



**YAŞLANDIRILAN AA 2024 ALÜMİNYUM
ALAŞIMININ SOĞUK, ILIK VE SICAK
DEFORMASYON KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

Atacan COŞKUN

**2020
YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ**

**YAŞLANDIRILAN AA 2024 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SOĞUK, ILIK VE
SICAK DEFORMASYON KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ**

Atacan COŞKUN

**T.C.
Karabük Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında
Yüksek Lisans Tezi
Olarak Hazırlanmıştır**

**Tez Danışmanı
Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ**

**KARABÜK
Haziran 2020**

Atacan COŞKUN tarafından hazırlanan “YAŞLANDIRILAN AA 2024 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SOĞUK, ILIK VE SICAK DEFORMASYON KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ” başlıklı bu tezin Yüksek Lisans Tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

.....

Tez Danışmanı, İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği ile İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir. 11/06/2020

Ünvanı, Adı SOYADI (Kurumu)

İmzası

Başkan : Prof. Dr. Şükrü TALAŞ (AKÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ (KBÜ)

.....

Üye : Prof. Dr. Ramazan KAÇAR (KBÜ)

.....

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

Prof. Dr. Hasan SOLMAZ

.....

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Müdürü



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

Atacan COŞKUN

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

YAŞLANDIRILAN AA 2024 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ SOĞUK, ILIK VE SICAK DEFORMASYON KABİLİYETİNİN İNCELENMESİ

Atacan COŞKUN

Karabük Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı:

Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

Haziran 2020, 108 sayfa

Bu çalışmada, AA 2024 alüminyum alaşımının soğuk, ılık ve sıcak deformasyon kabiliyeti temin edildiği şekliyle ana malzeme, solüsyona alma, yaşlandırma ve aşırı yaşlandırma şartları için araştırılmıştır. AA 2024 alüminyum alaşımından elde edilen numuneler 520°C’de 2 saat solüsyona alma ısıtma işlemi sonrası suda soğutulmuş ve ardından 190°C’de farklı yaşlandırma sürelerine tabi tutulmuştur. Yaşlandırılan numuneler üzerinde yapılan mikroyapı ve sertlik ölçümleri sonucunda optimum yaşlanma zamanı 24 saat ve aşırı yaşlanma zamanı 72 saat olarak belirlenmiştir. Çekme deneyleri 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C sıcaklıklarında ve $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında gerçekleştirilmiştir. Çekme deneyi sonrası gerilme-uzama diyagramları elde edilerek, bu diyagramlardan farklı sıcaklıklarda çekme deneyine tabi tutulan her numunenin maksimum çekme dayanımı, akma dayanımı (% 0,2), yüzde uzama (%) ve çalışma sertleşmesi oranı (δy) tespit edilmiştir. Sonuçlar solüsyona alınan numunelerde ılık ve sıcak deformasyon sırasında dinamik

Çökelmenin meydana geldiğini ve akma dayanımının arttığını göstermiştir. En fazla çökelme sertleşmesi $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında 150°C ve 250°C sıcaklıklarda test edilen numunelerde gözlenmiştir.

Anahtar Sözcükler : AA 2024 Alüminyum alaşımı, soğuk-ılık-sıcak deformasyon, mekanik özellikler

Bilim Kodu : 91514



ABSTRACT

M. Sc. Thesis

INVESTIGATION OF COLD, WARM AND HOT DEFORMATION ABILITY OF AGED AA 2024 ALUMINUM ALLOY

Atacan COŞKUN

Karabük University

Institute of Graduate Programs

Department of Manufacturing Engineering

Thesis Advisor:

Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ

June 2020, 108 pages

In this study, the cold, warm and hot deformation ability of AA 2024 aluminum alloy was investigated for as-received, solution heat treated, aged and overaged conditions. Samples obtained from AA 2024 aluminum alloy were cooled in water after 2 hours solution heat treatment at 520°C and then subjected to different aging times at 190°C. As a result of microstructure and hardness analyses which were carried on aged samples, optimum aging time and overaging time was determined as 24 hours and 72 hours respectively. Tensile tests were performed at temperatures of 25°C, 150°C, 250°C and 350°C and a strain rate of $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. After tensile test, stress-strain diagrams were obtained and maximum tensile strength, yield strength (% 0,2), elongation (%) and work hardening rate (δy) of each sample tested at different temperatures were determined. The results showed that dynamic precipitation occurred during warm and hot deformation in solution heat treated sample and yield strength increased. The maximum precipitation hardening was observed after testing

at temperatures of 150°C and 250°C for the strain rate of $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$.

Key Word : AA 2024 Aluminum alloy, cold-warm-hot deformation, mechanical properties

Science Code : 91514



TEŞEKKÜR

Bu yüksek lisans tez çalışmasının planlanması, araştırılmasında ve yürütülmesinde ilgi ve desteğini esirgemeyen, engin bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım sayın hocam Prof. Dr. Süleyman GÜNDÜZ'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarda desteklerini esirgemeyen Araştırma Görevlisi Demet TAŞTEMÜR'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu proje KBÜ-BAP-18-YL-161'nolu proje kapsamında desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı Karabük Üniversitesi BAP Koordinatörlüğüne teşekkürlerimi sunarım. Deneysel çalışmalarımı gerçekleştirirken imkân ve desteklerini benden esirgemeyen Teknoloji Fakültesi, İmalat Mühendisliği Bölüm Başkanlığına ve çalışanlarına teşekkür ederim.

Her zaman yanımda olan desteklerini esirgemeyen canım aileme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
KABUL	ii
ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xviii
BÖLÜM 1	1
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2	3
ALÜMİNYUM	3
2.1. ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİ	3
2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI	4
2.2.1. Alüminyum Alaşımlarının Kodlandırılması	4
2.2.2. Alüminyum Döküm Alaşımları	5
2.2.3. Alüminyum Dövme Alaşımları	5
2.2.3.1. 1xxx Serisi	6
2.2.3.2. 2xxx Serisi	6
2.2.3.3. 3xxx Serisi	6
2.2.3.4. 4xxx Serisi	7
2.2.3.5. 5xxx Serisi	7
2.2.3.6. 6xxx Serisi	7
2.2.3.7. 7xxx Serisi	7
2.2.3.8. 8xxx Serisi	8
2.3. ALÜMİNYUMA ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ	8

Sayfa

2.3.1. Bakırın Etkisi	8
2.3.2. Silisyumun Etkisi	8
2.3.3. Magnezyumun Etkisi	9
2.3.4. Manganın Etkisi	9
2.3.5. Çinkonun Etkisi	9
2.3.6. Titanyumun Etkisi	9
2.3.7. Demirin Etkisi	10
 BÖLÜM 3	 11
ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ISIL İŞLEMLERİ	11
3.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ TEMPER KODLARI	11
3.2. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ	11
3.2.1. Solüsyona Alma	12
3.2.2. Su Verme	13
3.2.3. Yaşlanma	14
3.2.3.1. Statik Deformasyon Yaşlanması	17
3.2.3.2. Dinamik Deformasyon Yaşlanması	19
 BÖLÜM 4	 21
PLASTİK DEFORMASYON	21
4.1. PLASTİK DEFORMASYON MEKANİZMALARI	21
4.1.1. Kayma	21
4.1.2. İkizlenme	22
4.1.3. Tane Sınırı Kayması	22
4.1.4. Yayınma Sürünmesi	23
4.2. PLASTİK DEFORMASYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER	23
4.2.1. Malzeme Yapısı	23
4.2.2. Mekanik Özellikler	24
4.2.3. Deformasyon Hızı	25
4.2.4. Sıcaklık	26
4.2.5. Sürtünme ve Yağlama	31
4.2.6. Hidrostatik Basınç	31

4.2.7. Kalıntı Gerilmeler	31
4.2.8. Geometrik Faktörler	32
 BÖLÜM 5	 33
DENEYSEL ÇALIŞMALAR	33
5.1. KULLANILAN MALZEME	33
5.2. SOLÜSYONA ALMA VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ	33
5.3. SERTLİK DENEYİ.....	34
5.4. ÇEKME DENEYİ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI	34
5.5. ÇEKME DENEYİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ	35
5.6. OPTİK MİKROYAPI İNCELEMELERİ	36
5.7. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ	36
 BÖLÜM 6	 38
DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	38
6.1. ÖN ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	38
6.1.1. Ana Malzeme, Solüsyona Alınan ve Yaşlanan Numunelerin Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi	38
6.1.2. Ana Malzeme, Solüsyona Alınan ve Yaşlanan Numunelerin Mikroyapı Görüntülerinin Değerlendirilmesi	39
6.2. ANA MALZEME, SOLÜSYONA ALINAN, YAŞLANAN VE AŞIRI YAŞLANAN NUMUNELERİN ÇEKME DENEYİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ.....	41
6.2.1. Ana Malzemenin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	41
6.2.2. Solüsyona Alınan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	43
6.2.3. Yaşlanan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	45
6.2.4. Aşırı Yaşlanan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi	47
6.2.5. Ana Malzeme, Solüsyona Alınan, Yaşlanan ve Aşırı Yaşlanan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi	48
6.3. SEM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ	52
6.3.1. SEM Mikroyapı Görüntülerinin Değerlendirilmesi.....	52
6.3.2. SEM Kırık Yüzey Görüntülerinin Değerlendirilmesi	73

	<u>Sayfa</u>
BÖLÜM 7	93
GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	93
7.1. GENEL SONUÇLAR	93
7.2. ÖNERİLER	95
 KAYNAKLAR	 96
ÖZGEÇMİŞ	108



ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 3.1. Yaşlandırma ısı işlemleri kademeleri.	12
Şekil 3.2. Yaşlandırma işleminde çökeltilerde meydana gelen oluşumlar; a) aşırı doymuş katı çözelti, b) matrisle uyumlu katı çökelti ve c) matrisle uyumsuz kararlı çökelti durumu.....	14
Şekil 3.3. % 4 bakır içeren alüminyum alaşımının akma mukavemetindeki değişim.	16
Şekil 3.4. Yaşlandırma ısı işleminin fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi.....	17
Şekil 3.5. Statik deformasyon yaşlanmasının şematik gösterimi.	18
Şekil 3.6. Gerilme-uzama eğrisinde görülen zig-zag tipleri.....	19
Şekil 3.7. Dinamik yaşlanmanın mekanik özelliklere etkisi.	20
Şekil 4.1. Deformasyon hızının gerilme-uzama eğrisine etkisi.....	25
Şekil 4.2. Sıcaklığın deformasyon hızına etkisi.	25
Şekil 4.3. Farklı kafes yapısına sahip malzemelerde deformasyon hızının mukavemete etkisi.....	26
Şekil 4.4. Sıcaklığın mekanik özelliklere etkisi.	27
Şekil 4.5. Farklı kafes yapısına sahip metallerde σ/E değerinin değişimi.....	27
Şekil 4.6. Kırılma tipleri; a) transgranüler ve b) intergranüler kırılma.	28
Şekil 4.7. Soğuk deformasyon işleminin mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi.	29
Şekil 4.8. İstif hatası enerjisinin ve deformasyon miktarının dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmeye etkisi.	30
Şekil 5.1. Sertlik cihazı.....	34
Şekil 5.2. Çekme deneyi numunesi; a) teknik resmi ve b) son hali.	35
Şekil 5.3. Çekme cihazı.	36
Şekil 5.4. SEM mikroskobu.	37
Şekil 6.1. Ana malzeme, 520°C’de solüsyona alınan ve 190°C’de farklı sürelerde yaşlanan numunelerin sertlik sonuçları.	39
Şekil 6.2. Mikroyapı görüntüleri; a) ana malzeme, b) solüsyona alınan, c) 24 saat yaşlanan ve d) 72 saat yaşlanan numuneler.	40
Şekil 6.3. Ana malzemenin gerilme-uzama diyagramları.	43
Şekil 6.4. Solüsyona alınan numunelerin gerilme-uzama diyagramları.....	45
Şekil 6.5. Yaşlanan numunenin gerilme-uzama diyagramları.	46

Şekil 6.6. Aşırı yaşlanan numunelerin gerilme-uzama diyagramları.	48
Şekil 6.7. Ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çekme deneyi sonuçları; a) % 0,2 akma dayanımı, b) çekme dayanımı ve c) yüzde uzama değerleri.	49
Şekil 6.8. Ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çalışma sertleşmesi oranının test sıcaklığına bağlı olarak değişimi.	52
Şekil 6.9. 25°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve çizgi EDS analizi.	54
Şekil 6.10. 150°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.	55
Şekil 6.11. 250°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.	56
Şekil 6.12. 350°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.	57
Şekil 6.13. 25°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.	59
Şekil 6.14. 150°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	60
Şekil 6.15. 250°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.	61
Şekil 6.16. 350°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	62
Şekil 6.17. 25°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	64
Şekil 6.18. 150°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	65
Şekil 6.19. 250°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	66
Şekil 6.20. 350°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	67
Şekil 6.21. 25°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	69

Şekil 6.22. 150°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	70
Şekil 6.23. 250°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	71
Şekil 6.24. 350°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.	72
Şekil 6.25. 25°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	74
Şekil 6.26. 150°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	75
Şekil 6.27. 250°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	76
Şekil 6.28. 350°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	77
Şekil 6.29. 25°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	79
Şekil 6.30. 150°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	80
Şekil 6.31. 250°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	81
Şekil 6.32. 350°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	82
Şekil 6.33. 25°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	84
Şekil 6.34. 150°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	85
Şekil 6.35. 250°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	86
Şekil 6.36. 350°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	87

Şekil 6.37. 25°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	89
Şekil 6.38. 150°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	90
Şekil 6.39. 250°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	91
Şekil 6.40. 350°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütme-lerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.	92

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması.	5
Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımlarının temper kodları.	11
Çizelge 4.1. Çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler ve etkileri.	24
Çizelge 5.1. AA 2024 alaşımı ana malzemenin kimyasal kompozisyonu.	33
Çizelge 6.1. Ana malzemenin çekme testi sonuçları.	42
Çizelge 6.2. Solüsyona alınan numunelerin çekme testi sonuçları.	44
Çizelge 6.3. Yaşlanan numunelerin çekme testi sonuçları.....	46
Çizelge 6.4. Aşırı yaşlanan numunelerin çekme testi sonuçları.....	47

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

SİMGELER

Al	: alüminyum
Cr	: krom
Cu	: bakır
E	: elastikiyet modülü
Fe	: demir
g	: gram
Mg	: magnezyum
ml	: mililitre
mm	: milimetre
MPa	: mega paskal
nm	: nanometre
s	: saniye
Si	: silisyum
T	: deformasyon sıcaklığı
Ti	: titanyum
T _m	: ergime sıcaklığı
%	: yüzde
σ	: gerilme
°C	: santigrat derece
δy	: çalışma sertleşmesi oranı
μm	: mikrometre

KISALTMALAR

AA	: Alüminyum Alaşımı
ASA	: Aluminium Standard Association (Alüminyum Standartları Birliği)
EDS	: Energy Dispersive Spectrometry (Enerji Dağılım Spektrometresi)
EN	: European Norm (Avrupa Normu)
GP	: Guinier-Preston
GPB	: Guinier-Preston-Bagaryatsky
HMK	: Hacim Merkez Kübik
HV	: Hardness Vickers (Vickers Sertliği)
ISO	: International Standardization Organization (Uluslararası Standartlar Birliği)
PLC	: Portevin Le Chatelier
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPH	: Sıkı Paket Hegzagonal
TS	: Türk Standartı
YMK	: Yüzey Merkez Kübik

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Alüminyum 2024 alaşımının düşük yoğunluğu, yüksek mukavemeti ve yüksek şekillendirilebilirliği bu alaşımın askeri, otomotiv, havacılık ve uzay sanayisinde hafif yapısal metallere olan ihtiyaçları karşılamak amacıyla geniş bir kullanım alanına sahip olmasına neden olmaktadır. Bu yüksek mukavemet özellikleri alaşımın kimyasal bileşimi ve çökelme sertleşmesiyle meydana gelen ikinci faz çökeltilerin homojenliği ve sayısına bağlıdır. Alaşımın ortaya çıkan mikroyapısını ve çökelti parçacıklarının kimyasal bileşimlerini analiz etmek için çeşitli araştırmalar yapılmaktadır. AA 2024 alaşımı genellikle solüsyona alma ısıl işlemi ve su verme işlemi sonrasında yapılan yaşlandırma işlemiyle meydana gelen çökeltilerle güçlenmektedir [1-13].

