derecede azaldığı belirlenmiştir. Tam tersi durum da geçerlidir. Yüzey pürüzlülüğündeki bu azalma artan sertlik ile birlikte azalan plastik deformasyon oranıyla açıklanabilir (Tan 2023).

Sertliği düşük olan malzeme daha sünek özellik gösterir. Bu alışımda plastik akış bir miktar daha kolay gerçekleşebilir. Sertliği yüksek malzemelerde, yüzeye yakın

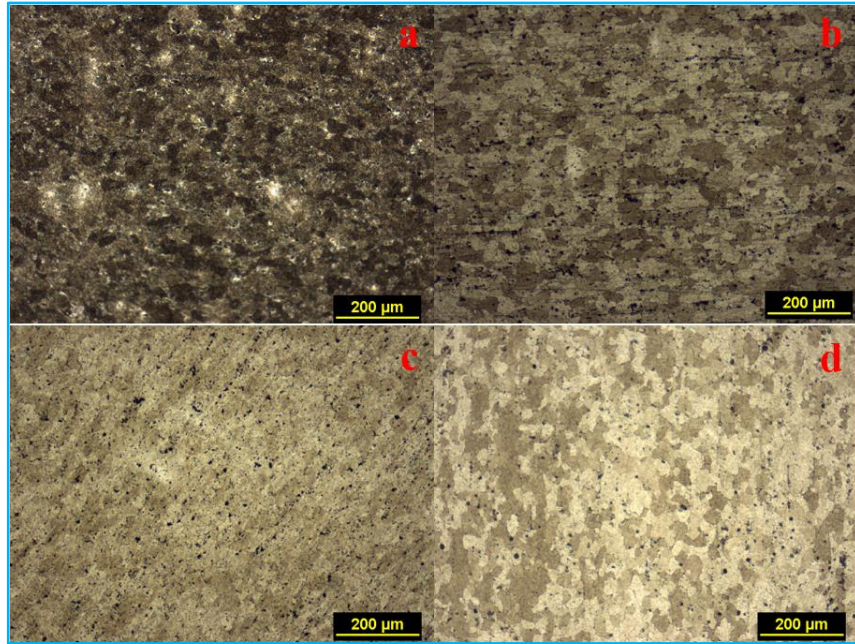
bölgelerde yanal çatlaklar oluşur. Sünek malzemelerde, aşınma izinin derinliği çok daha yüksektir. Artan yük ile birlikte hacim kaybındaki artış, numune ile aşınma yüzeyi arasındaki sıcaklığın artmasıyla aşınma yüzeylerinde oluşan oksit filmlerin etkisiyle açıklanabilir (Channappagoudar 2015).

4.2 Karakterizasyon sonuçları

AA2024 ve AA7075 alüminyum alaşımlarına uygulanan T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemleri sonrası uygulanmıştır. Ardından bu işlemlerin etkileri hakkında bilgi sahibi olunabilmesi amacıyla mikroskopi, SEM, DSC ve XRD analizleri gerçekleştirilmiştir.

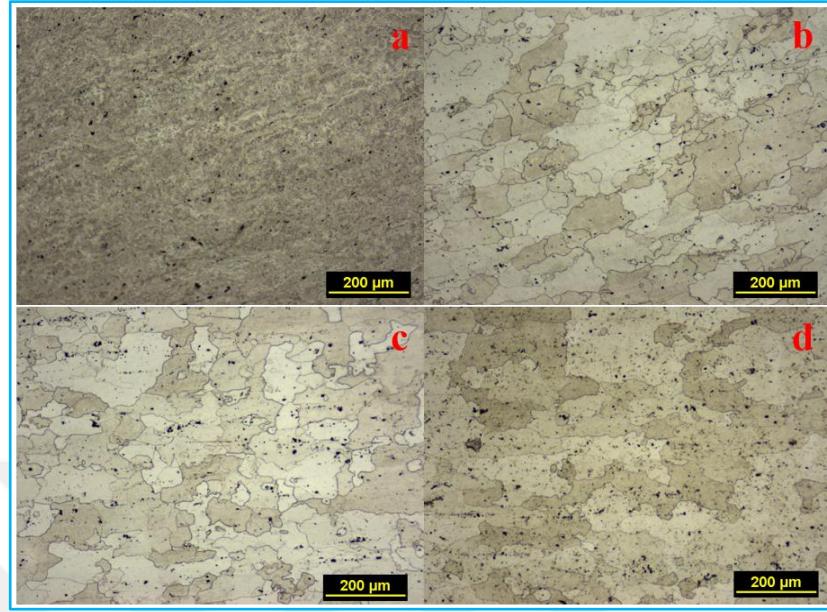
4.2.1 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası mikroskopi sonuçları

AA2024 ve AA7075 alaşımlarına T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemler sonrasında optik görüntüleri incelenmiştir. Optik görüntüler 100X büyütme boyutunda alınmıştır. Şekil 4.39'da AA2024 alaşımına uygulanan T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemler sonucundaki mikro yapı değişimleri ile T0 numunesinin optik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.39: AA2024 alaşımına ait mikro yapı görüntüleri a)T0, b)T6, c)T6I4-800, d)T6I6-600

4.40’da AA7075 alaşımına uygulanan T6,T6I4 ve T6I6 ısıt işlemler sonucundaki mikro yapı değışimleri ile T0 numunesinin optik görüntüleri verilmiştir.



Şekil 4.40: AA7075 alaşımına ait mikro yapı görüntüleri a)T0, b)T6, c)T6I4-800, d)T6I6-600

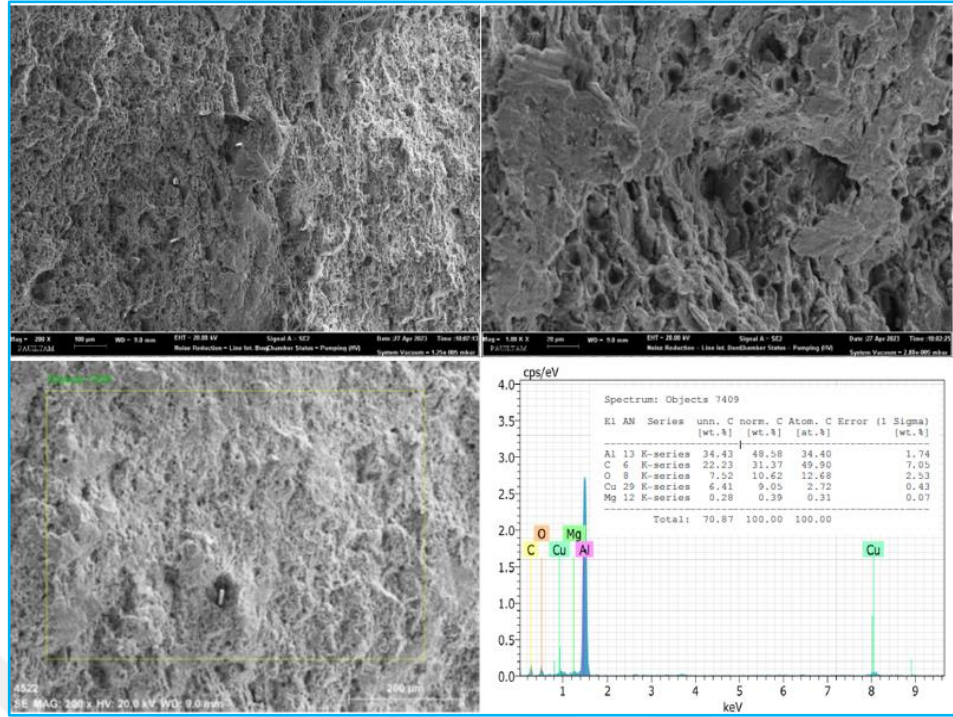
Beklenildiği gibi yaşlandırmanın tane boyutu üzerinde etkisinin olduğu görülmektedir. Taneler herhangi bir yönde eş eksenli şekle sahiptir. Çok küçük boyutlu tanelerin optik mikroskop ile görülmesi çok zordur. Alüminyum matris içinde homojen dağılırlar. η fazı büyük çökeltilerde ($\text{çap} > 50 \text{ nm}$) ve sadece TEM (transmisyon elektron mikroskobu) ile görülebilen tane sınırlarında yer almaktadır. Mikro yapılar hakkında genel bilgi vermek için burada optik mikroskop fotoğrafları verilmiştir. Farklı yaşlanma zamanlarındaki tane boyutları farklıdır ve artan zamanla değışir. Yapıdaki tanelerin görünürlüğü, yaşlanma süresinin artmasıyla daha görünür hala gelmiştir (Kılıç 2019). Şekillerdeki küçük siyah çökeltilerin sertlik ile birlikte arttığı görülmektedir. Bu çökeltiler alaşımın mekanik özelliklerini artırır (Patela 2022).

Sertlik artışını etkileyen faktörler, çökelen ikincil faz partikülleridir. Yaşlanma sürecinde sıcaklığın etkisiyle çökeltiler matris içinde dağılır ve yaşlandıkça bu kümeler α matris fazıyla uyumlu çökeltileri oluşturmaya başlar. Bu çökeltiler sertliğin artmasında önemli bir rol oynar. Yaşlandırma süresi arttıkça, ince çökeltiler matrisin her tarafına oldukça homojen bir şekilde dağılır. Kesintili yaşlandırma ısıt işlemleri, T0 ve T6 temperlerine kıyasla daha yüksek sertlik değeri elde edilebileceğini

gösterir ve bu da daha yüksek dayanıma sahip malzemelerin üretilebileceği anlamına gelir. Bu durum, özellikle araç üretiminde, mevcut uygulamaların en az yarısında alüminyum ağırlığının düşürülmesinin mümkün olduğu anlamına gelir. (Baksan ve diğ. 2020).

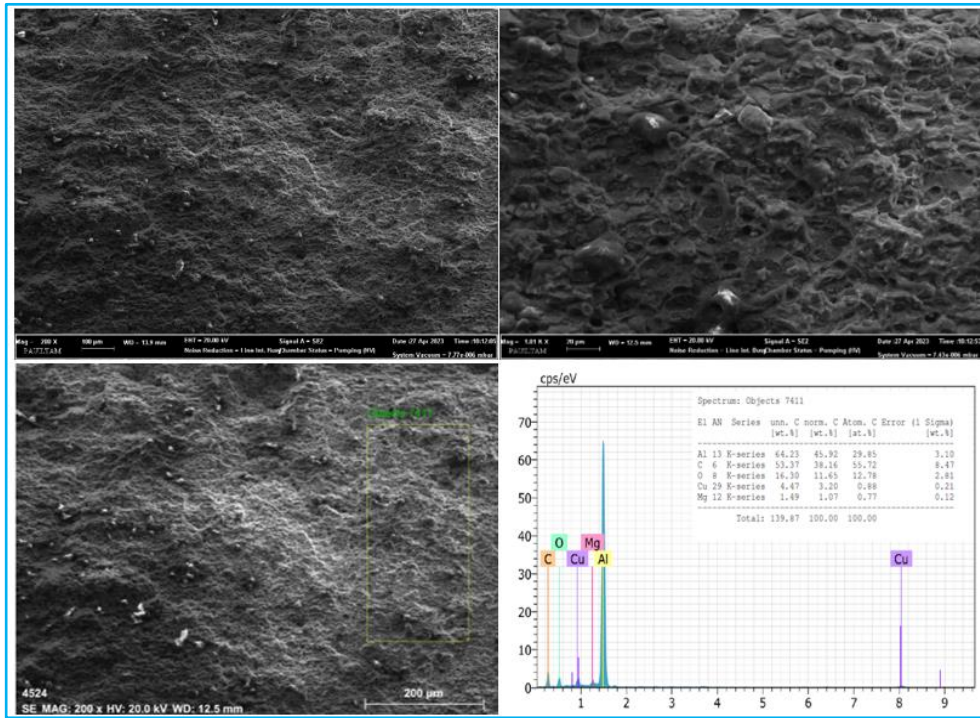
4.2.2 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası SEM ve EDS sonuçları

AA2024 ve AA7075 alaşımlarına T6, T6I4 ve T6I6 ısıt işlemler sonrasında çekme, üç nokta eğme ve aşınma deneyleri uygulanmıştır. Bu deneyler sonucunda kopan ve kırılan numunelerin kırık yüzeyleri kırılma morfolojisinin anlaşılabilmesi için ve aşınma yüzeylerinin aşınma sonrası yüzey morfolojisi için SEM ve EDS analizi gerçekleştirilmiştir. Ayrıca oluşan bileşimlerin analizi için yan yüzeylerden SEM ve EDS analizi alınmıştır. Tane sınırları, tane sınırı çökeltileri, çökelme olmayan bölgeler ve kaba intermetalik parçacıklar dahil olmak üzere alüminyum alaşımının mikro yapısı, kırılma davranışını araştırmak için önemlidir (Xing 2013). Şekil 4.41’de AA2024-T0 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. Al-Cu-Mg elementlerinin varlığı ve oksit vb. diğer inklüzyonların görülmemesinden dolayı, sünek kırılma olduğu görsellerden de anlaşılmaktadır.



Şekil 4.41: AA2024-T0 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

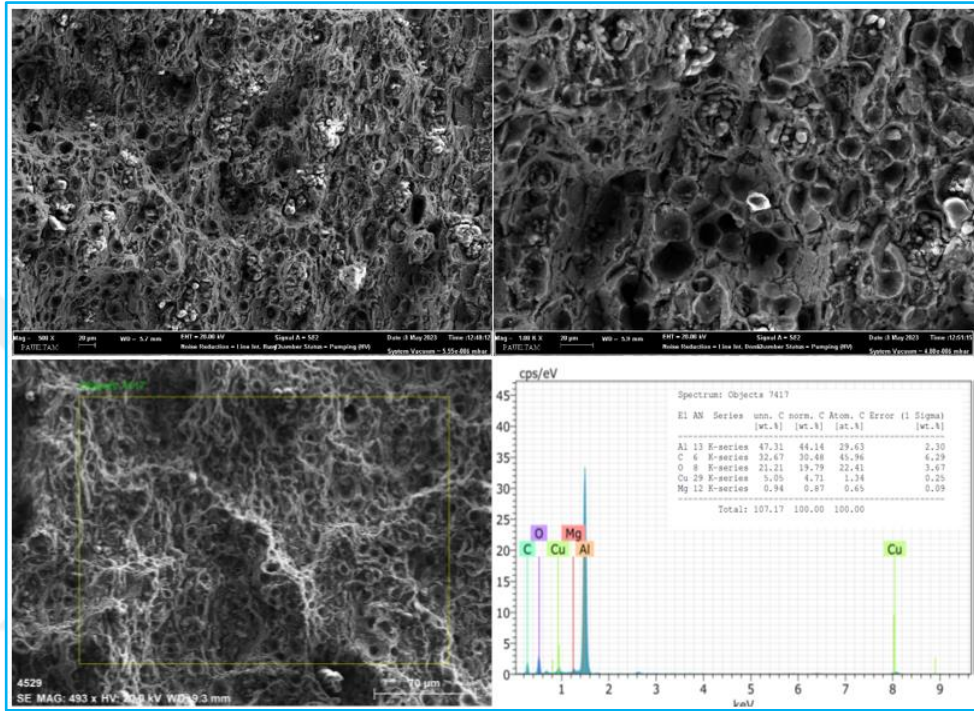
Şekil 4.42’de AA2024 T6 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



Şekil 4.42: AA2024 T6 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

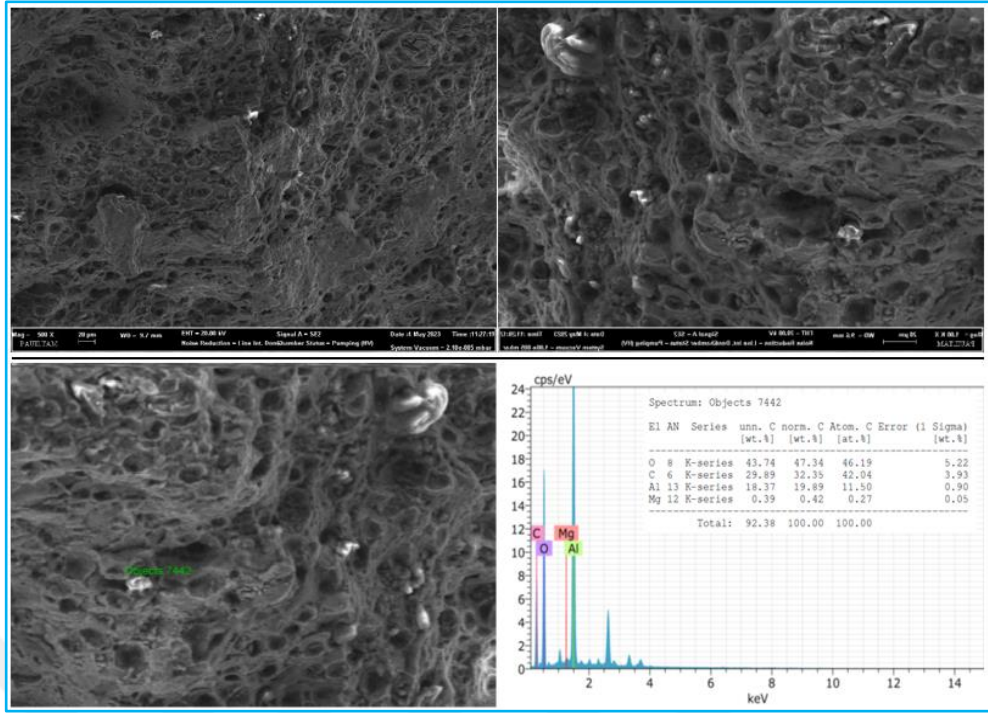
T6 ısııl işlemi sonrası tipik sünek kırılma morfolojinde değişme görülmüştür. Bu durumda sertlik artışı ile açıklanabilir.