İmalat, askeri ve ulaşım endüstrileri dahil olmak üzere birçok mühendislik disiplinlerinde malzemelerin plastik deformasyonu işlemine ilgi duyulmaktadır. Plastik deformasyon işlemi malzeme özelliklerinde önemli bir etkiye sahip olan çökelti parçacıklarının kinetiğini etkilemektedir. Alaşımların mekanik özellikleri, alaşıma çözeltiye alma veya yaşlanma işlemi uygulandığında çökelti parçacıkların morfolojisinden etkilenmektedir. Sonuçlar, yüksek deformasyon sıcaklığında oluşan çökeltilerin büyümesine bağlı olarak alaşımların daha düşük mukavemet sergilediğini göstermiştir. Bununla birlikte çözeltiye alma işlemi görmüş alaşımlar, dinamik çökelme sertleşmesi sebebiyle yüksek dislokasyon yoğunluğuna bağlı olarak daha yüksek mukavemet sergilemektedirler [14-17].

Alüminyum alaşımları ile ilgili yapılan araştırmalar, plastik deformasyon işlemi ile mekanik özellikler arasında büyük bir ilişki olduğunu göstermektedir. Yapı restorasyonu, alüminyum alaşımlarının yüksek sıcaklıkta deformasyon sırasında meydana gelmektedir. Yapılan çalışmaların çoğunda alüminyum alaşımlarında yapı

restorasyonunun ana sürecinin dinamik toparlanma mekanizmasının olduğu belirtilmiştir [18,19]. Zhao ve Lampman [20], 2024-T3 alüminyum alaşımının yüksek sıcaklıkta çekme davranışını araştırmıştır. Sıcaklık arttıkça sünekliğin arttığını fakat mukavemetin azaldığını gözlemlemişlerdir. Bu olaylar, yüksek sıcaklıkta meydana gelen çökelti oluşumu ve kabalaşması sonucunda dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmeye atfedilmiştir.

Literatürde AA 2024 alaşımlarında çökelti sertleşmesinin araştırılmasıyla ilgili birçok çalışma yapılmasına rağmen, günümüzde AA 2024 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerini etkileyen optimum yaşlanma sıcaklığı ve zamanını bulma adına çalışmaların yapılmasına ihtiyaç vardır. Bu çalışmanın amacı, AA 2024 alüminyum alaşımının soğuk, ılık ve sıcak deformasyon davranışına solüsyona alma ve yaşlandırma işleminin etkisini detaylı olarak araştırmaktır. Bu nedenle dinamik ve statik çökelti oluşumunu birbiri ile karşılaştırmak için ısıtma işlem ve termomekanik işlemler farklı koşullar altında uygulanmıştır. Farklı sıcaklıklarda plastik deformasyon uygulanan ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin mikroyapısal ve mekanik özellikleri birbiriyle karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

BÖLÜM 2

ALÜMİNYUM

2.1. ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİ

Alüminyum doğada en çok bulunan üçüncü element ve demirden sonra en çok kullanılan metaldir. Alüminyumun en önemli özelliği hafifliği ve alaşımlandırma işlemiyle mukavemetinin artırılması sayesinde havacılık, otomotiv ve savunma sanayisinde yaygın olarak kullanılmasıdır. Bunun yanında korozyona karşı direnci, kolay şekillenmesi, ısı ve elektrik iletkenliğide diğer avantajlarıdır [21-25].

Fiziksel özellik: Düşük yoğunluğa sahip olması nedeniyle birçok sektörde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum yaklaşık olarak bir çeliğin üçte biri ağırlığa sahiptir. Bazı uygulamalarda hafif olması önemli bir avantajken saf alüminyumun mukavemetinin düşük olması dezavantajdır. Alaşımlama işlemiyle birlikte yüksek dayanıma sahip olması havacılık endüstrisinde kullanılmasına olanak sağlamaktadır. Isı ve elektrik iletkenliği oldukça iyidir. Isı iletkenliği yaklaşık çeliğin altı katıdır. Elektrik iletkenliği ağırlığa kıyasla bakırdan daha iyidir. Işığı % 80 oranında yansıtabilmesi de bir diğer avantajdır [24-32].

Kimyasal özellik: Alüminyumun kimyasal tepkimeye girme isteğinin yüksek olması nedeniyle doğada saf halde bulunmamaktadır. Üretim işlemi alüminyum silikat ve demir oksitten oluşan boksit cevherinden gerçekleştirilmektedir. Alüminyum hava ile temas eden yüzeylerinde meydana gelen oksit tabakası atmosfer tesirlerine karşı yüksek bir mukavemet sergilemektedir. Oksijen ile tepkimeye girme isteği vanadyum, baryum, lityum ve krom gibi metal oksitleri indirgeyerek üretilmelerine olanak sağlamaktadır. Alüminyumun zehirleyici özelliği olmaması gıda sektöründe malzemelerin paketlenmesinde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [30-34].

Mekanik özellikleri: Alüminyum alaşımlarına bakır, magnezyum, çinko ve silisyum gibi elementlerin ilavesi ve ısıt işlemlerin uygulanması mekanik özelliklerin geliştirilmesine katkı sağlamaktadır. Kolayca şekillendirilme özelliği sayesinde haddeleme, çekme, bükme ve presleme işlemleriyle çeşitli biçimlerde üretim sağlanmaktadır [28,29,31-35].

2.2. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI

Alüminyum sahip olduğu birçok özelliklerle mühendislik alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Saf alüminyumun mukavemetinin düşük olması kullanım alanlarını kısıtlamaktadır ve mukavemetin yüksek olması istenilmektedir. Alüminyuma deformasyon ile alaşım elementlerinin ilavesi ve ısıt işlem gibi uygulamalarla yüksek mukavemet sağlanmaktadır [24,29,31,32,36].

Alüminyum alaşımlarının yüksek dayanımı ve hafifliği ağırlığın önemli olduğu üretimlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek gerilim hatlarında elektrik iletkenliğinin iyi olması sebebiyle bakırın yerine kullanılmaktadır [21,22,26,34].

Alüminyum alaşımlarının hafifliği, mekanik özelliklerinin geliştirilebilirliği, korozyona karşı direnci, iyi elektrik ve ısı iletkenliği, kolay şekillenmesi ve ekonomik olması havacılık, otomotiv ve savunma sanayilerinde oldukça geniş bir kullanım alanı bulmasına neden olmaktadır [22,32,34,37].

2.2.1. Alüminyum Alaşımlarının Kodlandırılması

Alüminyum alaşımları Alüminyum Standartları Birliği (ASA) tarafından belirlenen standartlara göre üretim metoduna göre döküm ve dövme alüminyum alaşımları olmak üzere iki ayrı gruba ayrılmaktadır. Bunlar kendi içerisinde ısıt işlem uygulanabilenler ve uygulanamayanlar olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Plastik şekillendirme yöntemiyle üretilen dövme alüminyum alaşımları döküm alaşımlarına göre farklı bir mikroyapıya ve kimyasal bileşime sahiptirler [27,29,31,35,38]. Çizelge 2.1’de alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması gösterilmektedir.

Çizelge 2.1. Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılması [34].

Döküm Alüminyum Alaşımları		
Alaşım Serisi	Ana Alaşım Elementi	Isıl İşlem Durumu
1XX.X	Saf Alüminyum (Al)	Uygulanamaz
2XX.X	Bakır (Cu)	Uygulanabilir
3XX.X	Silisyum (Si) + Bakır (Cu) veya Magnezyum (Mg)	Uygulanabilir
4XX.X	Silisyum (Si)	Uygulanabilir
5XX.X	Magnezyum (Mg)	Uygulanamaz
6XX.X	Kullanılmayan Seri	-
7XX.X	Çinko (Zn)	Uygulanabilir
8XX.X	Kalay (Sn)	Uygulanamaz
Dövme Alüminyum Alaşımları		
Alaşım Serisi	Ana Alaşım Elementi	Isıl İşlem Durumu
1XXX	Saf Alüminyum	Uygulanamaz
2XXX	Bakır (Cu)	Uygulanabilir
3XXX	Mangan (Mn)	Uygulanamaz
4XXX	Silisyum (Si)	Uygulanamaz
5XXX	Magnezyum (Mg)	Uygulanamaz
6XXX	Magnezyum ve Silisyum	Uygulanabilir
7XXX	Çinko (Zn)	Uygulanabilir
8XXX	Lityum (Li)	Uygulanabilir

2.2.2. Alüminyum Döküm Alaşımları

ASA'ya göre döküm alaşımlarında dört rakamlı bir kodlama sistemi uygulanmaktadır. Ancak üç rakamdan sonra nokta ile ayrılmıştır. Bu sistemde birinci rakam alaşımın grubunu temsil eder. İkinci ve üçüncü rakamlar 1xxx serisi alaşımlarda alüminyumun % 99,00 oranının virgülden sonraki değerini belirlemede kullanılmaktadır. Dördüncü rakam ise ürünün şeklini belirtmektedir. 0 (döküm), 1 (ingot) ve 2 (modifiye işlemi görmüş ingot) olduğunu simgelemektedir [27,29,30,35,39].

2.2.3. Alüminyum Dövme Alaşımları

Alüminyum dövme alaşımlarında ASA tarafından belirlenen dört haneli sayısal kodlama sistemi uygulanmaktadır. Birinci rakam hangi alaşım elementi grubuna dahil olduğunu belirtmektedir. İkinci rakam sıfır ise alaşımın orijinal olduğunu eğer başka bir rakam varsa alaşımın modifiyeli olduğunu belirtmektedir. Son iki rakam ise 1xxx serisinde alüminyumun % 99,00 virgülden sonraki kısmını belirtmekte kullanılır [21,29,34,35,39,40].

2.2.3.1. 1xxx Serisi

Bu seri saf alüminyum sersidir ve içeriğinde en az % 99 alüminyum içermektedir. Korozyona karşı dirençleri, elektrik iletkenlikleri ve şekillendirilmesi oldukça iyidir. Bu serinin son iki rakamları ise, % 99 değerinin virgülden sonraki kısmını belirlemede kullanılmaktadır. Örneğin, 1100 malzemesinin alüminyum oranı % 99, 1050 malzemesinin alüminyum oranı % 99,50 ve 1070 alüminyum malzemesinin ise % 99,70 alüminyum içerdiğini göstermektedir. Kimya ve elektrik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır [33,41].

2.2.3.2. 2xxx Serisi

Bu serinin ana alaşım elementi bakır olmakla birlikte magnezyumda içermektedir. Havacılık endüstrisinde düşük yoğunluk ve yüksek mukavemete sahip olmasından dolayı yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu serideki alaşımlar çökelme sertleşmesi işlemi uygulanabilen ilk alaşımlardandır. Çökelme sertleşmesi uygulanan ilk alaşım 2017 alaşımıdır. Bu seriye magnezyum ilavesi çökelme sertleşmesi mekanizmasını hızlandırır ve mukavemeti artırmaktadır. Bakırın % 12'ye kadar oranı dayanımı yükseltmekte fakat daha fazla oranı malzemenin gevrek bir yapı sergilemesine sebep olmaktadır. Bu serinin en yoğun kullanılmakta olan alaşımı 2024 alüminyum alaşımıdır. Bu alaşımda % 4,5 bakır, % 1,5 magnezyum ve % 0,6 oranında mangan bulundurmaktadır ve çekme mukavemeti 442 MPa'dır [23,38,42].

2.2.3.3. 3xxx Serisi

Bu serinin ana alaşım elementi mangandır. Mimari, boru imalatında ve sıvı tankerlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alaşımın mukavemetini % 1,2 oranında manganın ilavesi artırmaktadır. Bu seride yaygın olarak kullanılan 3003, 3004 ve 3105 alaşımlarının işlenebilme kabiliyeti ve korozyon direnci yüksek olması sebebiyle mimari uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır [43,44].

2.2.3.4. 4xxx Serisi

Bu serinin ana alaşım elementi silisyumdur. Düşük ısı genleşme katsayısı, korozyon direnci ve aşınma mukavemeti yüksek alaşımdır. Bu alaşımda silisyum ilavesi ergime noktasını düşürmekle birlikte lehimleme ve kaynak kabiliyetini artırmaktadır. Silisyum alaşımın akıcılığını artırarak karmaşık şekilli parçaların döküm yöntemiyle üretilmesine olanak sağlamaktadır. Kaynak dolgu teli olarak 4043 alaşımı yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek silisyum oranına sahip dökümler vites kutularında ve motor bloklarında ayrıca nikel gibi alaşım elementlerinin ilavesiyle piston imalatında da yaygın olarak kullanılmaktadır [29,43,45].

2.2.3.5. 5xxx Serisi

Bu serinin ana alaşım elementi magnezyumdur. Magnezyum oranının artmasıyla birlikte mukavemeti ve sertliğı artmakta fakat süneklikte azalma meydana gelmektedir. Denizcilik ve petrol endüstrisinde deniz suyuna karşı yüksek korozyon direncine sahip olması bu endüstrilerde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır [37,38,45].

2.2.3.6. 6xxx Serisi

Bu serinin ana alaşım elementi silisyum ve magnezyumdur. Yüksek deformasyon kabiliyetine sahip olması ekstrüzyon ile üretim işleminde yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Bu seri alaşımlarda magnezyum ve silisyum ilavesi çökelme sertleşmesiyle (Mg_2Si çökeltisiyle) mukavemet artışını sağlamaktadır [29].

2.2.3.7. 7xxx Serisi

Bu serinin ana alaşım elementi çinko olmakla beraber magnezyum, zirkonyum ve krom gibi alaşım elementlerini de içermektedir. Bu seri alaşımları diğeri seri alaşımlarından daha yüksek mukavemete sahiptir. Yüksek mukavemete sahip uygulamalarda havacılık ve askeri alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Korozyon direnci düşüktür [45-47].

2.2.3.8. 8xxx Serisi

Bu serinin ana alaşım elementi lityum olarak bilinmekte ve kalay elementi eklenebilmektedir. Havacılık ve uzay sanayisinde yüksek tokluk ve yorulma direncine sahip olması yaygın olarak kullanılmasını sağlamaktadır. Diğer alaşım serilerine göre maliyeti daha yüksektir [33,34,45,47].