Şekil 4.43’de AA2024 T6I4-800 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir. Çok klasik sünek kırılma yüzeyi gözlenmektedir.



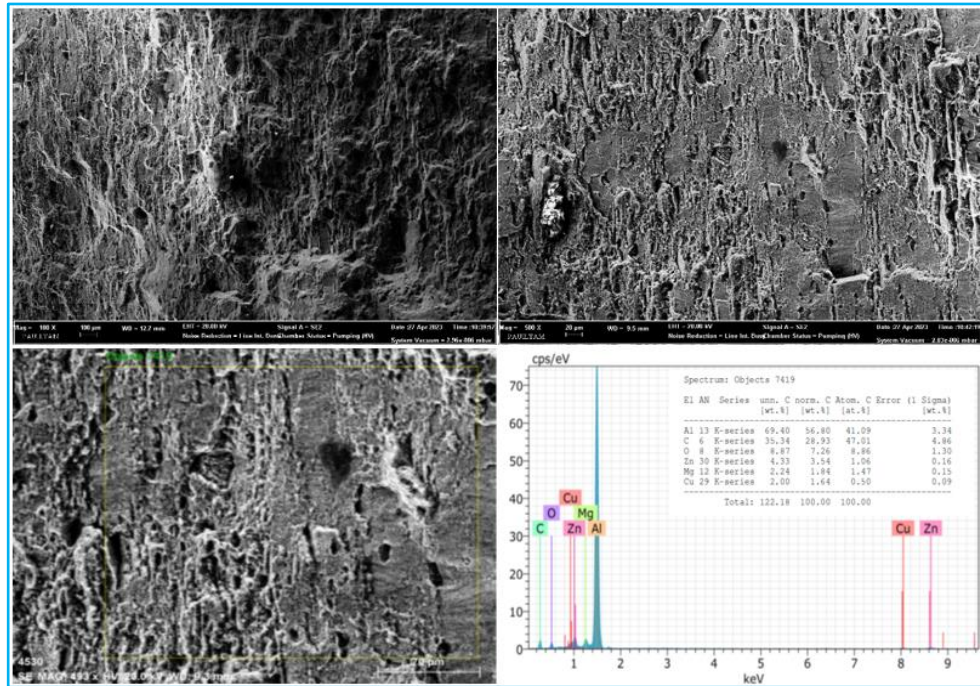
Şekil 4.43: AA2024 T6I4-800 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.44’de AA2024 T6I6-600 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



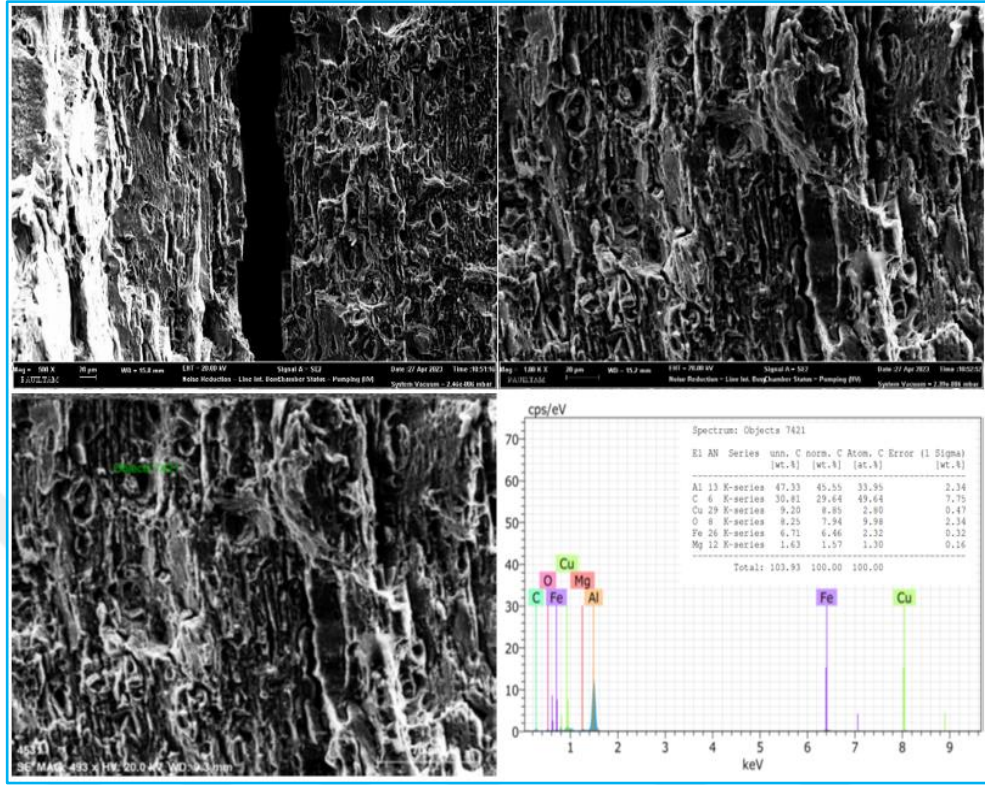
Şekil 4.44: AA2024 T6I6-600 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.45’de AA7075 T0 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



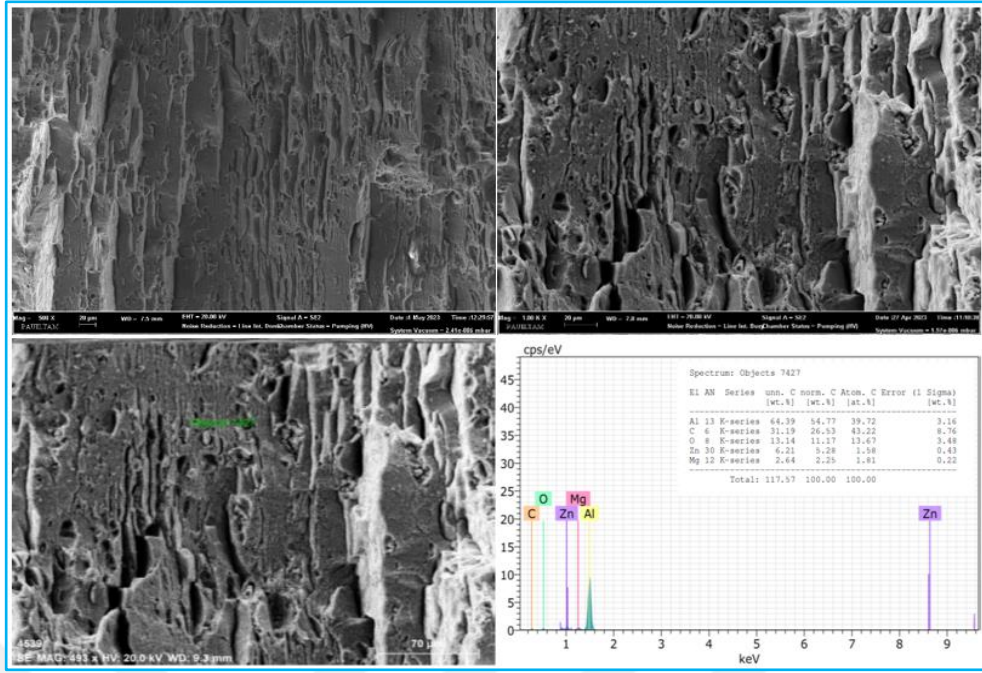
Şekil 4.45: AA7075 T0 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.46’da AA7075 T6 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



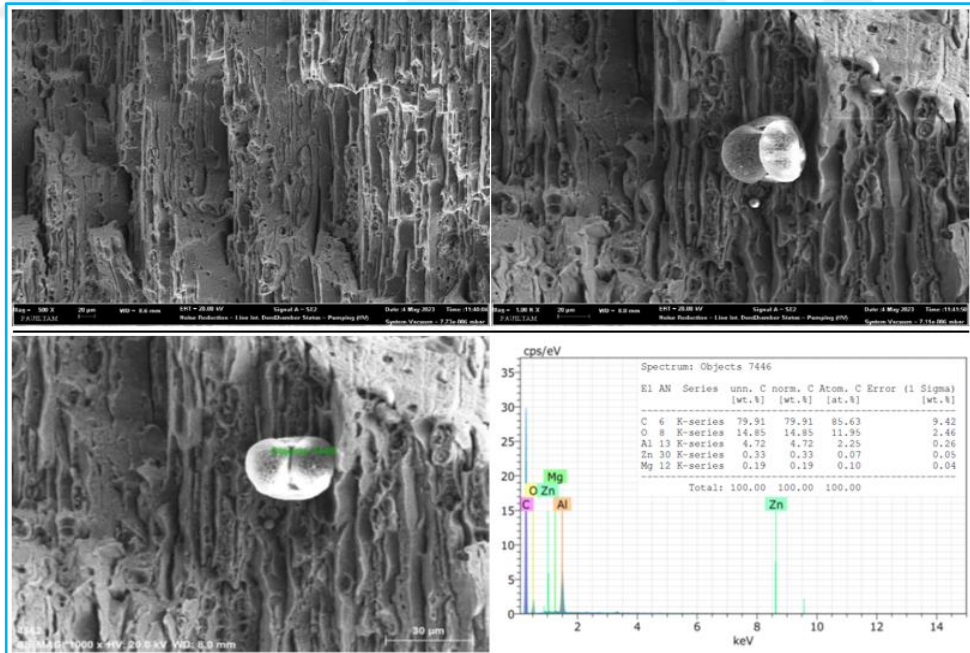
Şekil 4.46: AA7075 T6 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.47’de AA7075 T6I4-700 alaşımının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



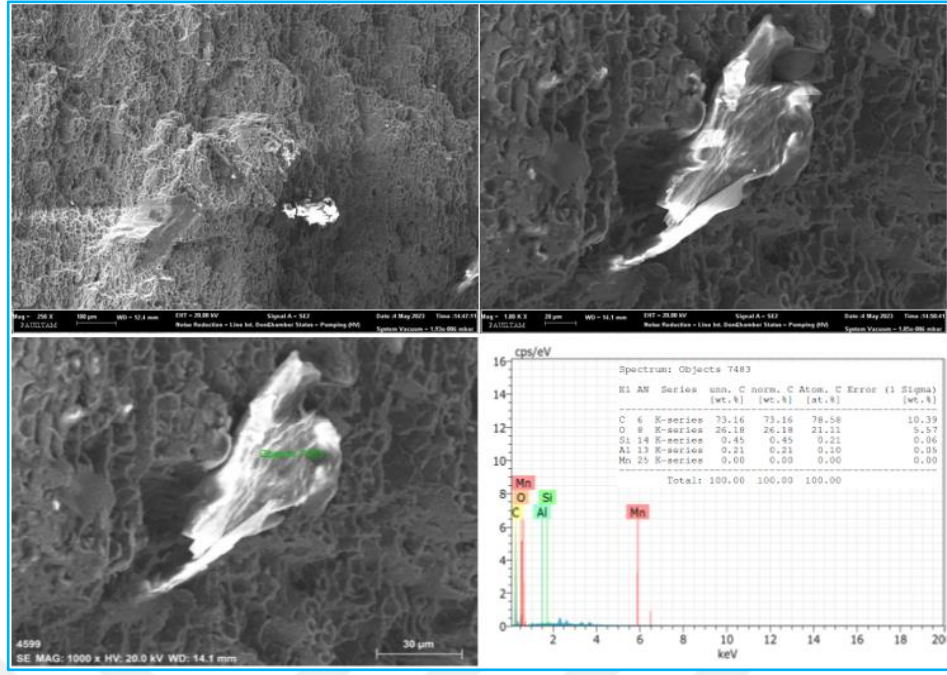
Şekil 4.47: AA7075 T6I4-700 alaşımasının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.48’de AA7075 T6I4-700 alaşımasının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



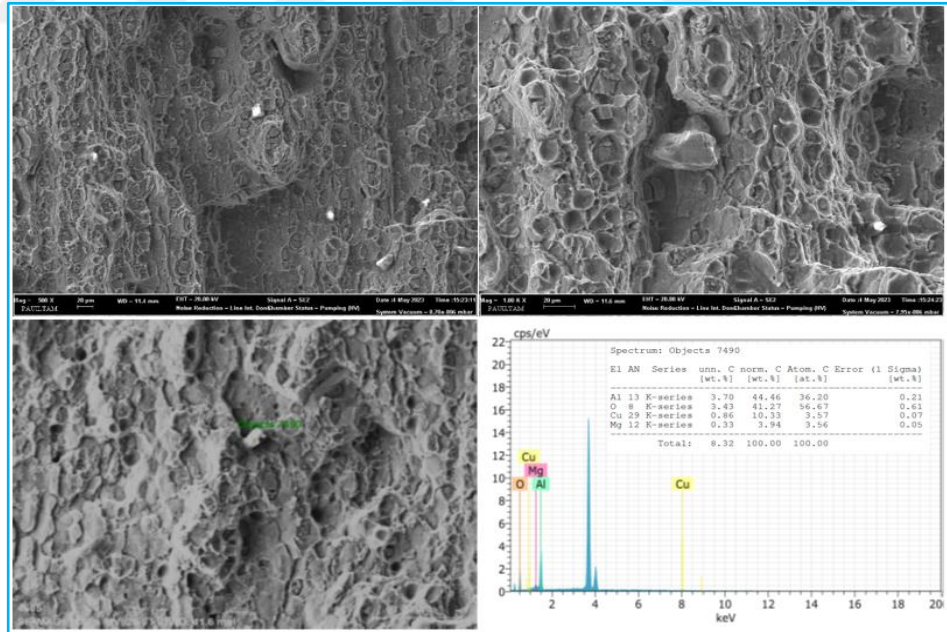
Şekil 4.48: AA7075 T6I6-500 alaşımasının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.49’de AA2024 T6I4-800 alaşımasının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



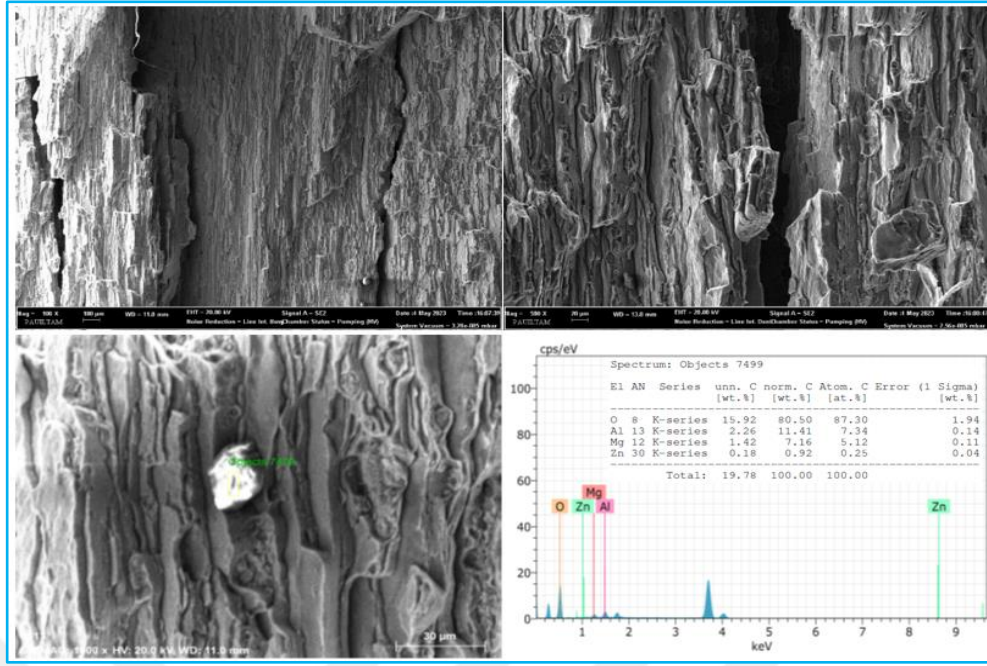
Şekil 4.49: AA 2024 T6I4-800 alaşımlarının üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.50'de AA2024 T6I6-600 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