2.3. ALÜMİNYUMA ALAşIM ELEMENTLERİNİN ETKİSİ

Saf alüminyum önemli özelliklere sahip olmasına rağmen düşük mukavemeti dezavantajıdır. Alüminyumun alaşımlandırma işlemiyle mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Alüminyum alaşımlarının özellikleri mikroyapı ve mekanik özellikleri alaşım elementlerinin oranlarına bağlı olarak değişmektedir. Başlıca alaşım elementleri bakır, magnezyum, çinko, silisyum, demir, titanyum ve mangandır [21,26,27,33,35,42,48,49].

2.3.1. Bakırın Etkisi

Bakır alaşım elementi olarak alüminyumla birlikte kullanılan ilk elementtir. Bakır döküm alaşımlarında en fazla % 12 oranında kullanılır ve mukavemeti artırır. % 12’den fazla bakır oranı malzemede gevreklik oluşturur. Dövme alaşımlarında ise % 3-5 arasında bakır oranı bulunur ve % 5’den fazlası malzemenin işlenebilirliğini düşürür. Ayrıca bakır korozyona karşı direnci ve elektrik iletkenliğini düşürmektedir. Alüminyum içerisinde bakırın çözünürlüğü sıcaklığa bağlı olarak artmaktadır ve çökelme sertleşmesi işlemiyle mukavemetin artırılmasına katkı sağlamaktadır [19].

2.3.2. Silisyumun Etkisi

Silisyum miktarı, alaşımın kaynak kabiliyetini, akıcılık ve korozyon direnci gibi özelliklerini geliştirmektedir. Aynı zamanda modifikasyon ve tane boyutu küçültme işlemleriyle iyi şekillendirilebilme kabiliyeti sağlanmış olur. Alaşımın bileşimine ve mikroyapısına bağlı olarak mekanik özellikler iyileştirilmektedir. Al-Si ötektiği ve yuvarlak ve küçük şekle sahip keltirler mukavemetin artmasına katkı

sağlamaktadır. İğne şekline sahip Al-Si ötektiği malzemenin mukavemetini arttırmasına rağmen şekil alabilme kabiliyetini, yorulma ve darbe direncini düşürmektedir [34,35,42,50].

2.3.3. Magnezyumun Etkisi

Magnezyum alüminyum alaşımlarında sünekliğe, kaynak edilebilirliğe, yüksek korozyon direncine ve yüksek mukavemete katkı sağlamaktadır. Magnezyum dövme alaşımlarında % 1-6 arasında bulunması şekil alabilme ve haddeleme kabiliyetini iyileştirmektedir [42].

2.3.4. Manganın Etkisi

Mangan demirle birlikte dökülebilirliği ve metaller arası bileşiklerin özelliklerinin değiştirilmesine katkı sağlamaktadır. Alaşımların işlenebilirliğini ve tokluğunu arttırmakta pozitif yönde etkilemektedir. % 1,2 oranında mangan alaşım yapısında çökelti sertleşmesi işlemiyle mukavemetin artmasına katkı sağlamaktadır. Alaşımlarda demirin olumsuz etkileri mangan ile giderilmektedir. Manganın alaşımlarda bulunması, ince partiküllü (Mn, Fe) Al₆ intermetaliklerinin oluşmasını sağlayarak demir içerikli kaba çökeltilerin oluşmasını engellemektedir [42].

2.3.5. Çinkonun Etkisi

Çinkonun alüminyuma ilavesi alaşımların hadde edilebilirliğini ve mukavemetini arttırmaktadır. Bakır ilavesiyle çinkonun sıcak yırtılmaya etkisi giderilmektedir. Magnezyum ile ilave edildiğinde haddeleme kabiliyeti, çekme mukavemeti ve darbe mukavemeti artmaktadır [29,38].

2.3.6. Titanyumun Etkisi

Titanyum ilavesi tane küçültmeye katkı sağlamakla beraber mekanik özelliklerini arttırmaktadır. Bor ile birlikte kullanıldığında en iyi etkiyi göstermektedir. Çekme mukavemeti ve sünekliği artırırken ısı iletkenliğini düşürmektedir [38,42].

2.3.7. Demirin Etkisi

Demir tane küçültücü etki yapmakta ve aynı zamanda termal mukavemeti artırmaktadır. Al-Si bazlı yüksek silisyum içeren alaşımlarda demir gevrek ve kaba bir yapının oluşmasına neden olmaktadır. Bu sebepten dolayı bu tip alaşımlarda minimum bir değerde olması istenilmektedir. Döküm alaşımlarında sıcak çatlama olayının indirgenmesinde olumlu bir etkisi vardır [35,42].



BÖLÜM 3

ALÜMİNYUM ALAŞIMLARI VE ISIL İŞLEMLERİ

3.1. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ TEMPER KODLARI

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtıl veya mekanik işlemlerin ya da her ikisinin uygulanması, alaşımın temper halini belirtmektedir. Alaşım kodlarından sonra temper simgesi birbirinden “-” ile ayrılmaktadır. Farklı temper işlemleri yapıldıysa temperi ifade edilen ilk harf yazıldıktan sonra, temper işlemleri uygulanış sırasına göre yazılmaktadır. F, O, H, W ve T harfleriyle temper işlemleri ifade edilmektedir [29,31,43]. Çizelge 3.1’de alüminyum alaşımlarının temper kodları gösterilmektedir.

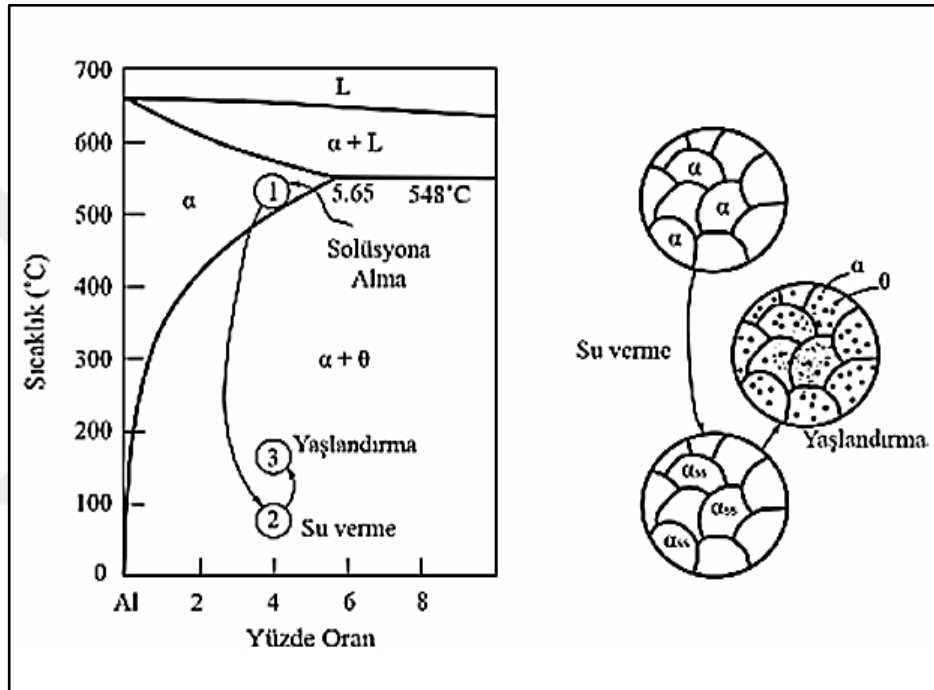
Çizelge 3.1. Alüminyum alaşımlarının temper kodları [30].

Kısaltma	Açıklama
F	Fabrikasyon halinde
O	Tavlanmış
H	Deformasyonla serleştirilmiş
W	Solüsyona alınmış
T1	Yüksek sıcaklık üretim yönteminde soğutulmuş ve doğal yaşlanmış
T2	Yüksek sıcaklık üretim yönteminde soğutulmuş, soğuk deformasyona uğramış ve doğal yaşlanmış
T3	Solüsyona alınmış, soğuk deformasyona uğramış ve doğal yaşlanmış
T4	Solüsyona alınmış ve doğal yaşlanmış
T5	Yüksek sıcaklık üretim yönteminde soğutulmuş ve yapay yaşlanmış
T6	Solüsyona alınmış ve yapay yaşlanmış
T7	Solüsyona alınmış ve aşırı yaşlandırılmış
T8	Solüsyona alınmış, soğuk deformasyona uğramış ve yapay yaşlanmış
T9	Solüsyona alınmış, yapay yaşlanmış ve soğuk deformasyona uğramış
T10	Yüksek sıcaklık üretim yönteminde soğutulmuş, soğuk deformasyona uğramış ve yapay yaşlanmış

3.2. YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

Yaşlandırma ısıtıl işlemi, ana matrisle uyumlu halde homojen olarak dağılmış ikinci faz partiküllerinin oluşturulmasını sağlayan bir ısıtıl işlemidir. Bu ana matrisle uyumluluk gösteren çökeltiler dislokasyon hareketlerini engelleyerek mukavemet

artışına katkı sağlamaktadır. Böylece malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri iyileşmektedir. Bu ısıtım işlemi sıvı halde her oranda, katı halde kısmen çözünen solvüs eğrisi içeren denge diyagramına sahip alaşımlarda gerçekleşmektedir. Artan sıcaklıkla birlikte alaşım elementlerinin çözünürlüğü artmaktadır. Yaşlandırma ısıtım işlemi solüsyona alma, su verme ve yaşlanma işlemi olmak üzere üç kademede gerçekleştirilmektedir [21,33,36,41,48,51,52]. Yaşlandırma ısıtım işlemi kademeleri şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Yaşlandırma ısıtım işlemi kademeleri [41].

3.2.1. Solüsyona Alma

Yaşlandırma ısıtım işleminin ilk aşaması olan solüsyona alma işleminin amacı mukavemet artırıcı alaşım elementlerin tek fazlı katı ergiyik içerisinde çözünmesini sağlamaktır. Bu işlemi gerçekleştirmek için malzeme solvüs eğrisinin üstündeki sıcaklığa veya ötektik sıcaklığın 10-20°C altındaki bir sıcaklığa ısıtılmalıdır. Solvüs sıcaklığı alaşım miktarının artmasına bağlı olarak artmaktadır. Bu yüzden alaşımın kimyasal bileşimi solüsyona alma sıcaklığının belirlenmesinde çok önemlidir.

Ötektik sıcaklığın üstüne çıkılması durumunda tane sınırlarında ergime meydana gelir ve mekanik özelliklerin düşmesine neden olur. Solüsyona alma sıcaklığı düşük tutulur ise ikinci faz çökeltilerinin çözünmesi mümkün olmaz ve sertlikte düşüş meydana gelmektedir. Isıtma hızı da dikkat edilmesi gereken bir husustur ve dengesiz ergimelere neden olmaktadır. Uygun ısıtma hızlarında Al_2Cu çökeltileri $500^{\circ}C$ 'de rahat çözünürken hızlı ısıtmalarda ise yapı içerisinde çözünmeden kalmaktadır.

Solüsyona alma işleminde bekleme süresi ikinci fazın çözünmesine ve homojen bir yapı elde edilmesine kadar devam etmelidir. Kalın kesitli malzemelerde bu süre uzunken, ince kesitli malzemelerde bu süre daha kısadır. Bekleme süresinin artması malzemede tane büyümesine sebep olmaktadır ve mekanik özellikleri olumsuz etkilemektedir [22,33,38,41,43,48,53].

3.2.2. Su Verme

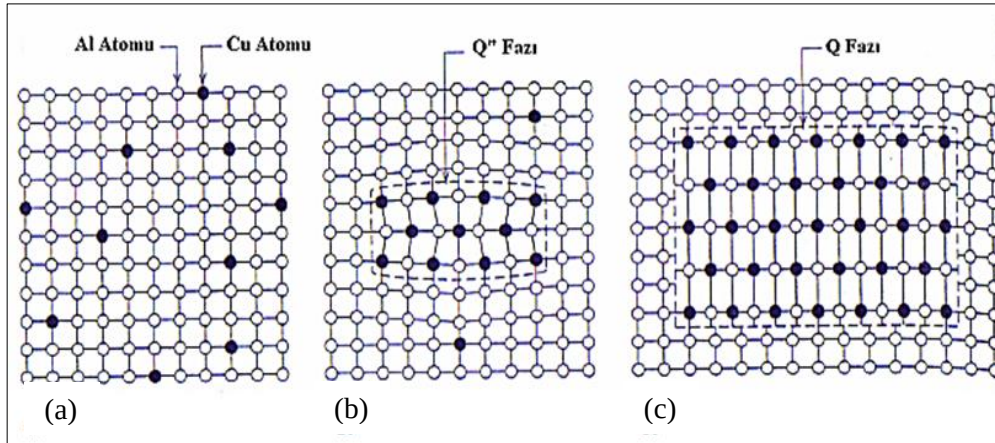
Su verme işlemi yaşlandırma işleminin en önemli basamağıdır. Bu işlemde amaç solüsyona alma işleminde oluşturulan aşırı doymuş katı çözeltinin yüksek soğuma hızıyla toparlanmasına izin vermeden oda sıcaklığına soğutularak korunmasını sağlamaktadır. Yüksek hızda su verme uygulanmazsa katı çözelti içerisindeki ikinci faz partikülleri kayma düzlemleri ve tane sınırlarında çökelerek korozyon direncinin düşmesine ve deformasyon kabiliyetinin olumsuz yönde etkilenmesine neden olur.

Solüsyona alınan alaşımın su verme işlemiyle meydana gelen yoğun boşluk konsantrasyonu denge difüzyonundan daha hızlı difüzyonun gerçekleşmesiyle GP (Guinier-Preston) bölgelerinin oluşmasına katkı sağlamaktadır. Su verme süresi çok önemlidir. Su verme aralığı 10-20 saniye arasında gerçekleştirilmelidir. En iyi mukavemet ve tokluk hızlı soğuma işlemiyle elde edilmektedir [33,36,38,41,51].

3.2.3. Yaşlanma

Aşırı doymuş katı çözeltilerin kararlı hale gelebilmesi için son aşama olan yaşlanma işlemi uygulanmaktadır. Yaşlanma işlemi oda sıcaklığında veya oda sıcaklığı ile solvüs eğrisi arasındaki bir sıcaklık aralığında gerçekleştirilmektedir. Yaşlanma işlemi oda sıcaklığında gerçekleşiyorsa doğal, oda sıcaklığının üstünde gerçekleşiyorsa yapay yaşlanma olarak adlandırılmaktadır [53-55].

Yaşlandırma işlemi; hazırlık evresi, yaşlanma evresi ve aşırı yaşlanma evresi olmak üzere üç evreyi içerir. Kuluçka evresi olarakta bilinen hazırlık evresinde fazlalık atomlar bir araya gelerek kümeleşip ilk embriyoyu oluştururlar. Yaşlandırma evresinde ise çekirdeklenme mekanizması etkin hale gelmekte ve fazlalık atomlar Θ fazının çekirdeklerini oluşturmaktadır. Yaşlanma evresinde meydana gelen ara kristal yapı veya geçiş kafesi ana matrisin kafes yapısıyla uyumludur. Bu evrede çökelen Θ fazı, matristen farklı bir kafes parametresine sahiptir. Bu fazın, matris yapısıyla uyumluluk göstermesi matrisin kafes yapısında çarpılmaya sebep olmaktadır. Meydana gelen bu çarpılma dislokasyon hareketini engellemesi sebebiyle, bu evrede alaşımın mukavemeti ve sertliği hızlı bir şekilde artmaktadır [26,39,40,52,54,55]. Yaşlandırma işlemi sırasında oluşan çökeltme aşamaları şekil 3.2’de gösterilmektedir.