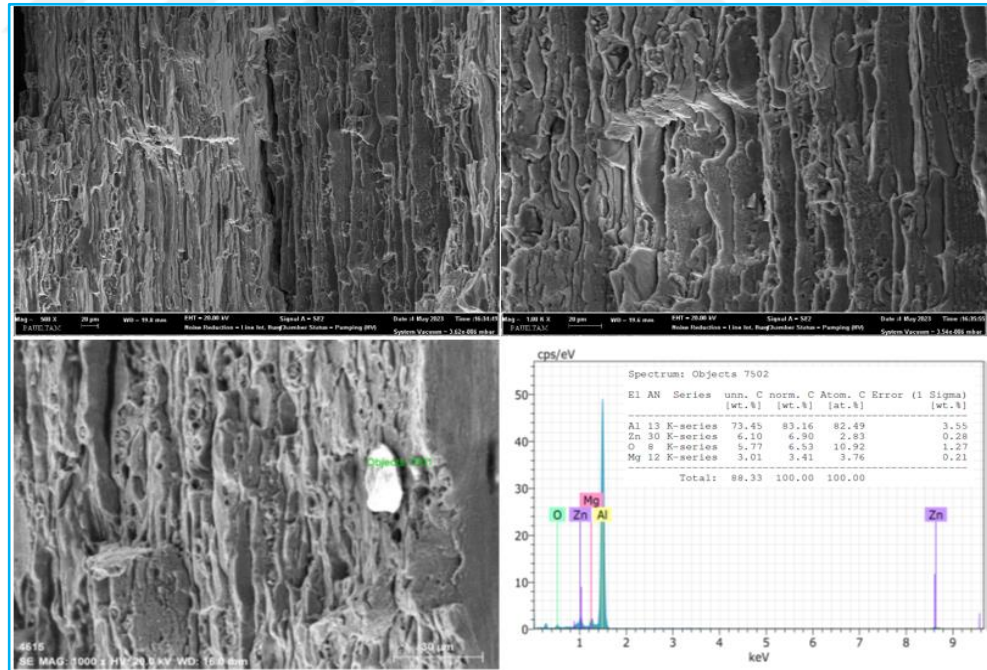
Şekil 4.50: AA2024 T6I6-600 alaşımlarının üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.51'de AA7075 T6I4-700 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



Şekil 4.51: AA7075 T6I4-700 alaşımlarının üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.52’de AA7075 T6I6-500 alaşımlarının çekme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



Şekil 4.52: AA7075 T6I6-500 alaşımlarının üç nokta eğme sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

SEM görüntüleri genel olarak incelendiğinde AA2024 kırılma yüzeyinin karakteristik özelliğinin, 7075 alaşımlarından önemli ölçüde farklıdır. T0 temperindeki

baskın morfolojik yapı, büyük çukurların olduğu sünek kırılmanın sonucunda oluşan süngerimsi yapıdır. Konvansiyonel T6 ısıtma işlemi sonucunda sertliğin artmasıyla birlikte çekme dayanımı gibi özellikler artmış ve kırılma sonucunda oluşan çukurlar daha küçük kalmıştır. Ayrıca T6 SEM görüntülerinde çökeltilerin oluşmaya başladığı görülmektedir. T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma işlemi sonrasında kırılma sonucu oluşan çukurlar nispeten daha büyük ve çukurların içlerinde küçük boyutlu birçok parçacığın bulunduğu görülmüştür. Sonuç olarak kırılma sonrası oluşan yapıda, genel olarak parçacıkların veya tane sınırı çökeltilerinin neden olduğu büyük boyutlu çukurlar ve tane içlerinde çekirdeklenmiş küçük boyutlu çukurlar olmak üzere iki tür çukur gözlenir (Xing 2013).

AA2024 alaşımının çekme kırılma morfolojilerinin SEM görüntüleri, T6 ve T6I4 numunelerinde farklı boyut ve şekillerde birçok çukuru ortaya çıkarmaktadır. Bu gözlem, çekme sonuçlarıyla tutarlıdır (Wang 2021).

Kesintili yaşlandırma işlemi kırılma sonucu oluşan boşluk yapısını artırır. Bu durum çökelti fazlarının boyut ve hacim fraksiyonundaki değişikliklerden dolayıdır. Oluşan yapının deformasyon sırasında plastik akışın daha fazla homojenliği ile sonuçlanabileceği ve böylece mikro boşluk birleşmesini geciktirebileceği öne sürülmüştür. Parçacıklar ve çökeltisiz bölgeler (PFZ) gibi ek mikroyapısal özellikler kırılma davranışını etkiler. Öte yandan, PFZ'lerin genişliği yaşlanma işlemlerinden etkilenebilir. Hem gerilme özelliklerinde hem de hasar toleransında genel eş zamanlı iyileşme olağan dışıdır. Tokluktaki iyileşmenin, kesintili yaşlandırılan malzeme tarafından meydana getirilen mikroyapısal modifikasyonların bir sonucu olarak mikro boşluk birleşme mekanizmasındaki modifikasyondan kaynaklandığını göstermektedir (Qi ve diğ. 2016).

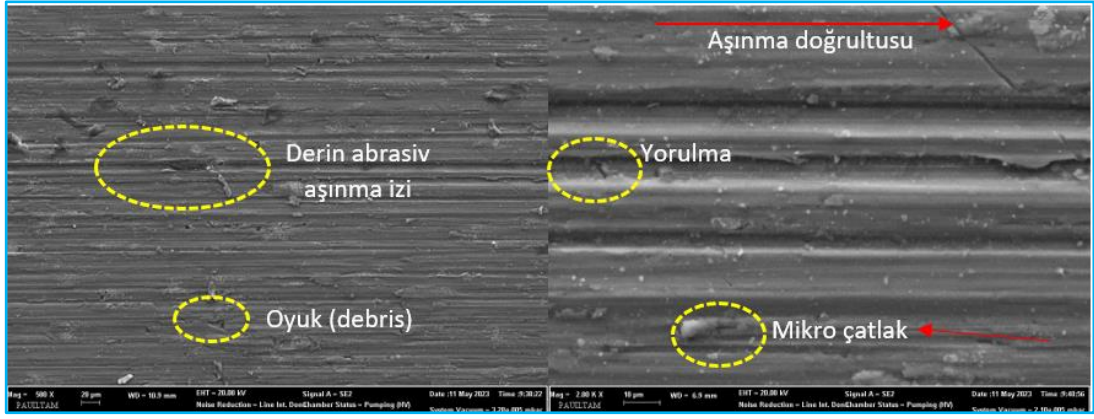
Sonuç olarak kesintili yaşlandırma sonrasında farklı boyut ve şekillerde birçok çukur gözlemlenmiştir, bu da kırılma mekanizmasının sünek kırılma olduğunu gösterir. Sonuç olarak, iki numune daha fazla uzama göstermiştir. AA7075 alaşımında kopma uzaması sonuçları literatür ile uyum içerisindedir (Carvalho 2018). T6I4 örneğindeki çukurlar, T6 örneğindikilerden daha büyük ve daha derindir. Bunun sonucunda da alaşımların plastisitesinin, çekme sonuçlarıyla iyi bir uyum içinde olan kesintili yaşlandırma işlemi ile geliştirilebileceğini gösterir (Qi ve diğ. 2016).

Kırılma, genellikle boşlukların çekirdeklenmesi, büyümesi ve birleşmesini içeren bir dizi olay yoluyla sünek bir şekilde gerçekleşir. Genel olarak mikro boşlukların birincil olarak ikincil faz partiküllerinde, yani kaba bileşenlerde çekirdeklendiği kabul edilmektedir. Normal gerilimin kritik bir değeri aşıldığında, hem boyut hem de şekil olarak değişen ikincil faz parçacıkları popülasyonu oluşur. Parçacık geometrisindeki bu varyasyon, parçacıktan parçacığa kritik mikro boşluk çekirdeklenme stresinde bir değişikliğe yol açar. Bu değişkenler deformasyon davranışını etkileyecek ve bu da, kırılmaya yol açan boşlukların oluşumunu, büyümesini ve nihai birleşmesini kontrol edecektir. Lokal kırılma olaylarının, genel tokluk düzeyine önemli ölçüde katkıda bulunduğu bilinmektedir. İkincil parçacıkların kırılma yüzeyi üzerindeki etkisi, bileşenler nedeniyle büyük ve derin boşluklar ile dispersoidler nedeniyle ikincil boşlukların oluşması şeklindedir (Risanti 2009).

Şekil 4.43, 4.44 ve 4.50 incelendiğinde sünek kırılmanın özelliği olan oldukça çukurlu bir yapı gösterir. İri taneli çökeltilerin etrafındaki mikro boşlukların büyümesiyle taneler arası hasar indüklenir. Görülen çökeltilerin CuMgAl₂ olduğu düşünülmektedir (Reis ve diğ. 2012).

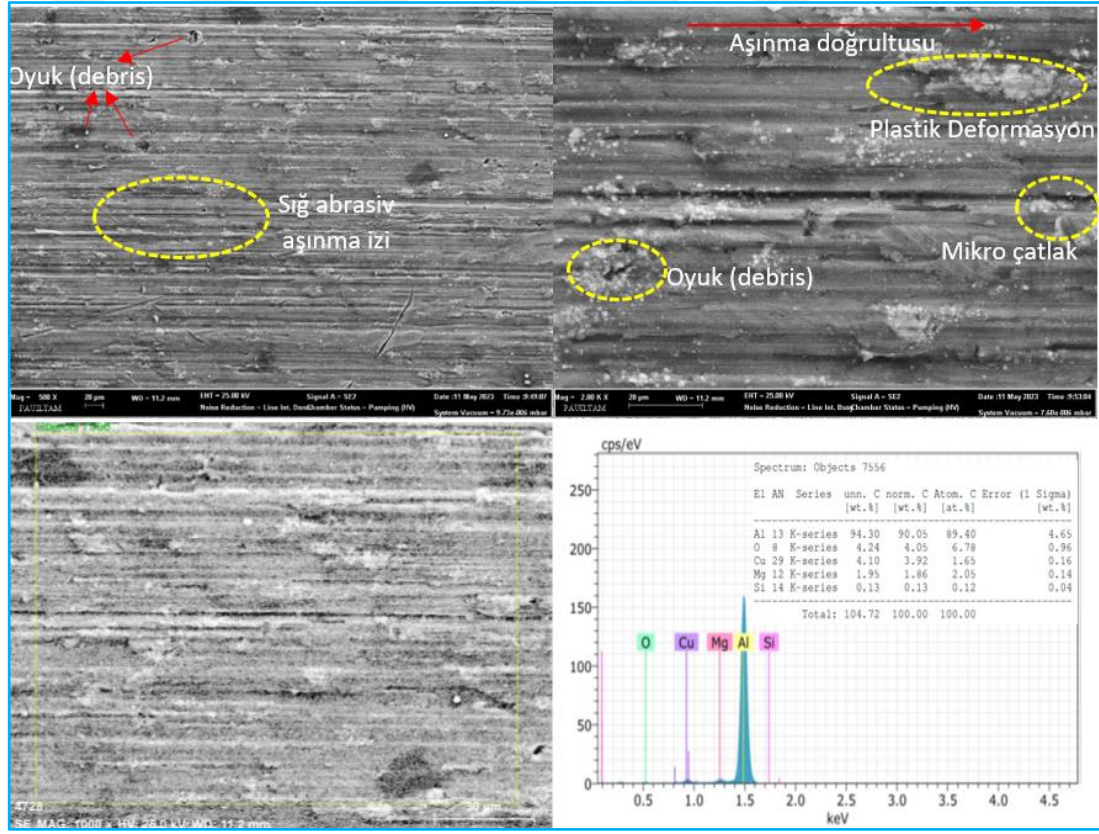
SEM görüntüleri incelendiğinde hem T6 hem de T6I6 numunelerinde farklı derinlik ve morfolojiye sahip çok sayıda çukurların olduğunu göstermektedir. Kırılma yüzeyi sünek kırılma olarak kabul edilir ve çukurlar ne kadar fazla ve derin olursa kırılma tokluğu o kadar iyidir. Bu nedenle, hem T6I4 hem de T6I6 numuneleri daha yüksek uzamaya sahiptir. Ayrıca SEM görüntülerinden de açıkça görülebileceği gibi, oluşan çukurlar T6 ısıtılma işlem sonucundan daha fazla ve daha derindir. Bu da T6I6 örneğinin T6 örneğinden daha büyük transgranüler kırılmanın alan fraksiyonu olduğunu gösterir. Kesintili yaşlandırma T6I6'nın alaşımın plastisitesinin iyileştirilmesi üzerinde olumlu bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu, çekme sonuçlarına uygundur (Xu 2020).

Şekil 4.53'de AA2024 T6I4-700 alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir.



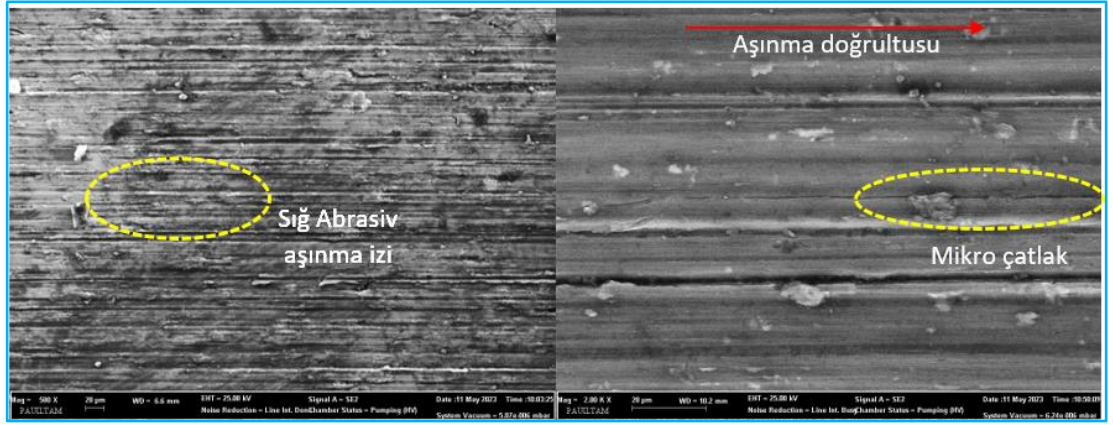
Şekil 4.53: AA2024-T0 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 4.54’te AA2024 T6 alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



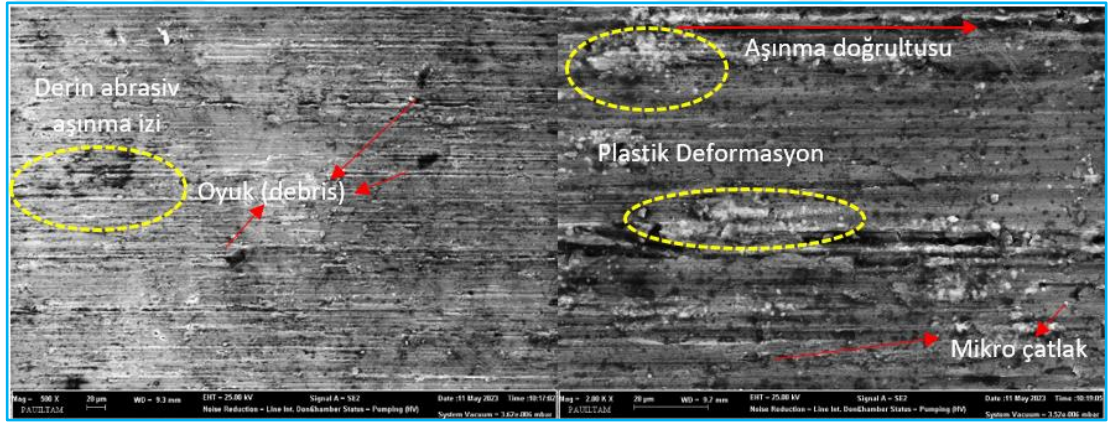
Şekil 4.54: AA2024-T6 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.55’te AA2024 T6I4-800 alaşımının aşınma sonrası kırılma yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir.