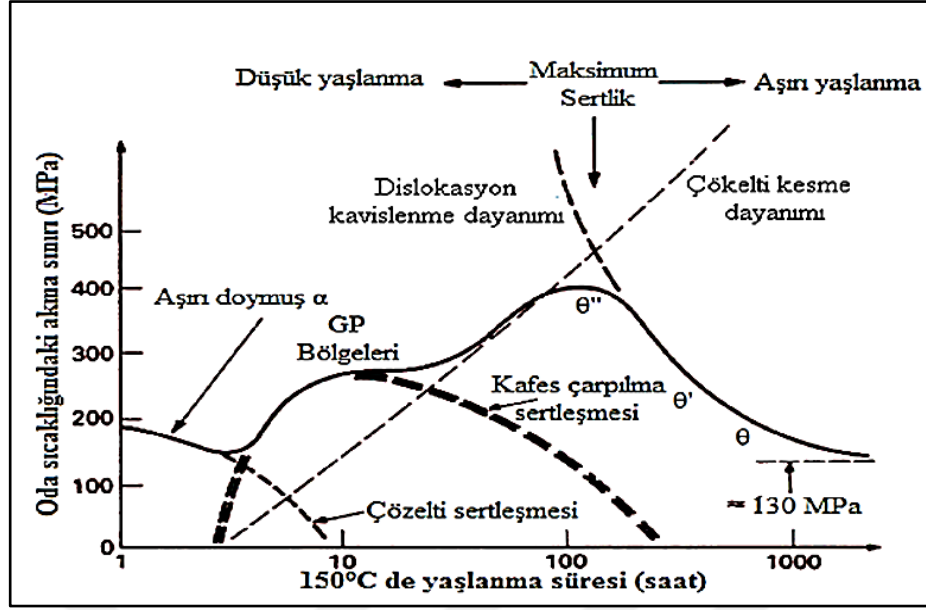


Şekil 3.2. Yaşlandırma işleminde çökeltilerde meydana gelen oluşumlar; a) aşırı doymuş katı çözelti, b) matrisle uyumlu katı çökelti ve c) matrisle uyumsuz kararlı çökelti durumu [41].

Yaşlanma evresinde, çökelen fazın kendi kafes yapısını oluşturarak matris kafesinden ayrılması neticesinde matris yapısıyla kalkan uyumluluk durumu yapıdaki çarpılmayı azaltmakta, sertlik ve mukavemette düşüşe sebep olmaktadır. Sertlikte ve mukavemette meydana gelen bu durum aşırı yaşlanma evresi olarak adlandırılmaktadır. Bu evrede, çökelti mikroskopta görünür hale gelmektedir. Yaşlandırma işleminde en önemli mekanizma çekirdeklenme ve büyümedir. Bu mekanizmalar ise difüzyona bağlıdır. Düşük sıcaklıklarda difüzyon hızı düşük olduğundan çekirdeklenme hızının düşmesine sebep olmaktadır. Yaşlandırma süresi uzun tutulduğunda çekirdek sayısı artabilir ve bu uzun süre sonunda daha yüksek sertlik değeri elde edilmektedir. Yüksek sıcaklıkta meydana gelen yaşlanma işleminde difüzyon hızının yüksek olmasıyla birlikte çekirdeklenme ve büyüme hızı artacaktır. Bu sebeple, yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlanmalarda kısa sürede tane büyümesi gerçekleşmekte ve sertlik ve mukavemette düşüş gözlenmektedir [51,52,54].

% 4 oranında bakır içeren alüminyum alaşımının yaşlandırılması ele alınırsa bu alaşım 515°C'de solüsyona alma işlemi uygulandıktan sonra suda soğutulup aşırı doymuş yapı elde edilir. Daha sonra 130-190°C arasında yapay olarak yaşlandırma işlemine tabi tutulduğunda yaşlandırma (çökeltme) sertleşmesine maruz kalmaktadır. % 4 bakır içeren bu alaşımda yaşlanma sertleşmesinde birbiri ardına beş yapı belirlenmektedir. Bunlar; (1) aşırı doymuş katı çözelti, (2) GP1 bölgesi, (3) GP2 (Θ'' fazı) bölgesi, (4) Θ' fazı ve (5) Θ fazı Al_2Cu [30,39,56,57].

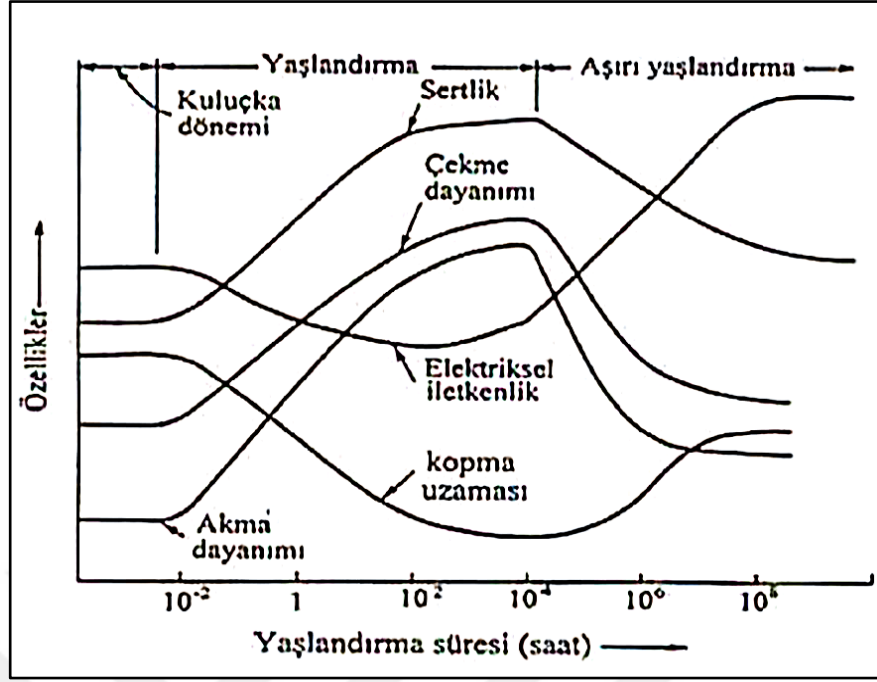
Bagaryatsky [58], yaptığı çalışmada çökeltme sertleşmesi oluşumunu magnezyum oranının yüksek olduğu alaşımlarda (1) aşırı doymuş katı çözelti, (2) GPB (Guinier-Preston-Bagaryatsky) bölgesi, (3) S'' fazı, (4) S' fazı ve (5) S fazı Al_2CuMg şeklinde olduğunu belirtmiştir. Bütün yaşlandırma sıcaklarında bu yapıların tümü meydana gelmemektedir. GP1 ve GP2 bölgeleri düşük sıcaklıktaki yaşlandırma işlemlerinde Θ' ve Θ fazları ise yüksek sıcaklıkta gerçekleştirilen yaşlandırma işleminde meydana gelmektedir [56]. Şekil 3.3'de % 4 oranında bakır içeren alüminyum alaşımının yaşlandırma işleminde akma mukavemetinde meydana gelen değişim gösterilmektedir.



Şekil 3.3. % 4 bakır içeren alüminyum alaşımının akma mukavemetindeki değişim [43].

GP1 bölgeleri, düşük sıcaklıklardaki yaşlandırma işlemlerinde katı çözültinin içerisinde yer alan bakır atomları tarafından oluşturulur. GP1 bölgeleri 0,4-0,6 nm atom kalınlığında yaklaşık 9-10 nm çapında olmakla birlikte ana matrisin (100) düzlemlerinde meydana gelmektedir. Bakır atomlarının çapları alüminyumun çapından yaklaşık olarak % 11 oranında küçüktür ve bölgelerin etrafında ana matrisin kafesini gererek tetragonal bir form alır. Bakır atomlarının alüminyumun yerini aldığı GP1 bölgelerinin uyumlu olduğu söylenmektedir. GP2 bölgelerinde θ'' fazı tetragonal yapıdadır. Alaşımın (100) ana matrisin düzlemleriyle uyumludur. Boyutları yaşlanma süresine bağlı olmakla beraber 1-4 nm kalınlıkta ve 10-100 nm çap arasında değişmektedir.

θ' fazı ana matrisle uyumlu değildir. Ana matristen daha farklı bir kristal yapıya sahip olan bu faz dörtgenli bir yapıdadır. 10-150 nm arasında değişen bir kalınlıktadır. θ fazı uyumsuz faz ve Al_2Cu bileşimindedir. Bu fazın hacim merkez tetragonal yapıda ($a = 0,607$ nm ve $b = 0,487$ nm) olmakla beraber θ' fazından veya doğrudan ana fazdan oluşmaktadır [51,56,57]. Şekil 3.4'de yaşlandırma işleminin alaşımın fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Yaşlandırma ısıl işleminin fiziksel ve mekanik özelliklere etkisi [26].

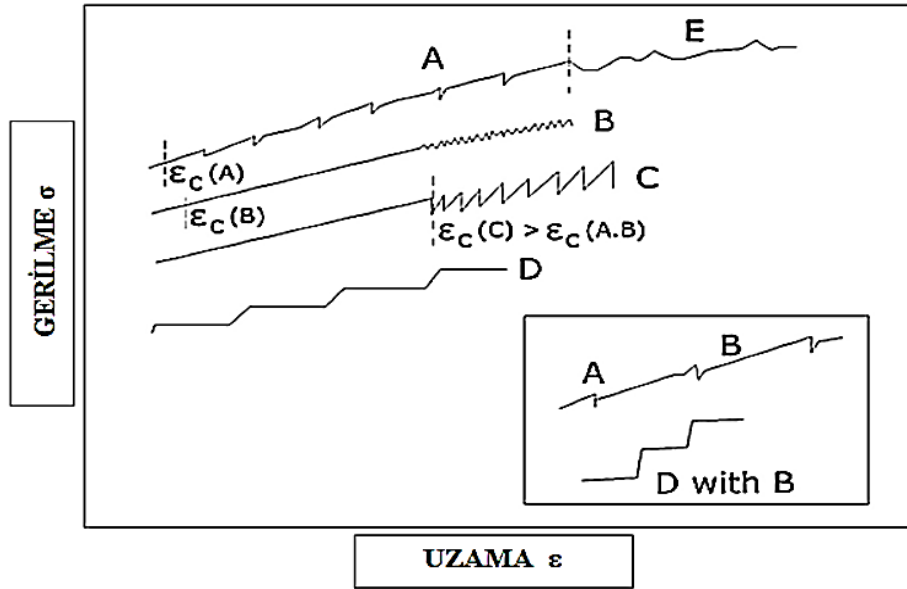
Buraya kadar anlatılan yaşlanma soğuma yaşlanması olup deformasyon içermeyen bir yaşlanma türüdür. Fakat uygulamada soğuma yaşlanmasının yanında deformasyon yaşlanması da çelik ve alüminyum alaşımlarının mukavemetini artırmada kullanılmaktadır. Deformasyon yaşlanması statik ve dinamik yaşlanma olmak üzere kendi içerisinde ikiye ayrılmaktadır. Aşağıda bu yaşlanma türleri de detaylı olarak açıklanmıştır.

3.2.3.1. Statik Deformasyon Yaşlanması

Soğuk deformasyon işleminden sonra metalik malzemelerde oda sıcaklığında uzun süre bekletilip veya düşük sıcaklıklarda tavlınması sonucunda mukavemette artış ve süneklikte azalma meydana gelmektedir. Bu olay deformasyon yaşlanması olarak adlandırılmaktadır. Soğuk deformasyon işlemi ile giderilen akma olayı yaşlandırma prosesiyle tekrar görülmektedir [31,32,59-63]. Şekil 3.5’de statik deformasyon yaşlanmasının şematik gösterimi yer almaktadır.

3.2.3.2. Dinamik Deformasyon Yaşlanması

Plastik deformasyon sırasında meydana gelen yaşlanma olayı dinamik deformasyon yaşlanması olarak adlandırılmakta ve aynı zamanda PLC (Portevin-Le Chatelier) etkisi olarak da bilinmektedir. Bu mekanizma yüksek sıcaklıklarda çözünen yer alan ve arayer atomlarının deformasyon esnasında dislokasyonlarla olan karşılıklı etkileşiminden kaynaklanmaktadır. Dinamik yaşlanmanın tipik görünümü gerilme-uzama eğrisinde meydana gelen süreksiz akma (testere dişi, zig-zag) davranışı ile kendini göstermektedir. Literatürde A, B, C, D ve E tipi olmak üzere beş farklı tipte zig-zag tipleri bildirilmiştir [65-68]. Şekil 3.6'da çeşitli zig-zag tiplerini gösteren gerilme-uzama eğrileri görülmektedir.

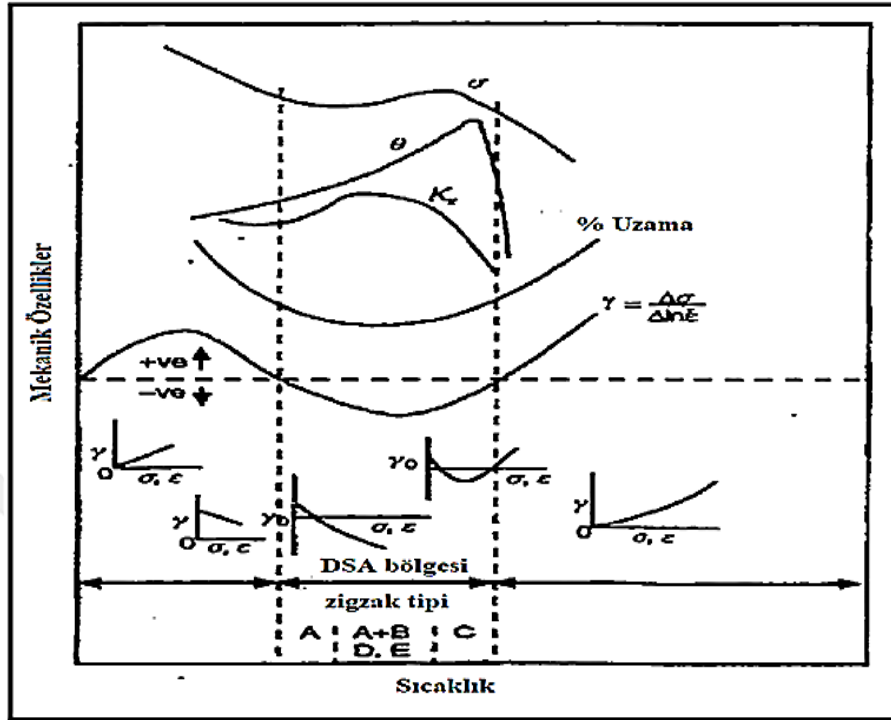


Şekil 3.6. Gerilme-uzama eğrisinde görülen zig-zag tipleri [68].

A tipi zig-zaglar, yüksek gerilmelerde oluşan ve yayılan kayma bandının tekrarlı şekilde çekirdeklenmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek deformasyon oranlarında ve düşük sıcaklıklarda meydana gelmektedir. B tipi zig-zaglar, gerilme-uzama eğrisinin genel seviyesinde meydana gelen zig-zag tipidir. Bu zig-zaglar aralıklı olarak yayılan dar kayma bantlarının tepe gerilmelerde tekrar tekrar çekirdeklenmesinden kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon oranlarında A ve B tipi zig-zaglar bir arada meydana gelebilir. C tipi zig-zaglar,

gerilme-uzama eğrisinin genel seviyesinin altında meydana gelen stress düşüşleridir. Dislokasyonların serbest kalmasından kaynaklanmaktadır. Yüksek sıcaklık ve düşük deformasyon oranlarında meydana gelmektedir. D tipi zig-zaglar, hareketli bandın önünde çalışma sertleşmesi ve gerinim gradyanı olmadan yayılan kayma bantlarıdır. Bu zig-zag tipi “merdiven tipi” olarakta adlandırılmaktadır. B ve D tipi zig-zaglar ikisi bir arada meydana gelebilmektedir. E tipi zig-zaglar, A tipine benzemekte ancak kayma bandının yayılması sırasında çalışma sertleşmesine sebep olmamaktadır. E tipi zig-zaglar, A tipinin yüksek gerilme değerlerinde görülmektedir [65-68].

Dinamik yaşlanma akma mukavemeti, süneklik, çalışma sertleşmesi, deformasyon hızına duyarlılığı gibi mekanik özellikleri etkileyebilmektedir. Dinamik yaşlanma bölgesinin herhangi bir gerilme bölgesinde çalışma sertleşmesi ve dayanımda artış görülebilirken negatif gerinim hızı duyarlılığına neden olabilmektedir [31,63,65,67]. Dinamik yaşlanmanın mekanik özelliklere etkisi şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. Dinamik yaşlanmanın mekanik özelliklere etkisi [63].

BÖLÜM 4

PLASTİK DEFORMASYON

4.1. PLASTİK DEFORMASYON MEKANİZMALARI

Her imalat yönteminin kendine göre sınırlarının olması sebebiyle çeşitli makine parçalarının her imalat yöntemiyle şekillendirilmesi zordur. Şekillendirilebilse bile istenilen yüzey kalitesi, dayanım ve tolerans elde edilememektedir. Bu durumlarda parçanın üretilmesi için belirli yöntemlerin uygulanması zorunlu olmaktadır. Bu parçaların istenilen özelliklerde üretilmesini sağlamak için uygulanan temel yöntemlerden birisi plastik şekillendirme işlemidir [69].

Malzemelerin maruz kaldığı kuvvete bağlı olarak oluşan gerilmeler sonucu elastiklik sınırı aşılarak kalıcı şekil değişimi oluşmaktadır. Bu kalıcı şekil değişimi plastik deformasyon olarak adlandırılmaktadır. Plastik şekil değişiminin dikkatli bir şekilde gerçekleştirilmesi için plastik deformasyon mekanizmaları ve malzemenin plastik deformasyon esnasındaki davranışların iyi bilinmesi gerekmektedir. Bu mekanizmalar kayma, ikizlenme, tane sınırı kayması ve yayınma sürünmesidir [69,70].

4.1.1. Kayma

Dislokasyonların hareket etmesi sonucunda atom düzlemlerinin kayması veya ötelenmesi kayma olarak adlandırılmaktadır. Kristallografik yapıya sahip malzemelerde kaymanın oluşması için belirli bir değerin üstünde bir kayma gerilmesinin oluşması gerekmektedir. Bu gerilme dislokasyonların üzerinde bir kuvvet meydana getirerek dislokasyonların hareketini sağlamaktadır. Bu hareket atom düzlemlerine etki eden kayma gerilmesinin şiddetine bağlıdır.

Oluşan kayma gerilmesinin malzemenin kayma mukavemetinden yüksek olması durumunda kayma meydana getirmektedir. Kayma belirli yönlerde daha kolay, bazı yönlerde daha zor gerçekleşmektedir. Dislokasyonların hareketi sonucu kayma işlemi gerçekleşmektedir. Dislokasyonların etrafındaki atomlar her zaman kafesteki olması gereken konumlarında bulunmayabilir ve denge konumlarında olmadıklarından dolayı dislokasyonların etrafında bir gerilme oluşur. Kayma işlemi atomların en yoğun olduğu kayma düzlemleri ve doğrultularında dislokasyonların hareket etmesiyle meydana gelmektedir [70-75].

4.1.2. İkizlenme

Atom düzlemlerinin ikiz düzlemlerine paralel yönde hareket etmesi sonucunda kafes yapısında farklı yönlenmiş iki simetrik kısma bölünmesi olayına ikizlenme denir. İkizlenme düşük sıcaklıkta ve yüksek deformasyon hızlarında meydana gelmektedir. Kayma mekanizmasının gerçekleşmesinin zor olduğu durumlarda ikizlenme meydana gelmektedir.

İkizlenme plastik deformasyon sırasında gerçekleştiği gibi, tavlama esnasında da meydana gelebilmektedir. İkizlenme deformasyon ve tavlama ikizlenmesi olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Deformasyon ikizlenmesi SPH (Sıkı Paket Hegzagonal) ve HMK (Hacim Merkez Kübik) yapıya sahip metallerde düşük sıcaklık ve yüksek deformasyon hızlarında meydana gelmektedir. Tavlama ikizlenmesi genel olarak YMK (Yüzey Merkez Kübik) yapıya sahip metallerde görülmektedir. Soğuk deformasyondan sonra uygulanan tavlama işlemlerinden sonra ikizlenmeler görülmektedir [70-75].

4.1.3. Tane Sınırı Kayması

Yüksek sıcaklıkta ve düşük deformasyon hızlarında çok kristalli malzemelerde deformasyon tane sınırı kayması mekanizmasıyla gerçekleşmektedir. Tane sınırı kayması, tanelerin tane sınırı boyunca kayarak yer değiştirmesidir. Uygulanan gerilme kayma gerilmesinden yüksek olduğu durumda gerçekleşmektedir. Çekme eksenine 45°'lik açıda bulunan tane sınırlarında kayma daha kolay

gerçekleşmektedir. Küçük tane boyutuna sahip metallerde tane sınırı kaymasının deformasyona katkısı çok daha yüksektir [70-74].

4.1.4. Yayınma Sürünmesi

Çok kristalli malzemeler, deformasyon sıcaklığının ergime sıcaklığına yakın olduğu yüksek sıcaklıklarda ve düşük deformasyon hızlarında kaymadan çok, atomların uygulanan gerilme yönünde yer değiştirmesi ile yayınma sürünmesi ile şekil değiştirebilirler. $0,9 T_m$ ve üzerindeki sıcaklıklarda ve düşük deformasyon hızlarında atomların uygulanan gerilme yönünde yer değiştirmesi yayınma sürünmesi olarak adlandırılmaktadır. Yayınma sürünmesi sırasında atomlar uygulanan kuvvet doğrultusunda, boşluklar ise uygulanan gerilmeye dik yönde yayılmaktadır. Bu durum sonucunda en fazla tane boyutu kadar uzama görülebilir [71-74].

4.2. PLASTİK DEFORMASYONA ETKİ EDEN FAKTÖRLER

Malzeme yapısı, mekanik özellikler, deformasyon hızı, sıcaklık, sürtünme ve yağlama, hidrostatik basınç, kalıntı gerilmeler ve geometrik faktörler plastik deformasyonu etkilemektedir [76-78]. Aşağıdaki alt başlıklarda bu faktörler değerlendirilmiştir.

4.2.1. Malzeme Yapısı

Deformasyonu etkileyen en önemli faktör malzemenin yapısıdır. Malzemelerin içerisinde bulunan atomların cinsleri, dizilişleri, büyüklükleri ve birbiriyle olan bağlanma şekillerine göre değişiklikler göstermektedirler. Malzemelerin kafes yapısı, tane boyutu, sünekliği, mukavemeti, yapı içerisinde bulunan inklüzyonların miktarı ve türü deformasyonu etkilemektedir. Tek faza sahip malzemelerin deformasyonu çok fazlı malzemelere göre daha iyidir. Titanyum ve magnezyum malzemelerin hegzagonal yapıya ve düşük ikizlenme mekanizmalarına sahip olması oda sıcaklığında çelik ve alüminyuma göre daha düşük şekillendirme özelliği göstermektedir. Sıcaklığın artışıyla malzemelerin aktif kayma sistemleri artar ve şekillendirme kabiliyeti artmaktadır. Malzeme yapılarının, mikro analizlerle tespiti

mümkündür. Bu tespitler, deformasyon uygulamaları sırasında bu işleme uygun olan malzeme yapısının belirlenmesinde katkı sağlamaktadır [76-83].

4.2.2. Mekanik Özellikler

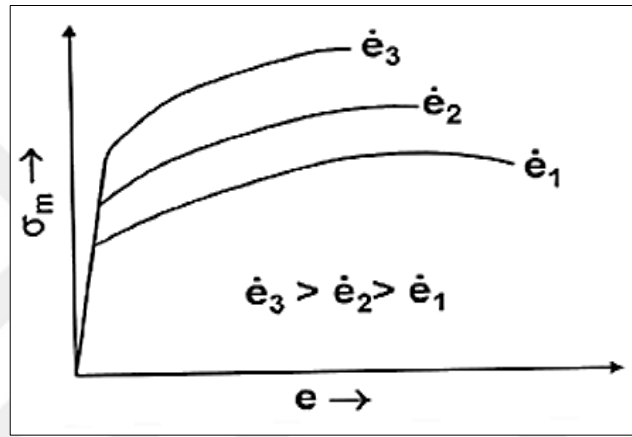
Malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesinde atomik yapıları en büyük öneme sahiptir. Tahribatlı veya tahribatsız muayene teknikleriyle malzemelerin mekanik özellikleri hakkında bilgi edinilmektedir. Bu bilgiler ışığında çalışma şartlarına uygun malzeme seçimi gerçekleştirilebilmektedir [76,79,80,83]. Çizelge 4.1’de çekme deneyinden elde edilen mekanik özelliklerin etkisi gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Çekme deneyinden elde edilen mekanik özellikler ve etkileri [77,78,82-85].

Mekanik Özellik	Verinin Elde Edilmesi	Etkiledikleri Özellikler	Etkilendiği Özellikler
n Deformasyon Sertleşmesi Üssü	Gerçek gerilme-uzama diyagramının eğimi	Küçük uzamalaradaki kırışmayı, geri esneme, büyük uzamalarda gerdirilebilirliği	Kimyasal bileşim, tane büyüklüğü, sıcaklık, soğuk deformasyon oranı, akma dayanımı, kalıntı gerilme
R Anizotropi Kat Sayısı	Uzamadaki değişimin kalınlıktaki değişime oranı	Anizotropik davranışı, derin işlenebilirliği, kulaklanmayı	Kalıntı gerilme, işlem sırası, şekil değiştirme derecesi, yaşlandırma sıcaklığı, kimyasal bileşim, tane boyutu
Akma Dayanımı	Gerilme-uzama eğrisinin % 0,2 uzama miktarının eğriye paralel çizgi çizildiğinde kesişmenin olduğu noktadaki değer	Düşük uzamalarda deformasyon sertleşmesi, kırışma, geri esneme	Elastikiyet modülü, tane boyutu, sıcaklık, kimyasal bileşim
Çekme Dayanımı	Gerilme-uzama eğrisinin en üst noktasındaki değer	Homojen uzama, deformasyon sertleşmesi	Kimyasal bileşim, tane boyutu, önceden gerçekleşen deformasyon oranı
Maksimum Uzama	Gerilme-uzama eğrisinin en son noktasındaki yatay eksenindeki değer	Deformasyon sertleşmesi davranışı	Tane boyutu, kimyasal bileşim, deformasyon oranı

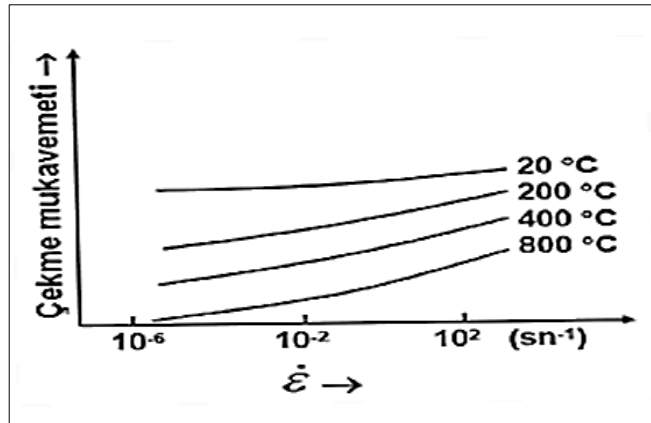
4.2.3. Deformasyon Hızı

Malzemelerin mekanik özellikleri ve sünekliği deformasyon hızından etkilenmektedir. Deformasyon hızının artmasıyla malzemenin mukavemeti doğru orantılı olarak artarken sünekliği ise ters orantılı olarak düşmektedir. Yapılan çalışmalarda akma ve çekme mukavemetlerinin artan deformasyon hızıyla arttığını sünekliğin ise azaldığı gözlemlenmektedir [78-80,84,86,87]. Şekil 4.1’de deformasyon hızının gerilme-uzama eğrisine etkisi gösterilmektedir.



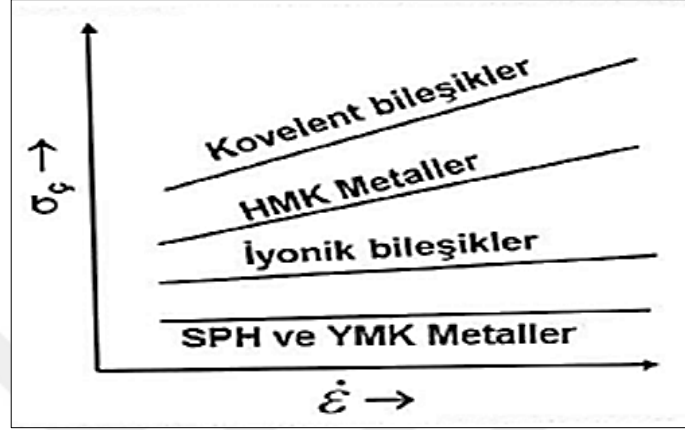
Şekil 4.1. Deformasyon hızının gerilme-uzama eğrisine etkisi [78].

Deformasyon hızı, sıcaklık arttıkça mukavemeti artırmaktadır. Deformasyon hızı daha yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirildiğinde sıcaklığa duyarlı hale gelmektedir [83,84,87,88]. Şekil 4.2’de sıcaklığın deformasyon hızına etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.2. Sıcaklığın deformasyon hızına etkisi [83].