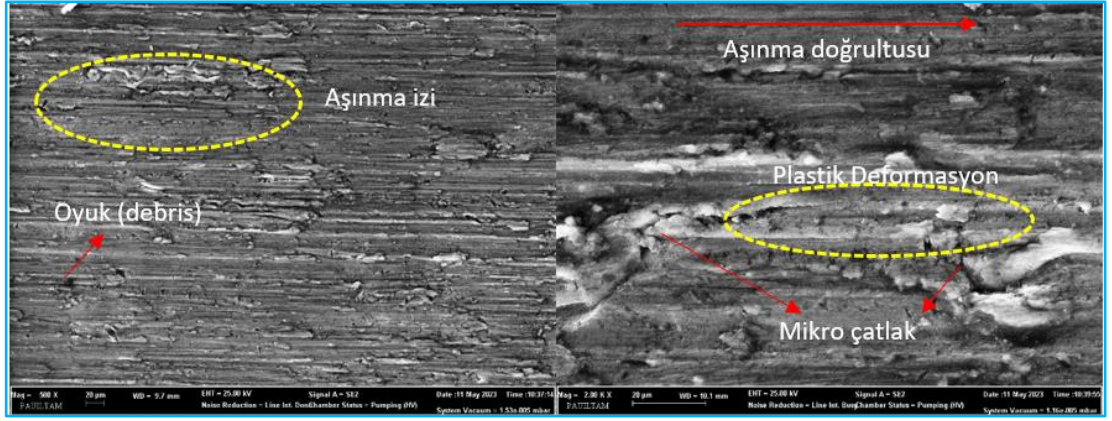
Şekil 4.55: AA2024 T6I4-800 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 4.56'da AA2024 T6I6-600 alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir.



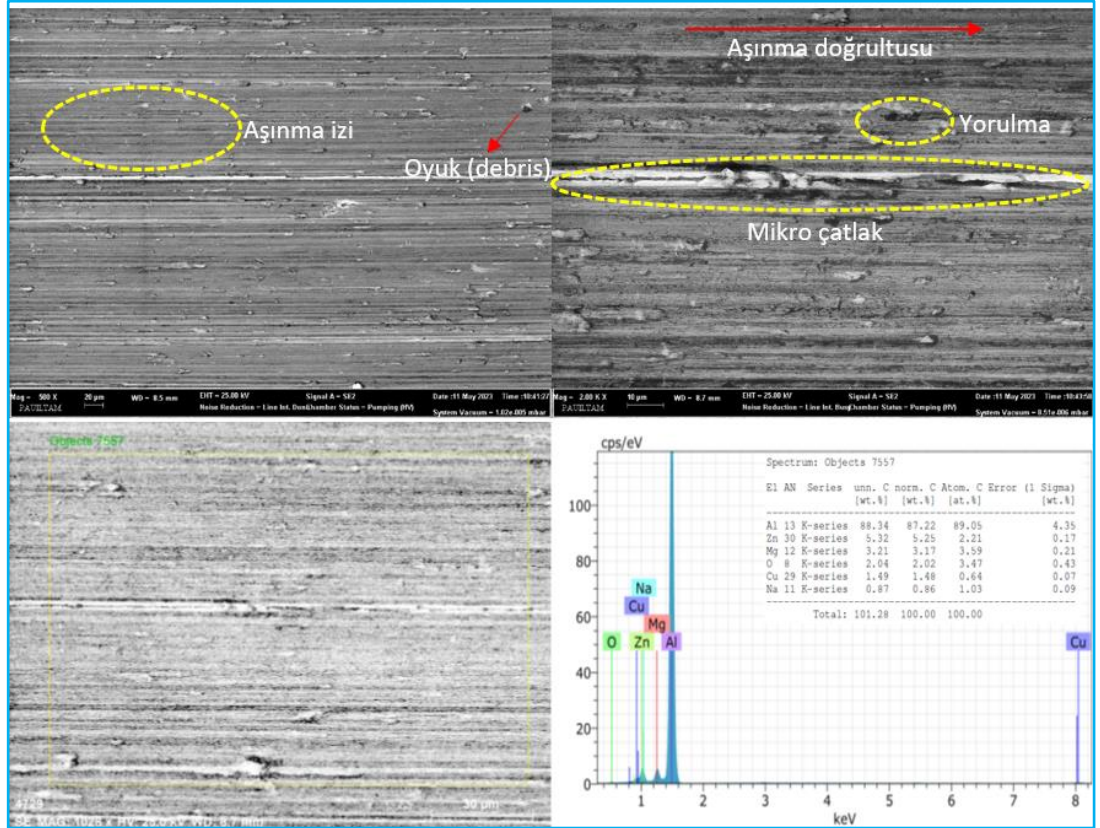
Şekil 4.56: AA2024 T6I6-600 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 4.57'de AA7075-T0 alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir.



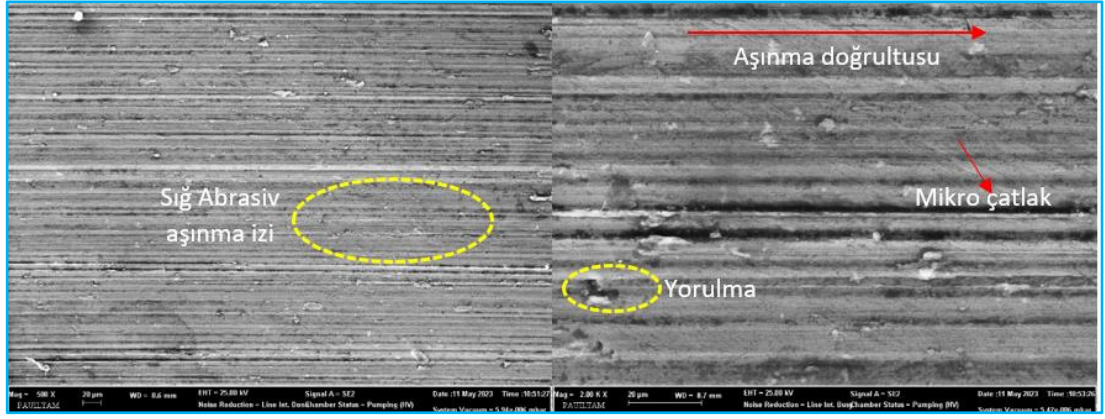
Şekil 4.57: AA7075-T0 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 4.58’de AA7075-T6 alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi görülmektedir.



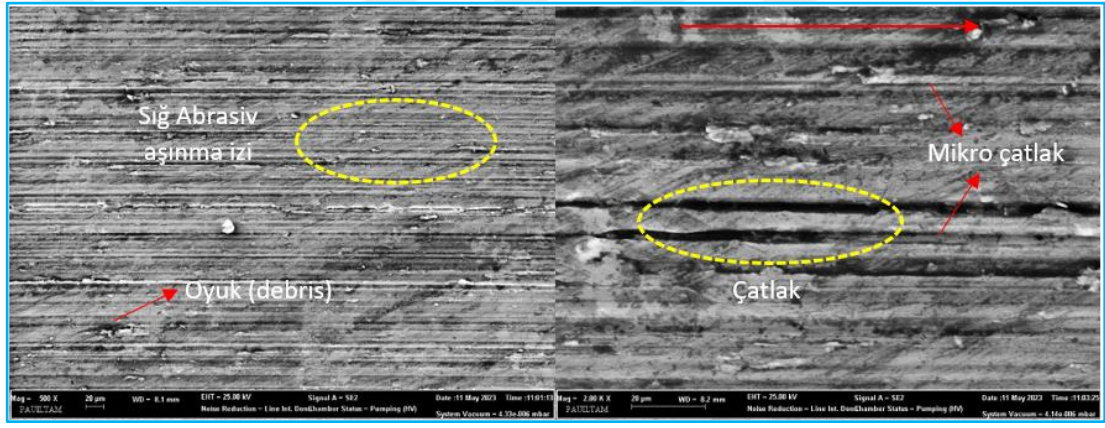
Şekil 4. 58:AA7075-T6 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü ve EDS analizi

Şekil 4.59’da AA7075 T6I4-700 alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.59: AA7075 T6I4-700 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü

Şekil 4.60’da AA7075 T6I6-500 alaşımının aşınma yüzeyinin SEM görüntüsü görülmektedir.



Şekil 4.60: AA7075 T6I6-500 alaşımının aşınma sonrası yüzeyinin SEM görüntüsü

Aşınmış yüzeylerin karakterizasyonu aşınma direncinin incelenmesinde en çok tercih edilen parametrelerden bir diğeridir. Isıl işlemsiz ve ısıtılmış numunelerin aşınma davranışlarını karakterize etmek amacıyla numunelerin aşınmış yüzey karakterizasyonları Şekil 4.52-4.59’da verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde en sığ aşınma çizgilerinin AA2024 alaşımında T6I6-600 numunesinde (Şekil 4.55), AA7075 alaşımında T6I6-500 (Şekil 4.59) numunesinde olduğu tespit edilmiştir.

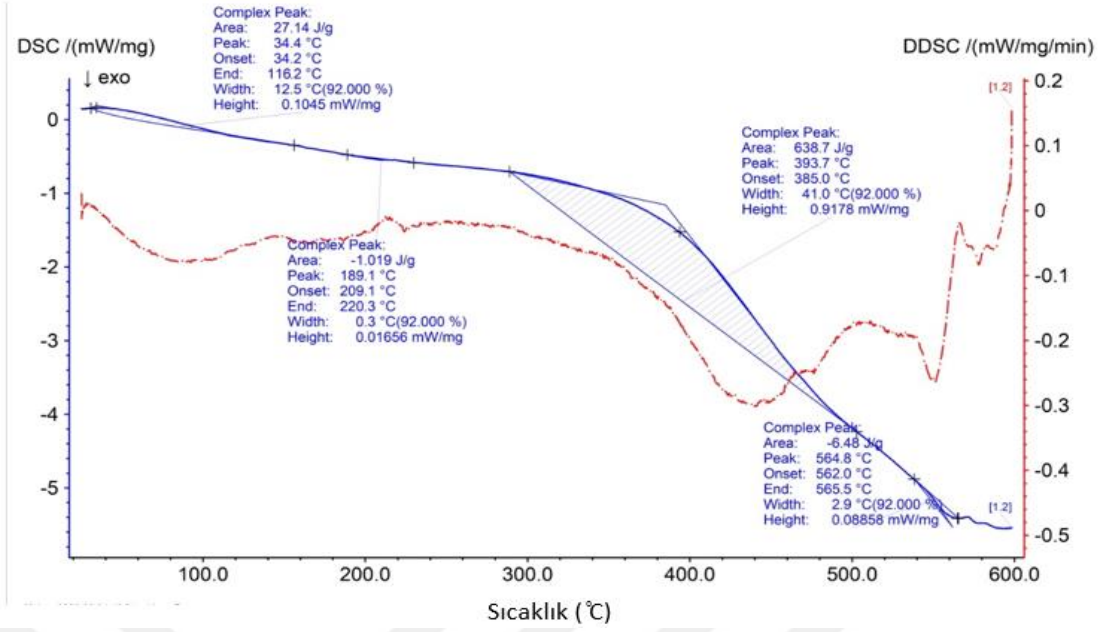
Sertliğin değişmesiyle birlikte aşınma morfolojilerinde önemli değişimler oluşmaktadır. Aşınma yüzeylerinin SEM görüntüleri incelendiğinde görülmektedir ki tüm numunelerin aşınmış yüzeylerinde abrasiv aşınma, yorulma, oyuk ve mikro çatlak aşınma mekanizmaları tespit edilmiştir. Özellikle sertliğin artmasıyla birlikte abrasiv aşınma izleri önemli derecede sığlaşırken sertliğin düşmesiyle derinlik ve genişliğinin

önemli derecede arttığı belirlenmiştir. Aşınma izlerindeki bu değişim sertliğin azalmasıyla abrasiv parçacıkların numune yüzeyinden çok daha fazla malzeme koparması-kaldırması ile açıklanabilir. Ayrıca sertliği yüksek numunelerin aşınma yüzeyleri incelendiğinde plastik deformasyon oluşumunun oldukça az olduğu tespit edilmiştir. (Karakoç 2019).

Alaşımelerde oluşan çökeltiler aşınma morfolojisi etki ederler. Alaşımın kimyasal bileşim içeriğine bağlı olarak (AA2024 için CuAl_2 , CuMgAl_2 , MgAl_2O_3 ; AA7075 için MgZn_2 , AlCuMg) farklı intermetalik çökeltiler ve oksitler aşınma çizgileri doğrultusunda farklı bölgelere yerleşmektedir. Bu çökeltiler ve oksitler, artan aşınma yükü ve kayma mesafesi parametrelerinde mikro çatlak ve kırılma oluşumlarına yol açmaktadır. Aşınma testleri sırasında, aşındırıcı partiküller matris malzemesinden daha rijit olan bu çökeltilerle temas ettikçe, uygulanan yük miktarı lineer olarak artan düzensiz titreşim hareketlerine neden olmuştur. Bu durum, bu bölgelerde mikro çatlaklar ve büyük gerilmelere bağlı mikro kırılmaların oluşmasına sebep olmuştur (Tan 2023).

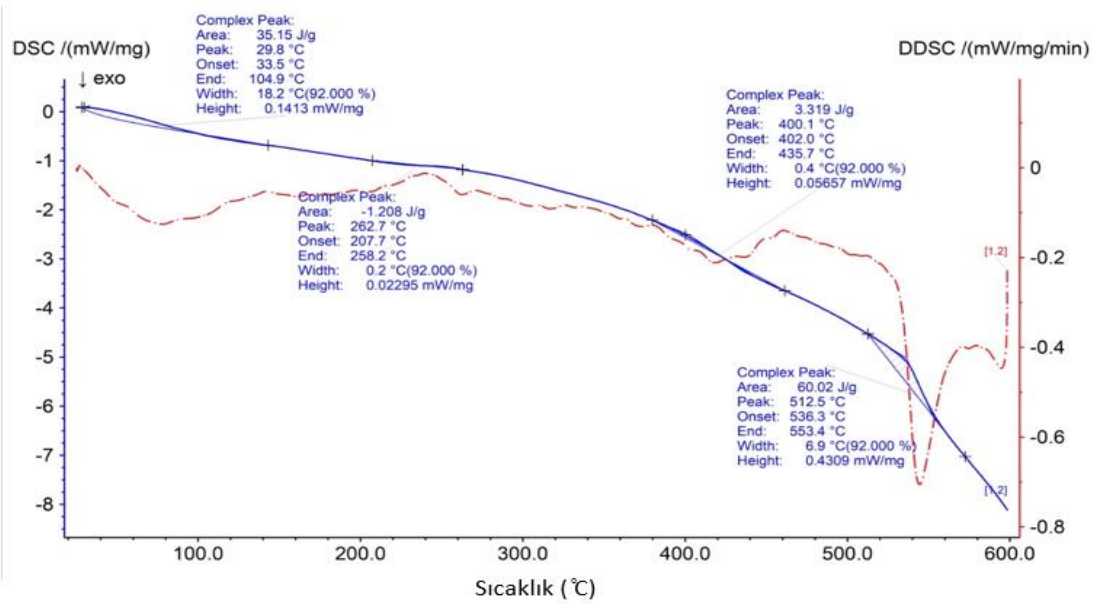
4.2.3 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıt işlemleri sonrası DSC analizi sonuçları

Şekil 4.61’de AA2024-T6 alaşımına ait DSC grafiği verilmiştir.



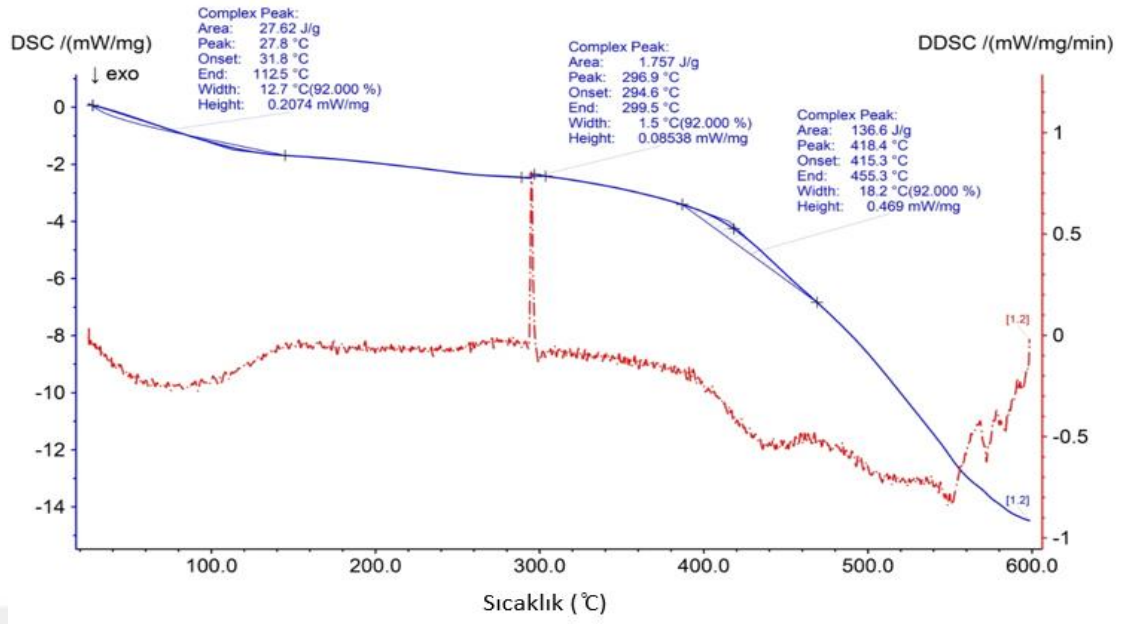
Şekil 4.61: AA2024-T6 alaşımına ait DSC grafiği

Şekil 4.62’de AA2024 T6I4-800 alaşımına ait DSC grafiği verilmiştir.



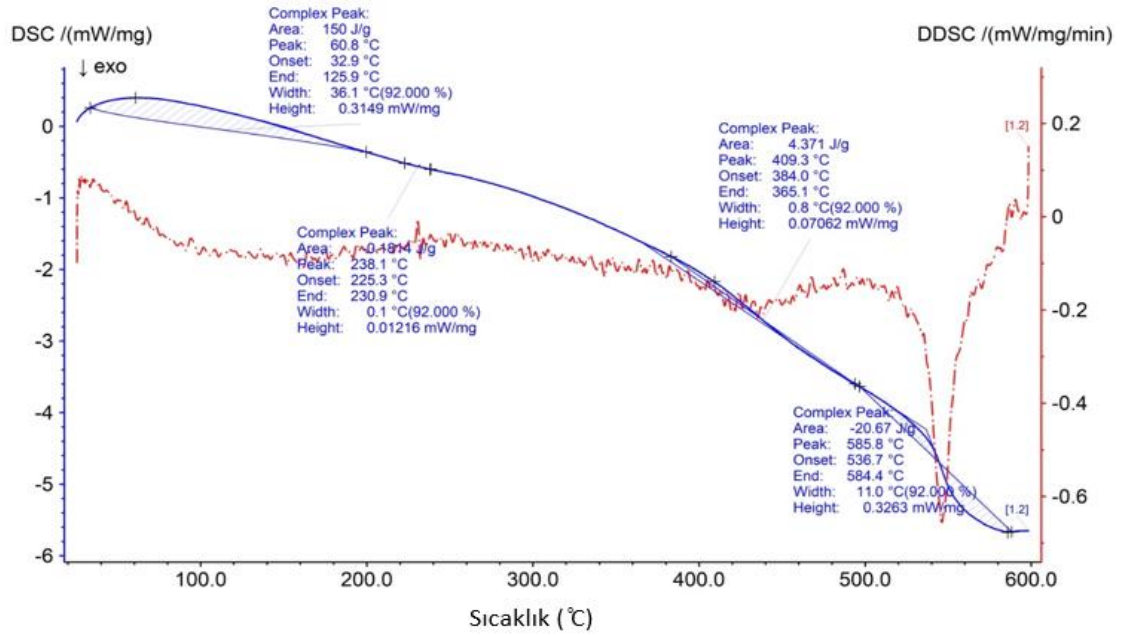
Şekil 4.62: AA2024 T6I4-800 alaşımına ait DSC grafiği

Şekil 4.63’de AA2024 T6I6-600 alaşımına ait DSC grafiği verilmiştir.



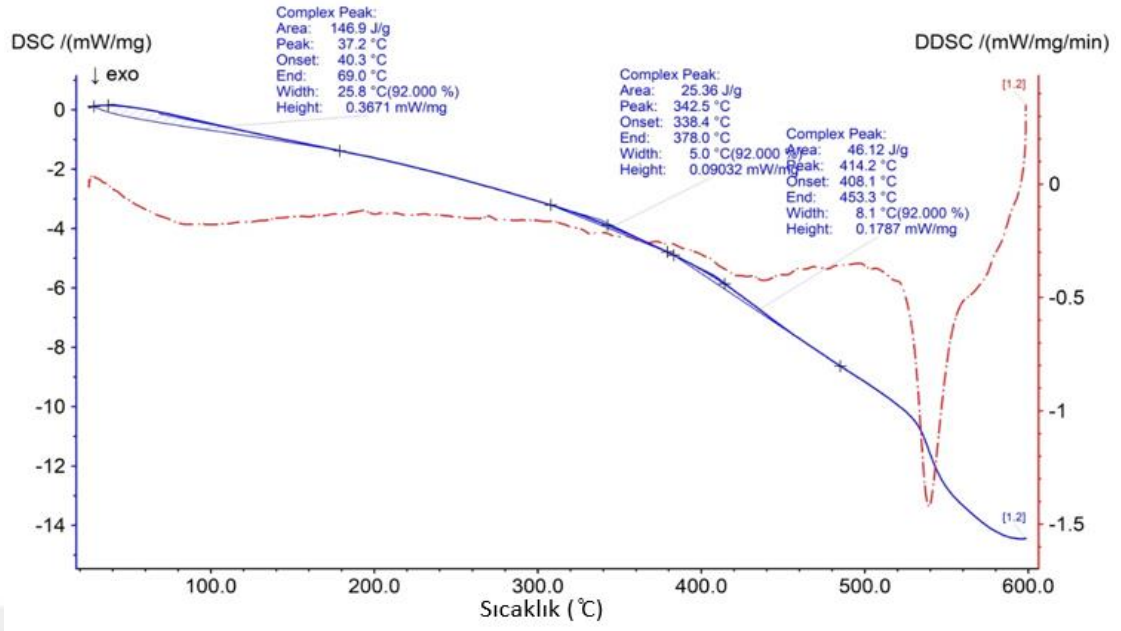
Şekil 4.63: AA2024 T6I6-600 alaşımına ait DSC grafiği

Şekil 4.64’de AA7075-T6 alaşımına ait DSC grafiği verilmiştir.



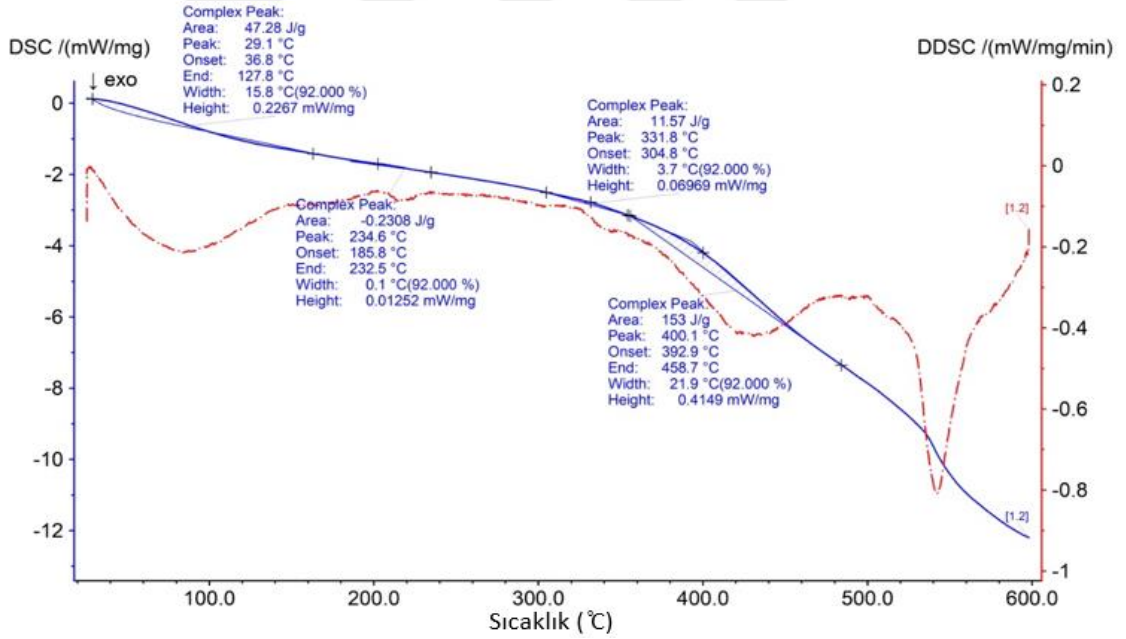
Şekil 4.64: AA7075-T6 alaşımına ait DSC grafiği

Şekil 4.65’de AA7075 T6I4-700 alaşımına ait DSC grafiği verilmiştir.



Şekil 4.65: AA7075 T6I4-700 alaşımına ait DSC grafiği

Şekil 4.66’da AA7075 T6I6-500 alaşımına ait DSC grafiği verilmiştir.



Şekil 4.66: AA7075 T6I6-500 alaşımına ait DSC grafiği

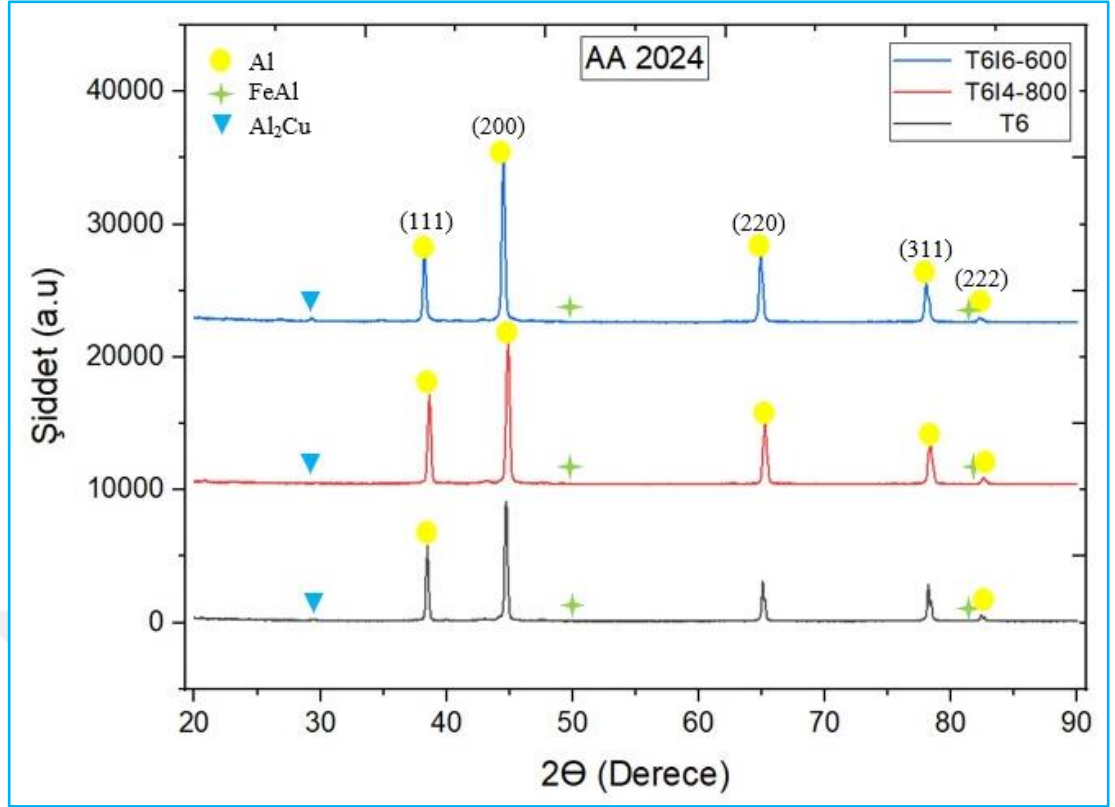
DSC, yaşlandırılabilir alaşımlardaki çökeltilerin miktarı ve boyutu hakkında bilgi verebilir (Lee ve diğ. 2021).

GB bölgeleri ve fazların hacim fraksiyonunun kalitatif bir ölçümünü elde etmek için diferansiyel taramalı kalorimetri kullanılmıştır. Bunun için dönüşümlerin başlangıç ve bitiş noktalarına ilişkin entalpi enerjisi, ilgili sıcaklık tepe değerleri ile

elde edilmiştir. Al-Cu-Mg alaşımları üzerine yapılan önceki DSC çalışmaları, Cu-Mg ortak kümelerinin veya GPB (Guinier-Preston-Bagaryatsky) bölgelerinin oluşumu ve çözünmesiyle ilgili ekzotermik ve endotermik etki olduğunu göstermiştir (Araghchi ve diğ. 2017). Bu nedenle, mevcut çalışmada, endotermik ve ekzotermik reaksiyonlardan elde edilen sıcaklık tepe noktaları, T6 ve T6I4-65 koşulları için ortalama sıcaklık tepe noktaları olarak gösterilmektedir. DSC termogramları ısıtma işlem parametrelerinin çökelme kinetiğini değiştirdiğini açıkça göstermiştir. DSC piklerinin boyutunun, bir iç reaksiyon meydana geldiğinde, yani bir intermetalik fazın çözünmesi veya çökmesi sırasında numune tarafından salınan/absorbe edilen enerjiye bağlı olduğu bilinmektedir. Daha yüksek çökelti boyutunun çözünmesi, bir dönüşümün meydana geldiği aralığı artırabileceğinden, başlangıç ve bitiş noktası arasındaki mesafede artışlar gözlemlenebilir. Bunun nedeni, daha yüksek çökelti boyutunun termal olarak daha kararlı olması ve tam bir çözünmeyi elde etmek için daha fazla zaman gerektirmesidir (Carvalho ve diğ. 2022).

4.2.4 T6 ve kesintili yaşlandırma (T6I4 ve T6I6) ısıtma işlemleri sonrası XRD analizi sonuçları

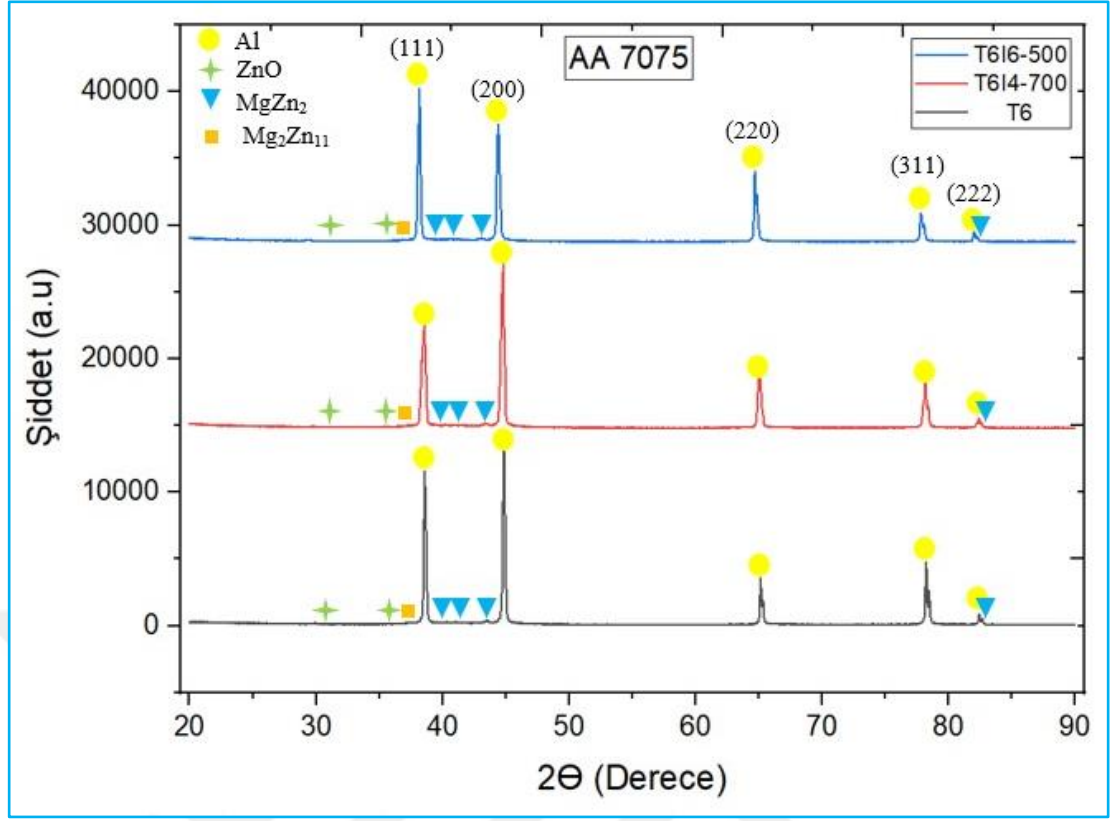
Şekil 4.67’de AA2024 alaşımının T6, T6I4-800 ve T6I6-600 numunelerin XRD grafiği verilmiştir.