Farklı kafes yapısına sahip malzemelerin deformasyon hızına bağlı olarak çekme dayanımında meydana gelen değişim şekil 4.3’de gösterilmektedir. YMK ve SPH kafes yapısına sahip malzemelerin deformasyon hızına karşı duyarlılığı daha azdır. HMK yapıları malzemeler ise deformasyon hızına daha duyarlıdır [77,83,87].

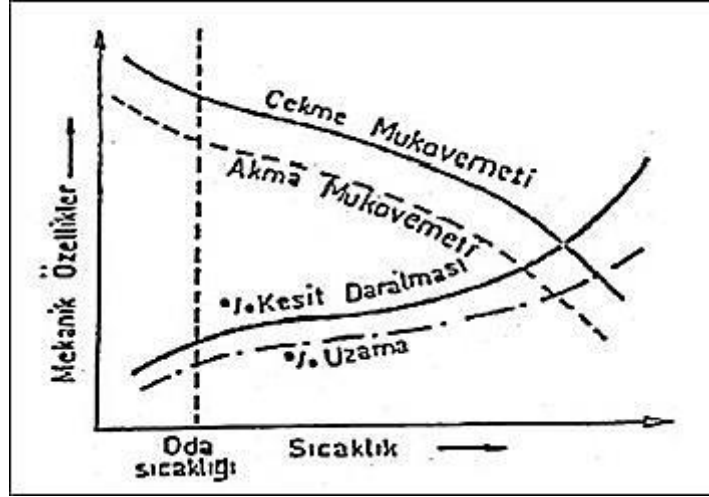


Şekil 4.3. Farklı kafes yapısına sahip malzemelerde deformasyon hızının mukavemete etkisi [83].

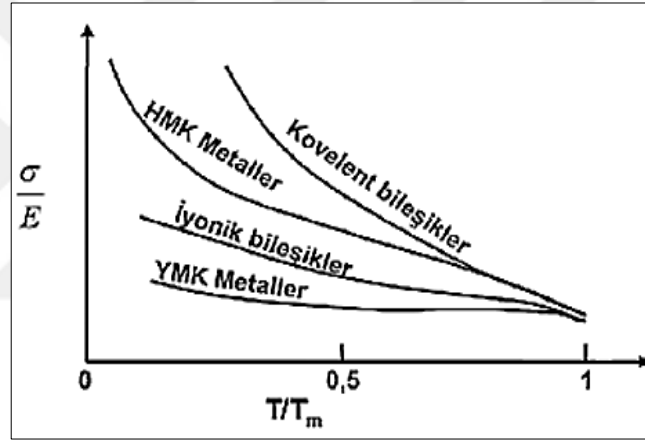
4.2.4. Sıcaklık

Sıcaklık malzemelerin deformasyonunda en büyük etkidir. Sıcaklık, deformasyon hızı ve mekanik özellikler arasında güçlü bir ilişki vardır. Sıcaklık artışı deformasyon hızının şekillendirmeye olan etkisini artırmaktadır. Malzemelerin mukavemetleri artan sıcaklıkla birlikte azalmaktadır. Sıcaklık aynı zamanda deformasyon sertleşmesi üssü değerinde düşürmektedir [78,79,82,84,87]. Şekil 4.4’de sıcaklığın mekanik özelliklere etkisi gösterilmektedir.

Farklı kafes yapılarına sahip malzemelerin sıcaklığa karşı duyarlılığı farklılık göstermektedir. HMK kafes yapısına sahip metallerde artan sıcaklıkla birlikte mukavemette hızlı bir şekilde azalış gösterirken, YMK kafes yapısına sahip metallerde bu olay daha yavaş bir şekilde gerçekleşmektedir [83,87]. Şekil 4.5’de farklı kafes yapısına sahip metallerin σ/E değerinin T/T_m benzeş sıcaklık oranına göre değişimi gösterilmektedir.

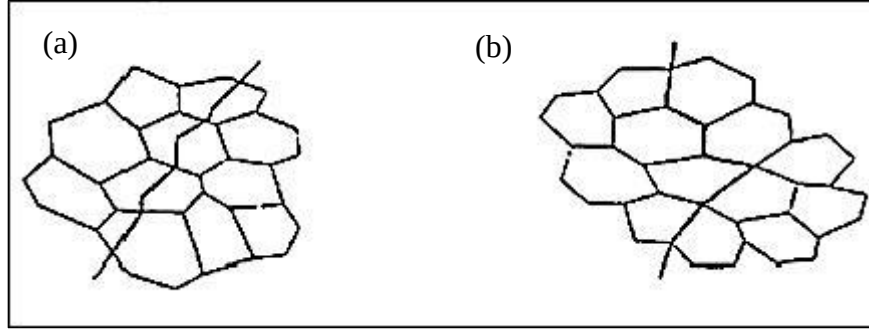


Şekil 4.4. Sıcaklığın mekanik özelliklere etkisi [83].



Şekil 4.5. Farklı kafes yapısına sahip metallerde σ/E değerinin değişimi [83].

Sıcaklık kırılma tipinde etkilemektedir. Sıcaklığın artması malzemelerde transgranüler (tane içi) kırılmadan intergranüler (taneler arası) kırılma tipine doğru geçiş sağlamaktadır. Transgranüler kırılmada klivaj düzlemleri tane sınırlarından daha zayıftır ve kırılma klivaj düzlemleri boyunca gerçekleşmektedir. İntergranüler kırılma ise tane sınırlarının daha zayıf olmasından dolayı kırılma tane sınırları boyunca gerçekleşmektedir [83,89]. Şekil 4.6' da kırılma tipleri gösterilmektedir.

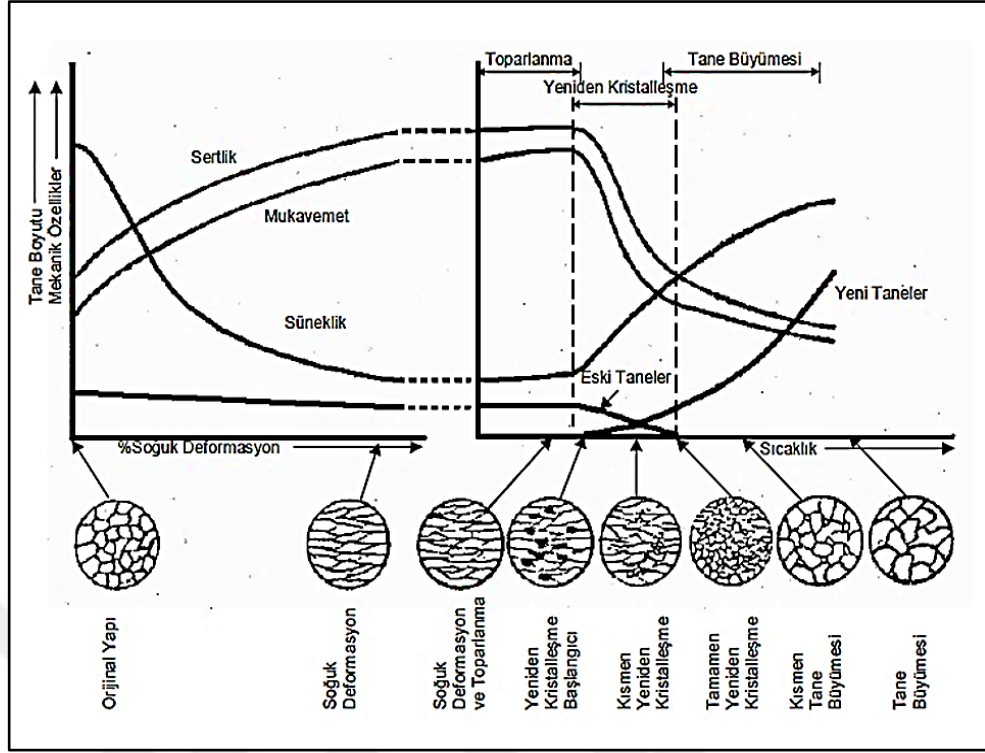


Şekil 4.6. Kırılma tipleri; a) transgranüler ve b) intergranüler kırılma [83].

Soğuk deformasyon $0,3 T_m$ 'nin altında gerçekleştirilen deformasyon uygulamasıdır. Soğuk deformasyon işlemi malzemelerde dislokasyon hareketini kolaylaştırır ve yeni dislokasyonların oluşmasına katkı vermektedir. Soğuk deformasyonla dislokasyon yoğunluğu artar ve deformasyon sertleşmesi oluşur. Bunun sonucunda mukavemette artış gözlenir. Dislokasyonların birbirini engellemesi sonucunda deformasyon sertleşmesi oluşur. Soğuk deformasyon oranı ile mukavemet arasında doğru orantı vardır [77,86,87].

Soğuk deformasyon uygulanan metallerin taneleri deformasyon yönünde uzama göstererek belirli bir kristallografik doğrultuda yönelir. Dislokasyon yoğunluğunun tanelerde artması sebebiyle atomsal boşluklar meydana gelmekte ve yoğunlukta bir azalma oluşmaktadır. Soğuk deformasyonda harcanan enerji dislokasyon enerjisine dönüşür, bir kısmı ise ısı olarak ortama yayılmaktadır [71,76]. Şekil 4.7'de soğuk deformasyon oranının mikroyapısal değişime ve mekanik özelliklere etkisi gösterilmektedir.

Soğuk deformasyon oranının artmasıyla mekanik özelliklerde artış, fakat süneklikte azalma meydana gelmektedir. Soğuk deformasyon sırasında atomsal boşlukların oluşması yoğunluğu düşürmekte ve çatlakların oluşmasına neden olmaktadır. Bu çatlakların oluşmasını engellemek ve düşen sünekliği artırmak için tavlama işlemine gereksinim duyulmaktadır. Soğuk deformasyonla yüksek boyutsal tolerans sağlanmaktadır [74,90].

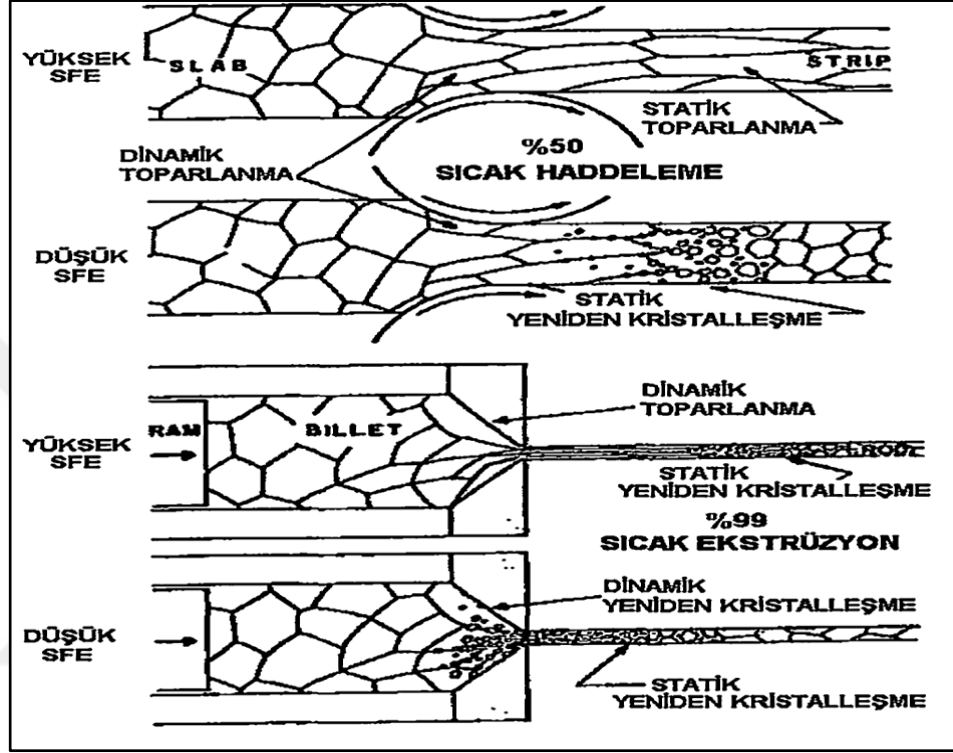


Şekil 4.7. Soğuk deformasyon işleminin mekanik özelliklere ve mikroyapıya etkisi [77].

Ilık deformasyon $0,3-0,5 T_m$ sıcaklıkları arasında gerçekleştirilen deformasyon işlemidir. Soğuk deformasyona göre daha az kuvvet uygulanır ve daha az deformasyon sertleşmesi gösterir. Bu nedenle ılık deformasyon işleminde tavlama işlemine gereksinim duyulmamaktadır. Sıcak deformasyona göre daha az ısı enerjisine ihtiyaç duyulmakta olup daha iyi boyutsal tolerans ve yüzey kalitesi sağlanmaktadır. Yeniden kristalleşme olayı ılık deformasyonda olmaz ancak dinamik toparlanma olur. Dinamik toparlanma ile alt tane yapısı meydana gelir ve mukavemette artış olmaktadır. Malzemenin tokluğu ve sünekliği soğuk deformasyona maruz kalmış malzemeden daha iyi olmaktadır [74,86,87,90].

Sıcak deformasyon $0,5 T_m$ ve üzerindeki sıcaklıklarda gerçekleştirilen deformasyon işlemidir. İşlem parametreleri dikkatli belirlenmezse malzemenin deformasyon sonunda sertliği değişmez, düşük mukavemetli ve büyük taneli bir yapı elde edilebilir. Parametrelerin düzgün belirlenmesiyle deformasyon sonunda oluşan yapı değişimi yeniden kristalleşme ile giderilmiş olur. Sıcak deformasyonun yapıldığı sıcaklıkta malzemenin uzun süre tutulması tane büyümesine neden olmaktadır [86].

Sıcak işlemde yeniden kristalleşmenin meydana gelmesi uygulanan deformasyon miktarına ve malzemelerin istif hatası enerjisine bağlıdır [76]. Şekil 4.8’de istif hatası enerjisinin ve deformasyon miktarının dinamik yeniden kristalleşme ve dinamik toparlanmaya etkisi gösterilmektedir.



Şekil 4.8. İstif hatası enerjisinin ve deformasyon miktarının dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmeye etkisi [76].

Şekil 4.8’de görüldüğü gibi düşük istif hatası enerjisine sahip malzemelerin sıcak deformasyon sırasında düşük deformasyon oranlarında dinamik toparlanmaya yüksek deformasyon oranlarında ise dinamik yeniden kristalleşmeye ve ardından statik yeniden kristalleşmeye uğradığı görülmektedir. Yüksek istif hatası enerjisine sahip malzemelerde hem düşük hem yüksek deformasyon oranlarında dinamik toparlanmayı takiben statik toparlanma ve statik yeniden kristalleşme meydana gelmektedir. Deformasyon sırasında gerçekleşen yeniden kristalleşmeye dinamik yeniden kristalleşme, deformasyondan sonra gerçekleşen yeniden kristalleşmeye statik yeniden kristalleşme denir [76,89].

Sıcak deformasyonda şekil değişimi için harcanan enerji soğuk deformasyona göre daha azdır. Çatlama gerçekleşmeden yüksek şekil alma kabiliyeti sağlanır ve dökümden kaynaklanan hatalar giderilir. Döküm yapısının değişmesiyle daha yüksek tokluk sağlanmaktadır. Yüksek sıcaklıkta malzeme ve fırın atmosferi arasında istenmeyen reaksiyonlar meydana gelir. Malzemede oksidasyon olur ve malzemeden kayıp olur. Sıcak deformasyon işlemi pahalı bir işlemdir. Yüksek boyutsal tolerans sağlamaz [77,87,90-92].