Şekil 4.67: AA2024 alaşımının T6, T6I4-800 ve T6I6-600 numunelerin XRD grafiği

Mikroyapılarda fazlara bağlı olarak malzeme özelliklerinin değişir. Bu fazlar, sünek veya kırılgan kırılma gibi malzemenin karakteristik özelliklerini belirler. Mikro yapıdaki değişiklikler, malzemenin mekanik özelliklerini etkiler. Fazların çökmesi veya dönüşümü, malzemenin sertlik, dayanım ve kırılma dayanımı gibi önemli mekanik özelliklerini değiştirir (Kılıç 2019). XRD eğrisinde görülen FeAl intermetalik fazının yaşlandırma ile numunelerin mekanik özellikleri artırılabilir (Gong ve diğ. 2022) (Erdoğan ve diğ. 2014).

Şekil 4.68’de AA7075 alaşımının T6, T6I4-700 ve T6I6-500 numunelerin XRD grafiği verilmiştir.



Şekil 4.68: AA7075 alaşımının T6, T6I4-700 ve T6I6-500 numunelerin XRD grafiği

Şekil 4.68 incelendiğinde $2\theta = 38,33^\circ$, $44,58^\circ$ ve $64,91^\circ$ 78 ve 82 açılarında bulunan güçlü tepe noktaları, JCPDS kartı #89-4184'e göre Al ile ilişkilidir. XRD deseni, Al'ye ek olarak bazı ikincil fazların varlığını göstermiştir. Bu ikincil fazlar, MgZn₂'nin zayıf yansıma zirvelerini içermektedir (Oskouei ve diğ. 2019).

ZnO fazının (JCPDS kartı #75-0576) oluşumu, oksidasyon reaksiyonunun doğrudan bir sonucu olabilir. Bu, havaya maruz kalma sırasında temas eden plakalar arasında indüklenen sürtünme ısıyla sıcaklığın yerel olarak arttığı beklenen bir olaydır. Sonuçlar, bu faz bileşimi değişikliklerinin daha sonra üst yüzeydeki bu tür sert ve kırılğan bileşiklerin sayısında bir artışa yol açtığını ve bunun abrasiv aşınma ve çatlak başlangıcı için uygun yerler sağlayabildiğini göstermiştir. Ayrıca ısıtım işlem sonrası çökelen ikincil fazlardan MgZn₂'lerin zayıf yankı pikleri içerdiği ve artan ısıtım işlem süresine bağlı olarak daha yoğun olarak çökdikleri görülmektedir (Oskouei ve diğ. 2019) (Kalyon ve Özyürek 2017).

5. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, ticari olarak yaygın kullanım alanı bulunan AA2024 ve AA7075 alaşımlarına konvansiyonel T6 yaşlandırma ısıt işlemleri ve yeni nesil T6I4 ve T6I6 kesintili yaşlandırma ısıt işlemleri uygulanmıştır. Uygulanan ısıt işlemlerin alaşımların mekanik özelliklerine ve mikroyapısına etkileri belirlenmiştir. Çalışmanın sonuçları genel olarak aşağıda sunulmuştur.

- AA2024 T6 139,2 HV0,1 olan sertlik T6I4 ısıt işlemleri sonucunda % 15 artış ile 800. saatte 160,2 HV0,1' ye yükselmiştir.
- AA2024-T6 ısıt işlemleri sonucunda 139,2 HV0,1 olan sertlik T6I6 ısıt işlemleri sonucunda % 6'lık bir artış ile 147,5 HV0,1'ye yükselmiştir.
- AA2024 T6 durumunda 439,6 MPa olan çekme dayanımı % 30'luk bir artışla T6I4-800 durumunda 571,6 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA2024 T6 durumunda 382 MPa olan akma dayanımı % 36,1'lik bir artışla T6I4-800 durumunda 520 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA2024 T6 durumunda % 6'lık bir uzamaya sahip iken T6I4-800 durumunda % 41,66'lık bir artış ile % 8,5 seviyesine yükselmiştir.
- AA2024 T6 durumunda 439,6 MPa olan çekme dayanımı % 32'lik bir artışla T6I6-600 durumunda 446 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA2024 T6I6 ısıt işlemleri sonucunda akma dayanımı T6 ısıt işlemine göre % 3,6'lık bir artış ile 396 MPa değerine ulaşmıştır.
- AA2024 alaşımında kopma uzaması değeri ise T6 durumunda %6 iken T6I6 kesintili ısıt işlem sonrasında % 63'lük bir artış ile % 9,8 değerine ulaşmıştır.
- AA2024 alaşımında T6 durumunda 446,7 MPa olan maksimum eğilme dayanımı % 29'lik bir artışla T6I4-800 durumunda 571,2 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA2024 alaşımında T6'da 446,7 MPa olan maksimum eğilme dayanımı T6I6-600'de % 11,5'lik artış ile 498,2 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA2024 alaşımında T6 durumunda numunede 15 N yük altında 30 mm³ hacim kaybı görülmüştür. En düşük hacim kaybına uğrayan numune ise 13,56 mm³ ile T6I4-800 numunesidir.
- AA2024 T0 numunesinde (yaklaşık 0,83-0,88 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise T6I4-800 numunesinde (0,4-0,36 μ) elde edilmiştir.

- AA2024 alaşımında T6 ısıl işlem sonrası 0,841 μ olan ortalama pürüzlölük Ra değeri T6I4-800 durumunda 0,528 μ değerine kadar azalmıştır.
- AA2024 alaşımında T6 durumunda numunede 15 N yük 30 mm³ hacim kaybı görölmüştür. En düşük hacim kaybına uğrayan numune ise 22,6 mm³ ile T6I6-600 numunesidir.
- AA2024 T0 numunesinde (yaklaşık 0,83-0,88 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise T6I6-600 numunesinde (0,69-0,72) elde edilmiştir.
- AA2024 alaşımında T6 ısıl işlem sonrası 0,841 μ olan ortalama pürüzlölük Ra değeri T6I6-600 durumunda 0,81 μ değerine kadar azalmıştır.
- AA7075-T6 191,2 HV0,1 olan sertlik ise % 10 artış ile T6I4-700. saatte 211,5 HV0,1' ye yükselmiştir.
- AA7075-T6 191,2 HV0,1 olan sertlik ise % 17 artış ile T6I6-500. saatte 215,5 HV0,1' ye yükselmiştir.
- AA7075-T6 durumunda 593 MPa olan çekme dayanımı % 5,9'luk bir artışla T6I4-700 temperinde 628 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA7075-T6 durumunda 552 MPa olan akma dayanımı % 6,7'lik bir artışla T6I4-700 temperinde 589 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA7075-T6 durumunda % 12,5'lık bir kopma uzaması görölürken, T6I4-700 temperinde % 17'lik bir artış ile bu değer % 15 seviyesine yükselmiştir.
- AA7075 alaşımında T6I6 ısıl işlemi sonucunda çekme dayanımı T6 (593 MPa) ısıl işlemine göre yaklaşık % 7 artış ile 636 MPa değerine ulaşmıştır.
- AA7075 alaşımında T6I6 ısıl işlemi sonucunda akma dayanımında T6 ısıl işlemine göre % 8 artış yaşanarak 597 MPa değerine yükselmiştir.
- AA7075 alaşımında T6 durumunda % 12,5 iken T6I6 kesintili ısıl işlem sonrasında kopma uzaması % 21,6'lık bir artış ile %15,2 değerine ulaşmıştır.
- AA7075 alaşımında T6 durumunda 743,2 MPa olan maksimum eğilme dayanımı % 8,5'luk bir artışla T6I4-700 durumunda 807,6 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA7075 alaşımında T6'da 743,2 MPa maksimum eğilme dayanımı T6I6-500'de % 17 artış ile 870 MPa seviyesine yükselmiştir.
- AA7075 alaşımında T6 durumunda numunede 15 N yük altında 20,5 mm³ hacim kaybı görölmüştür. En düşük hacim kaybına uğrayan numune ise 9,2 mm³ ile T6I4-700 numunesidir.

- AA7075-T0 numunesinde (yaklaşık 079-0,73 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise AA7075 T6I4-700 numunesinde (0,33-0,29 μ) elde edilmiştir.
- AA7075 alaşımında T6 ısıtıl işlem sonrası 0,8371 μ olan Ra değeri T6I4-700 durumunda 0,495 μ değerine kadar azalmıştır.
- AA7075 alaşımında T6 durumunda numunede 15 N yük altında 20,5 mm³ hacim kaybı görülmüştür. En düşük hacim kaybına uğrayan numune ise 8,8 mm³ ile T6I4-500 numunesidir.
- AA7075-T0 numunesinde (yaklaşık 079-0,73 μ) elde edilirken en düşük sürtünme katsayısı ise AA7075 T6I6-500 numunesinde (0,331-0,26 μ) elde edilmiştir.
- AA7075 alaşımında T6 ısıtıl işlem sonrası 0,684 μ olan Ra değeri T6I6-500 durumunda 0,470 μ değerine kadar azalmıştır.
- SEM görüntülerinde ikincil faz çökeltilerinin T6 ısıtıl işlemiyle birlikte oluşmaya başladığı tespit edilmiştir.
- Genel olarak kırılma sonrası oluşan yapıda, parçacıkların veya tane sınırı çökeltilerinin neden olduğu büyük boyutlu çukurlar ve tane içlerinde çekirdeklenmiş küçük boyutlu çukurlar olmak üzere iki tür çukur gözlenmiştir.
- T6I4 ve T6I6 numunelerindeki çukurlar, daha büyük ve daha derindir. Ayrıca çukurların içlerinde küçük boyutlu birçok partikülün bulunduğu görülmüştür.
- Aşınma SEM görüntüleri incelendiğinde en sık aşınma çizgilerinin AA2024 alaşımında T6I4-800 numunesinde, AA7075 alaşımında T6I6-500 numunesinde olduğu tespit edilmiştir. Bu durum da sertlikle doğrudan ilişkilidir.
- Kesintili yaşlandırma işlemi kırılma sonucu oluşan boşluk yapısını artırır. Bu durum, tokluktaki iyileşmenin, kesintili yaşlandırılan malzeme tarafından meydana getirilen mikroyapısal modifikasyonların bir sonucu olarak mikro boşluk birleşme mekanizmasındaki modifikasyondan kaynaklandığını göstermektedir.
- XRD analizi sonuçlarına göre AA2024 alaşımında AlFe ve Al₂Cu çökeltilerinin, AA7075 alaşımında ise MgZn₂, Mg₂Zn₁₁ ve ZnO çökeltilerinin varlığı belirlenmiştir. Bu çökeltilerin mekanik özelliklerin iyileştirilmesine katkı sunduğu değerlendirilmiştir.

- DSC termogramları ısıtıl işlem parametrelerinin çökeltme kinetiğini değiştirdiğini açıkça göstermiştir.
- Daha yüksek çökelti boyutunun çözünmesi, bir dönüşümün meydana geldiği aralığı artırabileceğinden, başlangıç ve bitiş noktası arasındaki mesafede artışlar gözlemlenebilir. Bunun nedeni, daha yüksek çökelti boyutunun termal olarak daha kararlı olması ve tam bir çözünmeyi elde etmek için daha fazla zaman gerektirmesidir.

ÖNERİLER

- Kesintili yaşlandırma sonucunda oluşan çökeltilerin boyutlarının, çökelti aralarındaki mesafelerin, kristal düzlemlerinin ve dağılımlarının daha ayrıntılı incelenebilmesi için Geçirimli Elektron Mikroskobu (TEM) analizi yapılabilir.
- Isıl işlemle yaşlandırılabilir farklı alüminyum alaşımlarına farklı kesintili yaşlandırma temperi uygulamaları farklı sıcaklık ve süre parametrelerinde uygulanabilir.
- Metal kalitesiyle mikroyapı ve mekanik özellikler arası ilişki VAKT (Vakum Altında Katılma Testi) ve bifilm indeks ölçümleriyle değerlendirilebilir.
- Dövme alüminyum alaşımlarına uygulanan farklı plastik şekil verme yöntemleriyle deformasyon miktarının yaşlandırma süreçleri üzerindeki etkisi incelenebilir.
- Çalışmanın sonunda, endüstriyel kullanıcılara yönelik olarak yeni nesil kesintili yaşlandırma prosesiyle konvansiyonel yaşlandırma proseslerine göre iyileştirilmiş mekanik özellikler ile birlikte süneklik ve tokluk optimizasyonunun sağlanabileceği, böylece alüminyum alaşımlarının kullanım alanının geniş ölçekte geliştirilebileceği önerilmektedir.

6. KAYNAKLAR

Aalco Metals Limited., “Aluminium Alloy Specifications”, *United Kingdom*, 1-6 .47, 9, 2651-2659, (1999).

Ahmadzadeh, S., “Aşırı Plastik Deformasyonun Seramik Parçacık Takviyeli Alüminyum Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi” *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2014).

Al_Saadi, H.I.A, Tunay, R.F., “ Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi”, *Journal of Engineering Sciences and Design*, 5(3), 525-532, (2017).

Altuntaş G. ve Bostan B., “Al – Zn – Mg – Cu alaşımının kristalografisine RRA ısıtıl işlemi etkilerinin İncelenmesi”, *Politeknik Dergisi*, 25(2): 871-877, (2022).

American National Standards Institute, (ANSI). “American national standard alloy and temper designation systems for aluminum”, ANSI H35.1 Washington, (2006).

Antunes, A. M. B. S., Baptista, C. A. R. P., Barboza, M. J. R., Carvalho, A. L. M. and Mogili, N. V. V. "Effect of the interrupted aging heat treatment T6I4 on the tensile properties and fatigue resistance of AA7050 alloy", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 41, 319, (2019).

Araghchi, M., Mansouri, H., Vafaei, R., "Influence of cryogenic thermal treatment on mechanical properties of an Al–Cu–Mg alloy" *Materials Science and Technology*, 34, 1, 5, (2017).

Askeland, R.D., “The Science and Engineering Of Materials, 6th ed.”, *Cengage Learning*, 539 (2011).

ASTM E8 / E8M-09, “Standard Test Methods For Tension Testing Of Metallic Materials”, *ASTM International, West Conshohocken, PA*, (2009),

ASTM G99-17, “Standard test method for wear testing with a pin-on-disk apparatus”, *ASTM International, West Conshohocken, PA*, (2017),

Ataşen, U., “Soğuk Haddelenmiş 3003, 3105, 3005 Alüminyum Alaşımlarında Alaşım Elementi Olarak Magnezyumun Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2015).

Atık, E., Meriç, C., Şahan, A., “TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiş 2024 alüminyum alaşımının kaynak bölgesinin çökelme sertleşmesi bakımından incelenmesi”, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3, 3, 75-83. (2001).

Atkaya, M., “Alüminyum 6061 T6 Özelliğindeki Malzemenin Elektron Işın Kaynağı Yöntemi İle Kaynaklanabilirliğinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı*, Ankara, (2021).

Aydın, B., “AA2014 Alaşımında Yaşlandırma Isıl İşlemleri İle Değiştirilen İşlenebilirlik Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2002).

Aydın, H., Tunçel, O., “AA7075 Alüminyum Alaşımında Çözme Tavu Sıcaklığının Yaşlanma Davranışına Etkisi”, *Uhudağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24 (1), (2019).

Bahrami, A., Miroux, A. And Kestens, L., “An age hardening model for interrupted ageing of the alloy AA6061”, *Metal Forming*, 2, (2008).

Bakavos, D., Prangnell, P. and Dif, R., "A comparison of the effects of ageforming on the precipitation behaviour in 2xxx, 6xxx and 7xxx aerospace alloys", *Materials Forum*, 28, 124-131, (2004).

Baksan B., Çelikyürek İ., Torun O., “Influence of Intermittent Aging in AA7075 Aluminum Alloy”, *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Mathematics (EPSTEM)*, 11, 141-145, (2020).

Baksan, B., Celikyürek, I. and Torun, O., “Influence of intermittent aging in aa7075 aluminum alloy”, *The Eurasia Proceedings of Science Technology Engineering and Mathematics*, 11, 141-145, (2020).

Başaran Bekir., “Alüminyum 2024 Sacların Sürünme-Yaşlandırma Şekillendirme Prosesindeki Geri Yaylanma Davranışının Deneysel Olarak Araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2022).

Başer, T. A., “Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı,” *Mühendis ve Makina*, 53, (635), 51-58 (2012).

Baydoğan, M., “Retrograsyon ve Yeniden Yaşlandırma Uygulanmış 2014 ve 7075 Kalite Alüminyum Alaşımlarının Mekanik ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi” Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2003).