4.2.5. Sürtünme ve Yağlama

Malzemelerin bütün yüzeyleri pürüzlüdür. Malzemeler arası etkileşimde sürtünmenin olması veya sürtünmeye karşı direnç oluşması kaçınılmazdır. Çeşitli testlerle malzemelerin sürtünme katsayıları belirlenmekte ve her malzemenin sürtünme katsayısı farklıdır. Sürtünme katsayısının yüksek olması malzemenin deforme edilebilirliğini düşürmektedir. Yağlama işlemiyle deformasyon sırasında homojen deformasyon artırılmaktadır. Malzeme ve temas yüzeyi arasında kullanılan yağ koruyucu bir katman vazifesi görmekte olup aynı zamanda soğutucu olarak kullanılmaktadır. Deformasyon işlemlerinde uygun yağ seçimi yapılırken yağın korozyondan koruması, alevlenmemesi, viskozite değeri, temizlenmesi, ekonomik ve kalite gibi özellikleri göz önünde bulundurulmalıdır [74,77-79,82-84].

4.2.6. Hidrostatik Basınç

Hidrostatik basınç, malzemelerin sünekliğini artırmakta ve kopma olayını geciktirilmesine katkı sağlamaktadır. Malzeme deformasyon sırasında oluşabilecek hasarın indirgenmesine katkı sağlamaktadır. Şekillendirme kabiliyeti düşük olan malzemelerin bu işlemle şekillendirilmesi artmaktadır [79,84].

4.2.7. Kalıntı Gerilmeler

Herhangi bir gerilme veya kuvvet etkisi olmadığında malzemede mevcut olan gerilmeye kalıntı gerilmesi denilmektedir. Malzeme içerisindeki sıcaklık gradyanları veya heterojen deformasyon işlemi sonucunda meydana gelebilmektedir. Kalıntı

gerilmelerin ulaşabileceği maksimum gerilme değeri malzemenin akma mukavemeti kadardır. Kalıntı gerilmelerin artması malzemenin çarpılmasına sebep olmaktadır. Yüzeyde meydana gelen çekme kalıntı gerilmelerinin giderilmemesi durumunda gerilmeli korozyon çatlaması oluşmaktadır [79,83-85].

4.2.8. Geometrik Faktörler

Deformasyon uygulamalarında malzemenin şekli şekillendirmeyi etkilemektedir. Farklı şekillerin üretilmesinde farklı kuvvetlere ve gerilmelere ihtiyaç vardır. Şekillendirilecek malzemenin köşe yarıçaplarının değişimi deformasyonu etkilemektedir. Bu değişikliklerin nedeni geometrik faktörlerin deformasyon akışını etkilemesi ve farklı kuvvetler meydana getirmesidir [79,80,83].

BÖLÜM 5

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. KULLANILAN MALZEME

Bu çalışmada çizelge 5.1’de kimyasal bileşimi verilen AA 2024 alüminyum alaşımı kullanılmıştır. 4 adet 24 mm çapında 1000 mm uzunluğunda AA 2024 alüminyum alaşımı çubuk malzeme T3 halinde ticari olarak temin edilmiştir. Temin edilen bu alüminyum alaşımından ana malzeme, solüsyona alma, yaşlanma ve aşırı yaşlanma şartlarında kullanılmak üzere 60 mm uzunluğunda 48 adet numune kesilmiştir.

Çizelge 5.1. AA 2024 alaşımı ana malzemenin kimyasal kompozisyonu.

Kimyasal Bileşim								
Element	Cu	Mg	Si	Fe	Mn	Cr	Ti	Al
% Ağırlık	4,47	1,16	0,6	0,22	0,26	0,05	0,01	kalan

5.2. SOLÜSYONA ALMA VE YAŞLANDIRMA ISIL İŞLEMİ

Solüsyona alma ve yaşlandırma ısıtma işlemi Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Malzeme laboratuvarında bulunan PROTHERM marka ve PLF 120/27 model sıcaklık kontrollü ısıtma işlem fırınında gerçekleştirilmiştir. Ön çalışma aşamasında optimum yaşlanma ve aşırı yaşlanma evrelerini belirlemek için numuneler farklı sürelerde yaşlanma işlemine tabi tutulmuştur.

Numuneler 520°C’de 2 saat bekletildikten sonra suda soğutularak solüsyona alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Solüsyona alınan numuneler daha sonra 190°C’de 1, 6, 12, 24, 48 ve 72 saat yaşlandırma işleminden sonra havada soğutulmuştur. Farklı yaşlandırma sürelerine tabi tutulan bu numunelerden yapılan sertlik ve mikroyapı incelemeleri sonucunda optimum parametreler belirlenmiştir. Yaşlanan malzeme

için 24 saat ve aşıı yaşılanan malzeme için 72 saat yaşılandırma süresi optimum yaşılanma süresi olarak tespit edilmiştir.

5.3. SERTLİK DENEYİ

Ana malzeme, solüsyona alınan ve 190°C’de farklı sürelerde yaşılandırılan numuneler Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği Mekanik laboratuvarında bulunan SHIMADZU marka mikro sertlik cihazında HV 0,4 (400 g) yük uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Her numuneden 5’er adet ölçüm yapılarak bunların ortalaması alınmış ve sertlik değeri belirlenmiştir. Şekil 5.1’de sertlik işleminin gerçekleştirildiği mikro sertlik cihazı gösterilmektedir.



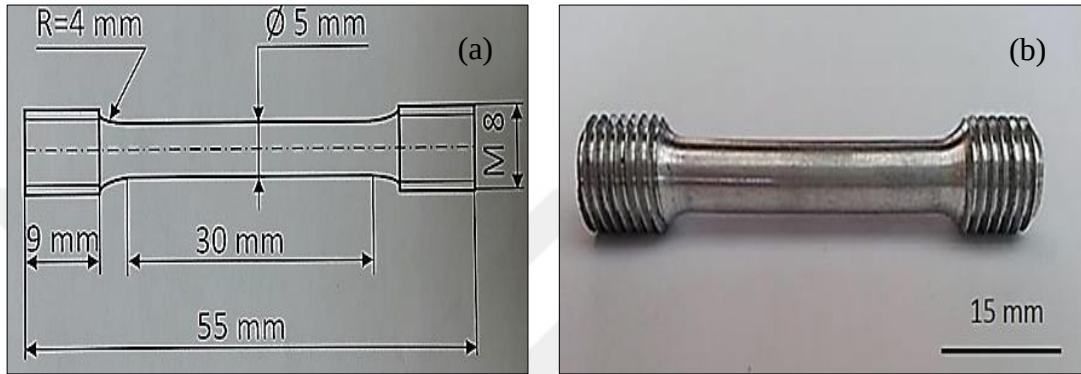
Şekil 5.1. Sertlik cihazı.

5.4. ÇEKME DENEYİ NUMUNELERİNİN HAZIRLANMASI

Çekme numuneleri TS EN ISO 6892-2 normuna göre hazırlanmıştır. Bu amaçla 24 mm çapında 60 mm uzunluğundaki numuneler torna tezgahında 30 mm çekme uzunluğunda ve 5 mm çapında standartlara uygun şekilde işlenmiştir.

Ana malzeme, solüsyona alınan (520°C’de 2 saat bekletilip suda soğutulan numuneler), yaşılanan (520°C’de 2 saat bekletilip suda soğutulan ardından 190°C’de

24 saat bekletilip havada soğutulan numuneler) ve aşırı yaşılanan (520°C’de 2 saat bekletilip suda soğutulan ardından 190°C’de 72 saat bekletilip havada soğutulan numuneler) numunelerin her biri için 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C sıcaklıklarında çekme işlemi yapılmıştır. Her deney şartı için 3 adet numune kullanılmak üzere toplamda 48 adet numune hazırlanmıştır. Şekil 5.2’de çekme deneyi numunesinin teknik resmi ve tornada işlenen son hali gösterilmektedir.



Şekil 5.2. Çekme deneyi numunesi; a) teknik resmi ve b) son hali.

5.5. ÇEKME DENEYİNİN GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Çekme deneyi Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan Zwick/Roell Z600 marka çekme cihazında 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C sıcaklıklarında $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında her deney sıcaklığı için üçer adet numune toplamda ise 12 adet numune kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Ana malzeme, solüsyona alma, yaşılanma ve aşırı yaşılanma şartlarının hepsi için genel toplamda 48 adet numune kullanılmıştır.

Her deney sonrası gerilme-uzama diyagramları elde edilerek, bu diyagramlardan her numune için çekme dayanımı, akma dayanımı (% 0,2), yüzde uzama (%) ve çalışma sertleşmesi oranı (δy) belirlenmiştir. Şekil 5.3’de deneylerde kullanılan çekme test cihazı gösterilmektedir.



Şekil 5.3. Çekme cihazı.

5.6. OPTİK MİKROYAPI İNCELEMELERİ

Mikroyapıları incelenecek numuneler 240, 320, 400, 600, 800, 1000, 1200, 1500 ve 2500 meshlik su zımparalarıyla yüzeydeki çizikler giderilinceye kadar zımparalanmıştır. Ardından numuneler sırasıyla 3 μm ve 1 μm elmas solüsyon ve parlatma keçesi ile parlatma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra parlatılan numuneler hazırlanan 95 ml saf su, 2,5 ml HNO_3 , 1,5 ml HCL ve 1 ml HF Keller çözeltisinde 10-20 saniye tutularak dağlanmıştır. Dağlanan numuneler önce bol su ve ardından methanol ile yıkanarak kurutulmuştur.

Numunelerin optik mikroyapı incelemeleri Karabük Üniversitesi Teknoloji Fakültesi İmalat Mühendisliği görüntüleme laboratuvarında bulunan Nikon Epiphot marka ve Clemex görüntüleme yazılımıyla desteklenmiş optik mikroskopta gerçekleştirilmiştir.

5.7. TARAMALI ELEKTRON MİKROSKOBU (SEM) İNCELEMELERİ

Numunelerin mikroyapı ve kırık yüzey incelemeleri Karabük Üniversitesi Demir Çelik Enstitüsünde bulunan CARL ZEISS ULTRA PLUS GEMINI FESEM marka taramalı elektron mikroskobunda (SEM) gerçekleştirilmiştir.

25°C, 150°C, 250°C ve 350°C’de çekme deneyi uygulanan ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin mikroyapı ve kırık yüzey resimleri alınarak soğuk, ılık ve sıcak deformasyon kabiliyetinin AA 2024 alaşımının mikroyapısına ve kırılma davranışına nasıl etkilediği incelenmiştir. Şekil 5.4’de çalışmada kullanılan SEM mikroskobu gösterilmektedir.



Şekil 5.4. SEM mikroskobu.

BÖLÜM 6

DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

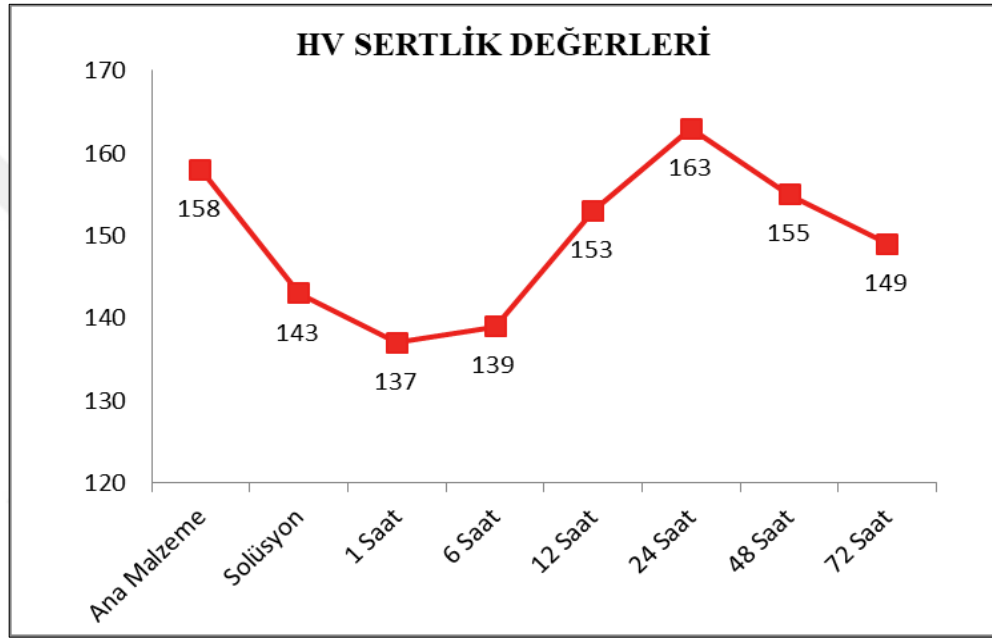
6.1. ÖN ÇALIŞMA SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

AA 2024 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapısal özellikleri ana malzeme, solüsyona alma, solüsyona alındıktan sonra suda soğutma ve ardından 190°C’de farklı zaman aralıklarında yaşlandırma işlemleri için araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar bölüm 6.1.1 ve 6.1.2’de verilerek değerlendirilmiştir.

6.1.1. Ana Malzeme, Solüsyona Alınan ve Yaşlanan Numunelerin Sertlik Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Şekil 6.1’de ana malzeme, 520°C’de 2 saat solüsyona alınan ve solüsyona alındıktan sonra 190°C’de farklı sürelerde yaşlandırılan malzemelerin sertlik değerleri gösterilmektedir. Ana malzemenin 158 Hv, solüsyona alınan malzemenin 143 Hv sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu durum ana malzemenin T3 temper haliyle temin edilmesi ve uygulanan solüsyona alma işlemiyle ana malzemedeki çökeltilerin 520°C’de 2 saat bekletilip ardından suda soğutulması sonucunda çözündüğünü ve buna bağlı olarak sertliğin düştüğünü göstermektedir[93]. Sertlikteki düşüş 190°C’de 1 saat yaşlandırılan malzemede devam etmiştir. Bu durum GPB bölgelerinin alüminyum matrisinde tam anlamıyla oluşmadığını göstermektedir. Literatürde yapılan çalışmalarda kısa süreli yaşlandırma işlemlerinde benzer düşüşler görülmektedir [2,94]. Daha sonra artan yaşlanma süresine bağlı olarak sertlikte artış gözlenmektedir. En yüksek sertlik 24 saat yaşlandırılan malzemede 163 Hv sertlik değeri olarak elde edilmiştir. Bu sertlik artışı matris fazıyla yarı uyumlu ve uyumsuz çökeltilerin (GPB bölgeleri) oluşması ve bu çökeltilerin dislokasyonların hareketini engellemesi ile meydana gelmektedir [37, 41,42,93,95]. 24 saatten sonra artan yaşlanma süresine bağlı olarak sertliğin azaldığı

görülmektedir. Bu süreçte difüzyon hızının yüksek olmasıyla birlikte yapı içerisindeki çökeltiler birbirleriyle etkileşime girerek çökelti sayısında azalma ve boyutunda artış olmaktadır [41,96-98]. Bunun sonucunda artan çökelti boyutuna bağlı olarak dislokasyon hareketleri engellenemez ve sertlikte düşüş meydana gelir. Bu nedenle 72 saat yaşlandırılan malzemede sertlik düşerek 149 Hv sertlik değeri elde edilmiştir. Ön çalışma sonucunda maksimum yaşlanma zamanının 24 saat ve aşırı yaşlanma zamanının ise 72 saat olduğu tespit edilmiştir.