Bayoğlu, S., “Al-Si-Mg Alaşımlarına ilave edilen Cu ve Fe’in mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2015).

Benedyk, J. C., “ Aluminum alloys for lightweight automotive structures” *Materials, Design and Manufacturing for Lightweight Vehicle*, (2010).

Benedyk, J. C., “International Temper Designation System for Wrought Aluminium Alloys”, *Part II-Thermally Treated (T Temper) Aluminium Alloys*, (2010).

Berg, L. K., Gjønnes, J., Hansen, V. X., Li, X. Z., Knutson-Wedel, M., Schryvers, D., & Wallenberg, L. R. (2001). GP-zones in Al–Zn–Mg alloys and their role in artificial aging. *Acta materialia*, 49(17), 3443-3451.

Berg, L. K., Gjønnes, J., Hansen, V. X., Li, X. Z., Knutson-Wedel, M., Schryvers, D., and Wallenberg, L. R., “GP-zones in Al–Zn–Mg alloys and their role in artificial aging”, *Acta materialia*, 49(17), 3443-3451, (2001).

Bıçaklı, E. E., “Yaşlandırma işleminin tam yoğun ve T/M AA2024 alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü*, Isparta, (2018).

Bovard, F., Smith, K., Courval, G. and McCune, D., “Cosmetic corrosion test for aluminum autobody panels, final report”, *SAE international journal of passenger cars - mechanical systems*, 3 (1), 544–553, (2010).

Buha J., Lumley R.N., Crosky A.G., “Secondary Ageing in An Aluminium Alloy 7050”, *Materials Science and Engineering A* 492, 1–10, (2008).

Buha, J. Lumley, R., Crosky A., and Hono K. “Secondary precipitation in an AlMgSiCu alloy," *Acta Materialia*, 55, 9, 3015-3024, (2007).

Buha, J. Lumley, R. N. and Crosky, A. G., “Precipitation and solute distribution in an interrupted-aged AlMgSiCu alloy," *Philosophical Magazine*, 88, 3, 373-390, (2008).

Buha, J., Lumley, R. and Crosky, A., “Precipitation and solute distribution in an interrupted-aged AlMgSiCu alloy", *Philosophical Magazine*, 88, 3, 373-390, (2008).

Buha, J., Lumley, R. and Crosky, A., and Hono, H., “Secondary precipitation in an AlMgSiCu alloy", *Acta Materialia*, 55, 9, 3015-3024, (2007).

Buha, J.,” Interrupted ageing of Al – Mg – Si – Cu alloys”, doctoral thesis, *School of Materials Science and Engineering University of New South Wales*, (2005).

Burgucu, S., “7075 Alüminyum Alaşımlarının Üretimini Ve Karakterizasyonu” Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalürji Mühendisliği Anabilim Dalı*, İstanbul, (2011).

Burmabıyık, M., “Bakır-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Edirne, (2019).

Bütçe Ve Mali Hizmetler Genel Müdürlüğü, “Millî Savunma Bakanlığının 2021 Yılı Kurumsal Mali Durum Ve Beklentiler Raporu”, (2021).

Büyükdoğan, S., “Yaşlandırılan Al-Mg-Si alaşımının aşınma davranışlarının incelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2011).

Callister, W.D., “Fundamentals Of Materials Science And Engineering”, *United States of America*: (2014).

Campbell, F. C., “Manufacturing technology for aerospace structural materials”, *Elsevier*, Amsterdam, (2006).

Car, E., 2011, “Alüminyum üretim süreçleri”, *TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası*, İstanbul, 2-15,

Carvalho, A.L. and Martins, J. "Effect of interrupted ageing and retrogression-reageing treatments on fatigue crack growth with a single applied overload in 7050 aluminum alloy" *Materials Research*, 21, (2018).

Carvalho, A.L.M., Renaudin, L.B., Zara, A.J. and Martins, J.P. "Microstructure analysis of 7050 aluminum alloy processed by multistage aging treatments" *Journal of Alloys and Compounds*, 907, 164400, (2022).

Channappagoudar, S., Sannayallappa, N., Desai, V. And Karodi, V., “Influence of combined grain refinement and modification on the microstructure, tensile strength and wear properties of Al-15Si, Al-15Si-4.5 Cu alloys”, *International Journal of Materials Research*, 106(9), 962-969. (2015).

Coşkun, A., “Yaşlandırılan AA 2024 Alüminyum Alaşımının Soğuk, Ilık ve Sıcak Deformasyonu Kabiliyetinin İncelenmesi” Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı*, Karabük (2020).

Coşkuner, A., “5000 Serisi Alüminyum-Magnezyum Alaşımlarının Döküm ve Termomekaniksel Prosesleri”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2001).

Çağlayan, R., “Taşıtlarda ağırlık azaltımında hafif malzeme olarak alüminyum kullanımı ve optimizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bursa, (2020).

Çakır., A.,“AA 7075 ve AA 2024 alüminyum malzemelerine delik delinmesinde soğutma yöntemlerinin işleme performansına etkilerinin incelenmesi”, Doktora Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2015).

Çapık, M., “Eğilme (bükülme) dayanımı deney föyü”, *Karadeniz Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği*, Trabzon, (2010).

Çetintürk, S., “ A206.0 Alüminyum Bakır Alaşımlarının Farklı Aşıl原因ıcılar İle Tane Boyutunun İncelenmesi Ve T6 Isıl İşlemi Uygulayarak Mekanik Özelliklerinin Geliştirilmesi” Doktora Tezi, *Konya Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, (2021).

Chen, Y., Weyland, M. and Hutchinson, C. R. “The effect of interrupted aging on the yield strength and uniform elongation of precipitation-hardened Al alloys”, *Acta Materialia*, 61(15), 5877-5894, (2013).

D.E and Hono, K., (Eds.), Nie, J.F., “Physical metallurgy of light alloys, In Laughlin, Physical Metallurgy” (5th Ed.), *Elsevier*, (2014).

D.R Askeland., “Malzeme Bilimi ve Mühendislik Malzemeleri Cilt 1”, (Çeviri: M. Erdoğan), *Nobel Yayın Dağıtım*, 265-269, (2002).

Daşcılar B., “Farklı Ekstrüzyon Hızlarında Ekstrüze Edilmiş AA6063 Alüminyum Alaşımlarının Yüzey ve Korozyon Özelliklerinin İncelenmesi”, Yüksek lisans tezi, *Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü*, Gebze, (2006).

Davis, J. R., “Alloying: Understanding the Basics”, ASM International”, *United States of America*, 351-416, (2001).

Davis, J.R., “Alloying: Understanding the Basics”, ASM International® All rights reserved, 351-416, (2001),

Demir, H. Gündüz, S.,“The effect of aging on machinability of 6061 aluminum alloy”, *Material Design*, 30, 1480-1483, (2009).

Demir, M., “Alüminyum-7075 Dövme Alaşımlarının Dökülebilmesi Ve T6 Yaşlandırma Isıl İşlemi İle Mekanik Özelliklerinin İyileştirilmesi” *Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yüksek Lisans Tezi*, Sakarya, 2020.

Demirel, M. Y., “Alüminyum sac malzemelerde sıcaklığın geri esnemeye etkisinin deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2018).

Demirtaş, H., “6061 Alüminyum Alaşımlarında Ara Verilerek Yapılan Yaşlandırma İşleminin Malzeme Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Niğde, (2009).

Dongre, R. D. and Salunkhe, S., “Study of effect of deformation temperature on 6061 aluminium alloy by thermo mechanical simulation”, *Global Journal of Researches in Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering*, 14,45-48 (2014).

Du, Z.W. Sun, Z.M. Shao, B.L. Zhou, T.T. Chen, C.Q. “Quantitative evaluation of precipitates in an Al-Zn-Mg-Cu alloy after isothermal aging”, *Material Characterization*, 56, 121-128, (2006).

Durmuş, S., Akgün, S. ve Şahin, S., “Çökelme Sertleştirilmesi uygulanmış AA 7012 Alüminyum Alaşımlarında Sertliğin Mikro yapı ile değişiminin incelenmesi”, 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09)*, Karabük (2009).

Dursun, T., ve Soutis, C., “Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys”, *Materials and Design*, 56, 862-871 (2014).

Dündar, M., Sarıoğlu, A.S. and Akkurt, A.S., TMS, “Formability Performance of 5XXX Series Aluminum Alloys Produced With Twin-Roll Casting Technology”, *Automotive Alloys*, ed. Das, S., Pa, (2002),

Erdoğan Y. A., “Termo-Mekanik işlem uygulanmış AA6082 alüminyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli (2018).

Erdoğan, M., “ Mühendislik alaşımlarının yapı ve özellikleri”, *Nobel Yayın Dağıtım*, Ankara, (2001).

Erdoğan, T., “Demir dışı metaller ve alaşımlarının uygulamalı optik metalografisi”, *SEGEM Yayınları*, 20-56, (1984).

Eren, H., “Al-Si alaşıımının mekanik özelliklerine magnezyum elementinin etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2017).

Eroğlu, G., Şahiner, M., “Dünyada ve Türkiye’de alüminyum”. *Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı*, (2018).

Ersöz E. ve Ovalı I., “AISI D2 Soğuk İş Takım Çeliğine Uygulanan Endüstriyel Kriyojenik İşlemin Aşınma Davranışları Üzerindeki Etkisi”, *Politeknik Dergisi*, 21(2): 411-417, (2018).

Esmailian M., Shakouri M., Mottahedi A. ve Shabestari S.G., Effect of T6 and re-aging heat treatment on mechanical properties of 7055 aluminum alloy, *International Journal of Chemical, Molecular, Nuclear, Materials and Metallurgical Engineering*, 9-11, 1230-1233, (2015)

EUROLAB, SEM analizi SEM-EDS analizi [online], (2023), Web adresi: <https://www.labaratuvar.com/testler/malzeme/sem-analizi-sem-eds-analizi/>

Gao, N., Starink, M. J., Kamp, N. and Sinclair, I., “Application of uniform design in optimisation of three stage ageing of AlCuMg alloys”, *Journal of Materials Science*, 42, 12, 4398-4405, (2007).

Gedik, D., “Alüminyum yüzeyindeki oksit tabakasının sodyum dikromat sülfürik asit anadizing yöntemiyle geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Adana, (2008).

Gökçe, A., “Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-Cu alaşımlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, (2013).

Gül, C., “Malzeme metalografi deneyi laboratuvar föyü”, *Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü*, Manisa, (2017).

Gül, F. “AlSi10Mg Döküm Alaşımlarının Bazı Mekanik Özellikleri Üzerine İkincil Yaşlandırma İşleminin Etkisi”, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 18(1), 30-37, (2014).

Gülyüz, K. “Deformasyon Yaşlanmasının AA7075 Alaşımının Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2011).

Gündüz, S., “Metalurjide Faz Diyagramları”, *Seçkin Yayıncılık*, Ankara, (2013).

Güner, A. T., “Yarı-katı halde şekil verilmiş alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine su verme sıcaklığının etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli, (2013).

H., Eren, “Al-Si alaşımının mekanik özelliklerine magnezyum elementinin etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2017).

Haisheng, W., Danqing Y., Huiqun L., Bin, W., “Microstructure and mechanical properties of interrupted aged cast Al-4.5Cu-3.5Zn-0.5 Mg alloy”, *Materials Letters*, 285, 1-5, (2021).

Iacono, C., Sinke, J., and Benedictus, R., “Prediction of minimum bending ratio of aluminium sheets from tensile material properties”, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132, (1087-1357), 21001-1-21001-9, (2010).

Ian Polmear, David StJohn, Jian-Feng Nie, Ma Qian, 4 - Wrought Aluminium Alloys, Light Alloys (Fifth Edition), Butterworth-Heinemann, 157-263, (2017).

Ilgaz, O., “Döküm, ekstrüzyon ve dövme işlemlerinin 6082 al alaşımlı dövme süspansiyon parçalarında mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi” Yüksek Lisans, T.C. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, (2014).

Isadere, A.D., Aremo, B., Adeoye, M.O., Olawale, O.J. and Shittu, M.D., “Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminum alloy”, *Materials Research*, 16, 190-194, (2013).

Jacumasso, S.C., Oliveira, P.H.F., Martins, J.P. and Carvalho, A.L.M., "Microstructural characterization of interrupted aging on an AA7050 aluminum alloy", *Materials Characterization*, 152, 180-187, (2019).

Kaczmarek, L., Steglinski, M., Sawicki, J., Swiniarski, J., Batory, D., Kyzioł, K. and Kottfer, D. “Optimization of the heat treatment and tribological properties of 2024 and 7075 aluminium alloys”, *Archives of Metallurgy and Materials*, 58(2), 535-540, (2013).

Kaczmarek, L., Stegliński, M., Sawicki, J., Swiniarski, J., Batory, D., Kyzioł, K., Kyzioł, K., Kolodziejczyk, L., Szymański, W., “Optimization of the heat treatment and tribological properties of 2024 and 7075 aluminium alloys”, *Archives of Metallurgy and Materials*, 58, 535-540, (2013).

Kalay, Y.E., Ögel, B., Yıldırım, R.O., “Tek ve çok katmanlı AA 2024 plakaların düşük hızlarda darbe karakterizasyonu”, *SAVTEK, Savunma Teknolojileri Kongresi*, 59-67, ODTÜ, Ankara (2004).

Kalyon, A. ve Özyürek, D. "Investigation of the Effect of Different Heat Treatments on Wear Behavior of AA7075 Alloy", *Acta Physica Polonica A*, 131, 150-152, (2017).

Karabaşoğlu, M., “Aşınma Deney Cihazı Tasarımı ve İmalatı”, Yüksek Lisans Tezi *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü*, Sakarya, (2008).

Karakoç, H., Ovalı İ., Dündar, S. and Çıtak, S., "Wear and mechanical properties of Al6061/SiC/B4C hybrid composites produced with powder metallurgy", *Journal of Materials Research and Technology*, 8, 5348-5361, (2019).

Kaufman, J. G., "Introduction to Aluminum Alloys and Tempers", *ASM International, United States of America*, 87-115 (2000).

Kaya, I., "Al 7075 Alaşımının şekillendirme ve Isıl İşleme Özelliklerinin İyileştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, *YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul. (2005).

Kayapa, S., "Sürekli Döküm Tekniği İle Üretilmiş Levhalarda Dökme Rulo Kalınlığının Mikroyapı Ve Mekanik Özelliklere Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, (2015).

Kılıc, S., Kacar, I., Sahin, M., Ozturk, F. and Erdem, O. "Effects of aging temperature, time, and pre-strain on mechanical properties of AA7075", *Materials Research*, 22, (2019).

Kılıc, Ö., "Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Yörüngesel Çalkalamanın Mikroyapı ve Mekanik Özelliklere Etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2020).

Koç, F. G., "AA7075 Alüminyum Alaşımına Isıl İşlem Parametrelerinin Endüstriyel Koşullarda Optimizasyonu", Doktora Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli, (2019).

Kopeliovich, D., "Classification of aluminum alloys", *Substances and Technologies Knowledge Source on Metaterials Engineering*, 1-2, (2012).

Kumar, B., and Milton, M. S. PCTIG Welding of 5xxx Aluminium Alloys: A Literature Review. *International Journal of Scientific Research in Science, Engineering and Technology*, 2, 165-167, (2016).

Kurt, M., Kaynak, Y., Bağcı, E., "Evaluation of drilled hole quality in Al 2024 alloy", *Internation journal of Advance Manufacturing Technology*, 37 (11): 1051-1060, (2008).

Kvande, H. 1999. Environmental Improvements in Aluminum Production Technology, *Light Metal Age*, p.44.

Lee, S., Jung, J., Baik, S., Seidman, D., Kim, M., Lee, Y. and Euh, K., "Precipitation strengthening in naturally aged Al–Zn–Mg–Cu alloy", *Materials Science and Engineering: A*, 803, 140719, (2021).

Li X.Z., Hansen V., Gjonnes J. and Wauenberg I.R., "Hrem study and structure modeling of the η_1 phase", the hardening precipitates in commercial Al-Zn-Mg alloys, *Acta Materialia*. 7, 9, 2651-2659, (1999).

Li, J.F., Peng, Z.W., Li, C.X., Jia, Z.Q., Chen, W.J. and Zheng, Z.Q., "Mechanical properties, corrosion behaviors and microstructures of 7075

aluminium alloy with various aging treatments", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 18, 4, 755-762, (2008).

Lin, Y.C., Jiang Yu-Qiang., Chen Xiao-Min., Wen, Dong-Xu., Hua-Min Zhou, "Effect of creep-aging on precipitates of 7075 aluminum alloy", *Materials Science and Engineering A*, 588, 347-356, (2013).

Lipa, S., Kaczmarek, Ł., Stegliński, M., Radziszewska, H., Kyzioł, K. and Kottfer, D., "Effect of core/shell precipitations on fatigue strength of 2024-T6I6 alloy", *International Journal of Fatigue*, 127, 165-174, (2019).

Liu, G., Zhang, G. J., Ding, X. D., Sun, J., and Chen, K.H., "Modeling the strengthening response to aging process of heat-treatable aluminum alloys containing plate/disc-or rod/needle-shaped precipitates", *Materials Science and Engineering*, 344(1-2), 113-124, (2003).

Liu, M., "Investigation of Quenched-in Vacancies in Pure Aluminium and the Precipitation in Al-Zn-Mg Alloys", Master Thesis. *Thesis, University of Bonn* (2010).

Löffler H., Kovacs I., and Lendvai J., "Decomposition processes in Al-Zn-Mg alloys," *Journal of Materials Science*, 18, 8, 2215-2240, (1983).

Löffler, H., Kovacs, I. and Lendvai, J. , "Decomposition processes in Al-Zn-Mg alloys," *Journal of Materials Science*, 18, 8, 2215-2240, (1983).

Lumley, R. N., Polmear, I. J. and Morton, A. J "Interrupted aging and secondary precipitation in aluminium alloys", *Materials Science and Technology*, 19, 11, 1483-1490, (2003).

Lumley, R. N., Polmear, I. J. and Morton, A. J., "Development of mechanical properties during secondary aging in aluminium alloys", *Materials Science and Technology*, 21,9, 1025-1032, (2005).

Lumley, R. P., I. and Morton, Allan., "Temper developments using secondary ageing", *Materials Forum*, 28, 85-95, (2004).

Lumley, R.N. (Ed.), "Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications", *Woodhead Publishing Limited*, Cambridge, UK, (2011).

Lumley, R.N., Morton, A. J., O'Donnell, R. G. and Polmear, I. J., "New heat treatments for age-hardenable aluminum alloys", *Heat Treating Progress*, 5(2), 23-29, (2005).

Lumley, R.N., Polmear I.J, Morton, A.J. International Patent Application, PCT/AU02/00234, (2002).

Lumley, R.N., Polmear, I.J. and Morton, A.J, “Development of mechanical properties during secondary aging in aluminium alloys”, *Materials Science and Technology*, 21,9, 1025-1032, (2005).

Luo, Y., Zhuang, Y., Li, C., Li, S., Bao, G., Wei, T., Sha, S. and Xu, X. "Microstructure and properties of T6I4 aged 700-MPa-grade aluminum alloy", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31, 9839-9849, (2022).

Macchi, C., Somoza, A., Dupasquier, A., and Polmear I. “Secondary precipitation in AlZnMg(Ag) alloys," *Acta Materialia*, 51, 17, 5151-5158, (2003).

Marceau R.K.W., Sha G., Lumley R.N., Ringer S.P., “Evolution Of Solute Clustering In Al–Cu–Mg Alloys During Secondary Ageing”, *Acta Materialia*, 58, 1795–1805, (2010).

Matsuda, K., Uteani, Y. Sato, T. Ikeno, S., Ikeno, “A systematic study of the effect of interrupted ageing conditions on the strength and toughness development of AA6061”, *Materials Science and Engineering: A*, 523, 99-111, (2001).

MatWeb, 2024 aluminum material property data [online], (2023), Web adresi: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=642e240585794f0ab91428aa78c27b4e>

MatWeb, 7075 aluminum material property data [online], (2023), Web adresi: <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9852e9cdc3d4466ea9f111f3f0025c7d>

Mercan, E., “5XXX-6XXX Alüminyum alaşımlarının otomatik mig kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2018).

Merlab, ÖDTÜ., Yüksek Çözünürlüklü Transmisyon Elektron Mikroskobu (RTEM) [online], (2023), Web adresi: <https://merlab.metu.edu.tr/tr/yuksek-cozunurluklu-transmisyon-elektron-mikroskobu-rtem>

Meyveci, A., “Yaşlandırılmış 2XXX ve 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının aşınma davranışlarının incelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2007).

Muskita A.I., History of Aluminium[online], (2023), Web adresi: <https://muskita.com.cy/history-aluminium>, (2021).

Nalçacıoğlu, C., “Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımlarında T6 ısıtılma işlem parametrelerinin elektrik iletkenliği ve korozyon özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2017).

O'Donnell R.G., Lumley R.N. and Polmear I.J., "Observations of deformation in secondary aged aluminium alloys", *Proceedings of the 9th International Conference on Aluminum Alloys*, Brisbane, Australia, 975-979, (2004).

Onaran, K. "Malzeme Bilimi", *Bilim Teknik Yayınevi*, İstanbul, s. 320-321, (2003).

Onat N, "Alüminyum Döküm Teknolojisi", *TÜDÖKSAD*, İstanbul, (2011).

Onur, A., "AA6XXX serisi alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemine bağlı olarak işlenebilirliğinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik, (2014).

Ovalı, İ. "Abrasive wear behavior of various reinforced AA6061 matrix composites produced with hot pressing process: A comparative study" *Materialwissenschaft Und Werkstofftechnik*, 48(6), 589-599, (2017).

Ovalı, İ. ve Kızılkaya, E., "AISI 4140 çeliğine uygulanan endüstriyel kriyojenik işlemin mekanik özellikler üzerindeki etkisi", *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 6 (1), 137-148, (2018).

Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S., and Picu, R. C. "Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy", *Materials and Design*, 31 (2), 972-975, (2010).

Oskouei RH, Barati MR and Ibrahim RN. "Surface Characterizations of Fretting Fatigue Damage in Aluminum Alloy 7075-T6 Clamped Joints: The Beneficial role of Ni-P Coatings. *Materials (Basel)*". 9(3), 141, (2016).

Öcal, M., "T4 ve T6 yaşlandırma işlemleri uygulanmış 2014 alüminyum alaşımının fretting yorulma davranışı üzerine relatif kayma genliğinin etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Erzurum, (2011).

Ölmez, S., "Alüminyum Esaslı Alaşımların Yüksek Sıcaklıkta Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2016).

Öz, Ö., "Yaşlandırma ısı işleminin AA 7075 malzemeli dikdörtgen plağın burkulma yükü üzerine etkisi", Yüksek Lisans Tezi, *Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Zonguldak, (2007).

Özel, Serkan., "Alüminyum Alaşımı Ve Bronzu Yüzeyine Oksit Ve Karbür Bileşiklerinin Plazma Sprey Yöntemiyle Kaplanmasının Araştırılması", Doktora Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, (2009).

Özkavak H. ve Bıçaklı, E., "Tam yoğun ve toz metal aa2024 alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine yaşlandırma işleminin etkisi" Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 6, 650-658, (2018).

Patela, A., Patelb, A., Parmarc, S. and Jadavd, H., "Review on effect of heat treatment on properties of AA 2024", *Special Edition ICRPMSME*, (2022).

PAÜ İLTAM., FESEM cihazı [online] Web adresi: <https://www.pau.edu.tr/iltam/tr/sayfa/feSEM-cihazı> (2023).

Polmear, I. P., "Light Alloys - From Traditional Alloys to Nanocrystals", *Light Alloys*, 2, 273–277, (2006).

Polmear, I., StJohn D., Nie Jian-Feng, Qian Ma, "4 - Wrought Aluminium Alloys", *Light Alloys (Fifth Edition)*, Butterworth-Heinemann, 157-263 (2017).

Porter, D. A., and Easterling, K. E., "Phase transformations in metals and alloys (revised reprint). Ohio", USA: CRC Press, (2009).

Prasad, N. E., Wanhill, R. J. H., "Aerospace Materials and Material Technologies Volume 1: Aerospace Materials", *Springer Science+Business Media*, Singapore, (2017).

Qi, H., Liu, X.Y., Liang, S.X., Zhang, X.L., Cui, H.X., Zheng, L.Y., Gao, F. and Chen, Q.H., "Mechanical properties and corrosion resistance of Al–Cu–Mg–Ag heat-resistant alloy modified by interrupted aging", 657, 318-324, (2016).

R. S. Rana, Rajesh Purohit, and S Das, "Reviews on the Influences of Alloying elements on the Microstructure and Mechanical Properties of Aluminum", *International Journal of Scientific and Research Publications*, 2, (6), (2012).

R.N. Lumley, I.J. Polmear and A.J. Morton, "Development of Properties during Secondary Ageing of Aluminium Alloys", Conference Proceedings Book, Madrid, Spain, *In Materials Science Forum*, 426-432, 303-308, (2003).

R.N. Lumley, I.J. Polmear, A.J. "Morton, International Patent Application", PCT/AU00/01601, (2000).

Reis, D.A.P., Couto, A.A., Domingues J.R., Hirschmann, N.I., Zepka, S., and Neto, C., "Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024", *Defect and Diffusion Forum*, 326–328, 193–198, (2012).

Risanti, D., Yin, M., Chen, J. and Zwaag, S., "The Mechanical Properties of AA2024 as Function of the Interrupted Ageing Conditions", *Materials Science Forum*, 449-454, (2010^a).

Risanti, D., Yin, M., Rivera-Diaz-del-Castillo, P. and Zwaag, S., "A systematic study of the effect of interrupted ageing conditions on the strength and toughness development of AA6061", *Materials Science and Engineering*, 523, 99-111, (2009).

Robert, A., Sielski., "Research needs in aluminum structure" , *Ships and Offshore Structures*, 3:1, 57-65, (2008).

Sheppard, T., "Metallurgical features affecting the extrusion of aluminium alloys", *Extrusion of Aluminium Alloys*, 69-126. (1999).

Smith, A., 'Aluminium–lithium alloys in helicopter airframes', in Aerospace materials", edited Cantor, B., H. Assender and Grant, P., *Institute of Physics Publishing*, Bristol, (2001).

Smith, W.E., Mühendislik Alaşımlarının Yapı ve Özellikleri, (çeviri M. Erdoğan), Demir Dışı Alaşımlar, *Nobel Dağıtım*, (2001).

Soumyajeet, M., Govinda, R.R and Kumar, R.P., "Effects of isothermal and interrupted aging on mechanical properties and corrosion behavior of an Al–Cu–Mg alloy", *Materials and Corrosion*, (2023).

Staszczuk A, Sawicki J, and Adamczyk-Cieslak B., "A study of second-phase precipitates and dispersoid particles in 2024 aluminum alloy after different aging treatments", *Materials*, 12(24), 4168, (2019).

Su, R.M., Jia, Y.X., Xiao, J., long, L.G., Dong, Q.Y. and De, L.R., "Effect of secondary aging on microstructure and properties of cast Al-Cu-Mg alloy", *China Foundry*, 20, 71–77, (2023).

Sunar, T. ve Özyürek, D., "T6 ve Yüksek Sıcaklık Ön-Çökeltme HTPP Isıl İşleminin AA7075 Alüminyum Alaşımının Yüksek Sıcaklıktaki Çekme Özelliklerine Etkilerinin İncelenmesi", *International Journal of Engineering Research and Development* , 12 (2) , 683-692, (2020).

TALSAD "Dünyada Ve Türkiye’de Alüminyum 2020 Yılı Raporu (Özet)"

Tan, E., "Change in the wear characteristics of T6 heat-treated 2024, 6063, and 7075 alloys at different quenching temperatures", *Journal of Materials Engineering and Performance*, 32, 5128-5140, (2023).

Tan, E., " Alüminyum alaşımlarında blister oluşumu", Doktora Tezi, *Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Denizli (2011).

Tan, E., "Severe plastic deformation of age hardenable aluminum alloys", Ph. D. Thesis, *The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University*, Ankara, 7-8 (2012).

Tang, J. G., Chen, H., Zhang, X. M., Liu, S. D., Liu, W. J., Ouyang, H. and Li, H. P., "Influence of Quench-Induced Precipitation on Aging Behavior of Al-Zn-Mg-Cu Alloy", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*, 22(6), 1255–1263, (2012).

Tanrıöver, L., "AA5052/2024 Alaşımlarının Sürtünme Karıştırma Kaynağı Yöntemiyle Birleştirilebilirliğinin Araştırılması" Yüksek Lisans Tezi, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Makine Eğitimi Anabilim Dalı*, Elazığ, (2008).

Tehinse, O. B., "Response of 7050 and 7075 Alloys to High Temperature Pre-Precipitation Heat Treatment, MsC. Thesis, *University of Manitoba*, Winnipeg, Canada. (2014).

Tekin, R., "AA 2014, AA 6082 Alüminyum alaşımlarının oksidasyonu ve mekaniksel özelliklerin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Afyon, (2014).

Threadgill, P. L., Leonard, A. J., Shercliff, H. R., & Withers, "P. J., Friction stir welding of aluminium alloys", *International Materials Reviews*, 54 (2) (2009).

TOKTAS, A., "Sürtünme Karıştırma Kaynak Yönteminin AA 6063 Alüminyum Alaşımına Uygulanması ve Kaynak Parametrelerinin Malzeme iç Yapısı ile Mekanik Özelliklerine Etkisinin incelenmesi" Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, (2006).

Tomruk, S., "Toz Metalürjisi Yöntemi İle Üretilmiş AA2014 Alüminyum Alaşımının Mikroyapısal Karakterizasyonu Ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, (2010).

Totten, G., MacKenzie, D., "Handbook of aluminum: physical metallurgy and processes", (Vol. 1). Marcel Dekker, (2003).

TS EN ISO 7438, Metallic Materials - Bend Test, Türk Standartları Enstitüsü, (2021).

Tsai, J.M., "Study of interrupted aging in Al-Cu-Mg alloys", master's thesis, *Colorado School of Mines*, Colorado, (2013).

TUA., Türkiye Uzay Ajansı uzay teknolojileri projeler [online], (2023), Web adresi: <https://tua.gov.tr/tr/projeler>

Tufan, M., "AA6082 Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısı işleminin işlenebilirliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, (2011).

Uludağ, M., “Al-Si Alaşımlarında Bifilmelerin Sıcak Yırtılmaya Etkisi”, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi, *Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı*, Konya, (2016).

Wang, D., Ni D., and Ma, Z., “Effect of pre-strain and two-step aging on microstructure and stress corrosion cracking of 7050 alloy,” *Materials Science and Engineering: A*, 494, 1-2, 360-366, (2008).

Wang, H., Yi, D., Liu, H., and Wang, B., “Microstructure and mechanical properties of interrupted aged cast Al–4.5 Cu–3.5 Zn–0.5 Mg alloy”, *Materials Letters*, 285, 129199. (2021).

Wang, Y. and Jiang, Z., "Dynamic compressive behavior of selected aluminum alloy at low temperature" *Materials Science and Engineering:A*, 553, 176-180, (2012).

Wikipedia, TUA., Türkiye Uzay Ajansı [online], (2023), Web adresi:https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye_Uzay_Ajansı

Xing, M., Wang, Y. and Jiang, Z., "Dynamic fracture behaviors of selected aluminum alloys under three-point bending", *Defence Technology*, 9, 193-200, (2013).

Xu, X., Deng, Y., Shuiqing, C. and Xiaobin, G., "Effect of interrupted ageing treatment on the mechanical properties and intergranular corrosion behavior of Al-Mg-Si alloys", *Journal of Materials Research and Technology*, 9, 230-241, (2020).

Yeşilay, C., Yüzey pürüzlülüğü ölçümü [online], (2023), Web adresi: <https://www.kuark.org/2017/10/yuzey-puruzluluk-olcumu/>

Yıldırım, H., “ Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, (2006).

Yin, M., Risanti, D., Chen, J. and Zwaag, S., "A TEP study on the microstructural development in AA2024 during interrupted ageing", *Advanced Materials Research*, 89-91, 669-674, (2010).

Yüksel, M. Meran C., “Malzeme bilgisi”, TMMOB Makine Mühendisleri Odası, Yayın No: MMO/545/3, ISBN:978-605-101-0017-4, (2021).

Zhan, L., Lin, J., Dean, T. A., and Huang, M. “Experimental studies and constitutive modelling of the hardening of aluminium alloy 7055 under creep age forming conditions”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 53(8), 595-605, (2011).

Zhang, P., Gao, Y., Wang, S., Liu, Z., Lin, Z., Zhang, S. and Yue, X., “Effect of T614 and T616 on the machinability of 7075 aluminum alloy and tool wear mechanism”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 1-19, (2023).

Zhihui, L., Baiqing, X., Yogan Z., Baphong, Z., Feng W. And Hongwei L., “Aging behavior of an Al-Zn-Mg-Cu alloy pre-stretched thick plate”, *Journal of University of Science and Technology Beijing*, 14, 3- 246, (2007).