Şekil 6.1. Ana malzeme, 520°C’de solüsyona alınan ve 190°C’de farklı sürelerde yaşlanan numunelerin sertlik sonuçları.

Ön çalışmadan elde edilen verilere dayanarak bundan sonraki yapılacak sonuç ve değerlendirmelerde ana malzeme, solüsyona alınan, 24 saat yaşlandırılan ve 72 saat yaşlandırılan numunelerin mikroyapı ve mekanik özellik ilişkisi tartışılacaktır.

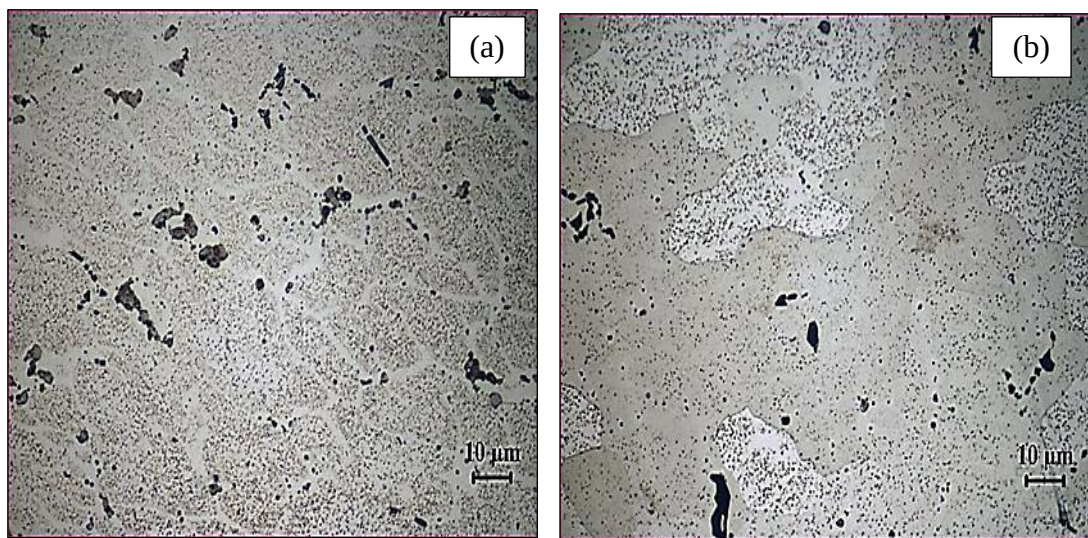
6.1.2. Ana Malzeme, Solüsyona Alınan ve Yaşlanan Numunelerin Mikroyapı Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Bölüm 6.1.1’de elde edilen veriler ışığında şekil 6.2’de ana malzeme, solüsyona alınan, 24 saat ve 72 saat yaşlanan numunelerin mikroyapıları gösterilmektedir. Şekil 6.2 a’da gösterilen ana malzemenin yapısı haddeleme doğrultusunda yönlenmiş T3

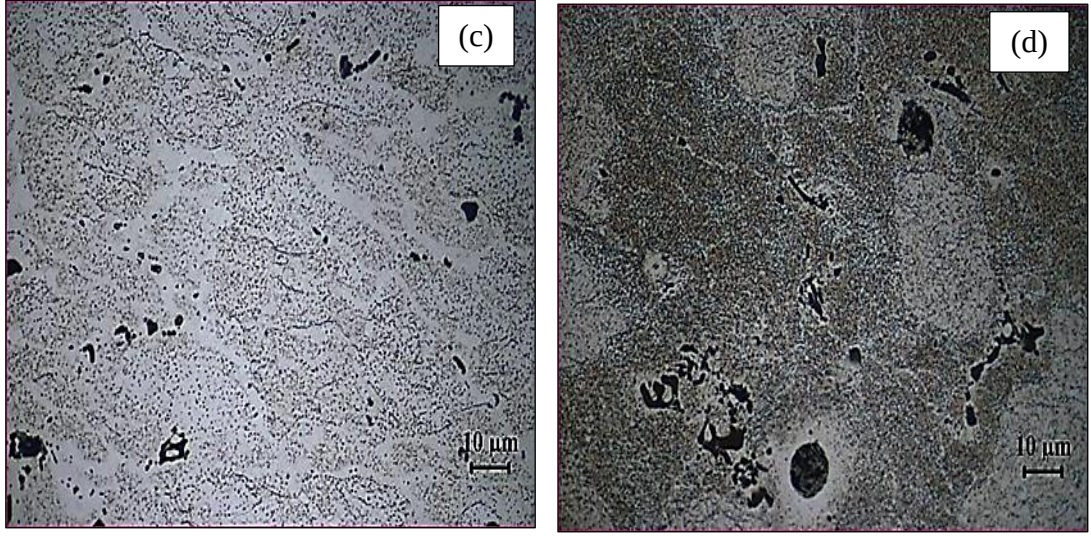
temper koşulundan etkilenmiş alüminyum matrisin içerisinde küçük ikincil faz parçacıklardan oluşmaktadır. Şekil 6.2 b’de mikroyapısı verilen solüsyona alınan malzeme, ana malzemedeki çökeltilerin çözündüğü aşırı doymuş yapıyı göstermektedir. Aynı zamanda solüsyona alınan malzemenin kaba taneli olduğu görülmektedir. Bu yapı şekil 6.1’de görüldüğü gibi sertlikteki düşüşün sebebidir. Solüsyona alınan malzemede çökeltilerin çözünmesi ve yapının kaba taneli olması dislokasyonların hareketini kolaylaştırarak dayanımın düşmesine neden olur [31,99].

24 saat yaşlanan malzeme, şekil 6.2 c’de görüldüğü gibi artan yaşlanma süresine bağlı olarak çökelti sayısının arttığını ve yapıda homojen olarak dağıldığını göstermektedir. Elde edilen bu yapı sertliğin artmasına neden olmaktadır. 24 saat yaşlandırılan malzemede oluşan homojen dağılmış küçük ve orta büyüklükteki çökeltiler dayanımın artmasında önemli rol oynamaktadır [1,24,39,48].

Yaşlanma zamanının 72 saate çıkması ile şekil 6.2 d’de görüldüğü gibi tane sınırlarının belirginleştiği, tane boyutunun arttığı, çökelti sayısında azalma ve boyutunda artış olduğu tespit edilmiştir. Bu tane ve çökelti boyutundaki artış sertlikteki azalmaya etki etmektedir [1,41]. Ana malzeme, solüsyona alınan, 24 ve 72 saat yaşlandırılan malzemedeki çökeltilerin türü, boyutu ve dağılımları SEM sonuçlarının değerlendirilmesi kısmında detaylı olarak tartışılacaktır.



Şekil 6.2. Mikroyapı görüntüleri; a) ana malzeme, b) solüsyona alınan, c) 24 saat yaşlanan ve d) 72 saat yaşlanan numuneler.



Şekil 6.2. (devam ediyor).

6.2. ANA MALZEME, SOLÜSYONA ALINAN, YAŞLANAN VE AŞIRI YAŞLANAN NUMUNELERİN ÇEKME DENEYİ SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C sıcaklıklarında gerçekleştirilen çekme deneyi sonuçlarına yer verilmektedir. Çekme deneyi $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında gerçekleştirilmiştir. Her çekme testi sonrasında gerilme-uzama diyagramı elde edilerek farklı sıcaklıklarda teste tabi tutulan numunelerin maksimum çekme mukavemeti, akma mukavemeti (% 0,2), yüzde uzama (%) ve çalışma sertleşmesi oranı (δy) tespit edilmiştir. Bölüm 6.2.1’de ana malzeme, bölüm 6.2.2’de solüsyona alınan, bölüm 6.2.3’de yaşlanan, bölüm 6.2.4’de aşırı yaşlanan numunelerin test sonuçları yer alırken bölüm 6.2.5.’de ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çekme deneyi sonuçları karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

6.2.1. Ana Malzemenin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

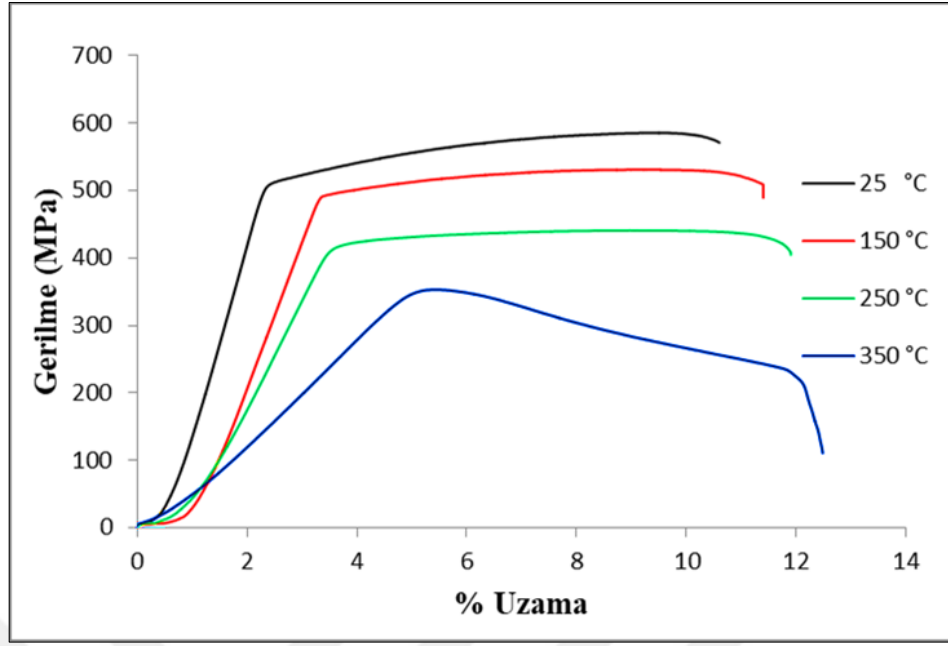
Çizelge 6.1, farklı sıcaklıklarda çekme testine tabi tutulan AA 2024 alaşımının temin edildiği şekliyle (ana malzeme) elde edilen çekme testi sonuçlarını göstermektedir. Test sonuçlarına göre 25°C’de test edilen numunenin çekme ve akma dayanımı

sırasıyla 586 MPa ve 515 MPa'dır. Test sıcaklığının 150°C, 250°C ve 350°C'ye çıkmasıyla çekme ve akma dayanımının düştüğü görülmüştür. Örneğin 350°C'de test edilen numunenin çekme ve akma dayanımı sırasıyla 355 MPa ve 353 MPa olmuştur. Aynı zamanda çizelge 6.1, test sıcaklığının artışına bağlı olarak dayanım değerlerinin düştüğünü belirtmekle birlikte % uzama değerlerinin arttığını göstermektedir. Bu durum 150°C ve üzerindeki sıcaklıklarda malzemede meydana gelen dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşme mekanizmasının aktif olmasıyla açıklanmaktadır. Yeniden kristalleşme süreciyle birlikte tane boyutunda büyüme ve tane boyutunda büyümeye bağlı olarak tane sınırında azalma meydana gelmektedir. Azalan tane sınırlarından dolayı dislokasyonların hareket edebilme kabiliyeti artacak ve dayanımda düşüşe sebep olacaktır [100]. Literatürde yapılan çalışmalarda artan sıcaklığa bağlı olarak mukavemetin azalması dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmeden kaynaklandığı belirtilmektedir [14,17-20,101-103].

Çizelge 6.1. Ana malzemenin çekme testi sonuçları.

Test Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	% 0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
25	586	515	11
150	531	504	11
250	441	428	12
350	355	353	12

Şekil 6.3, 25-350°C aralığında ve $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında test edilen ana malzemenin gerilme-uzama diyagramlarını göstermektedir. Diyagramlardan görüldüğü gibi sıcaklığın artışına bağlı olarak dayanım değerlerinin düştüğü fakat % uzama değerlerinin arttığı görülmektedir. Ayrıca ana malzeme bütün test sıcaklıklarında belirgin olmayan yani sürekli bir akma davranışı sergilemiş olup grafik üzerinde testere dişi davranış göstermemiştir. Bu durum dislokasyonların deformasyon sürecinde rahat hareket ettiğini göstermektedir [100].



Şekil 6.3. Ana malzemenin gerilme-uzama diyagramları.

6.2.2. Solüsyona Alınan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

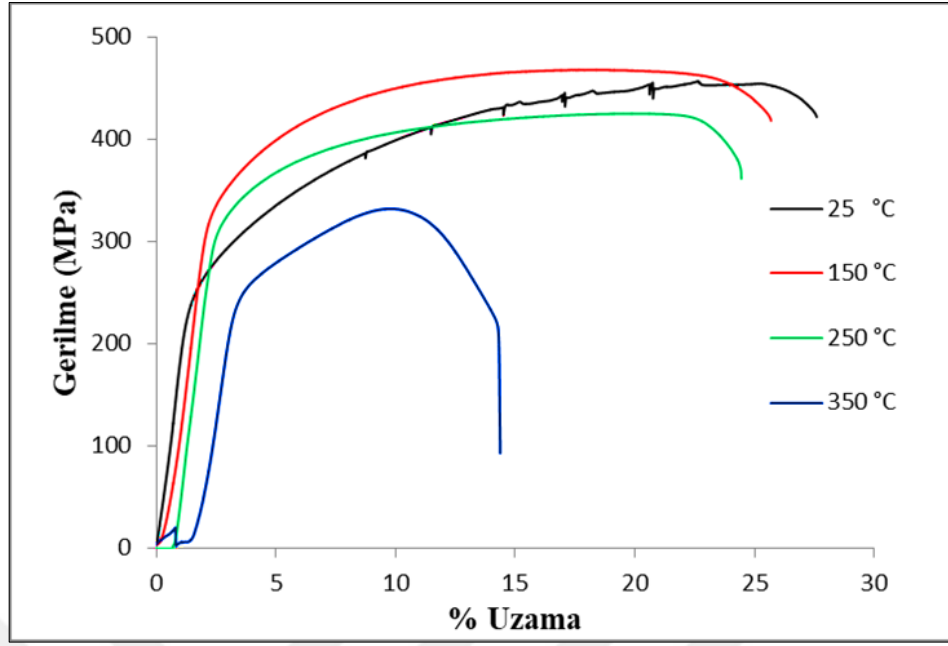
520°C’de 2 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan numunelerin 25-350°C sıcaklık aralığında test edildikten sonra elde edilen sonuçlar çizelge 6.2’de gösterilmektedir. Solüsyona alınan numunenin çekme ve akma dayanımı sırasıyla 457 MPa ve 251 MPa’dır. Test sıcaklığının 25°C’den 150°C’ye çıkması ile çekme ve akma dayanımı 468 MPa ve 349 MPa’a çıkmıştır, fakat % uzama değeri % 28’den % 26’ya düşmüştür. Bu durum 150°C’de teste tabi tutulan numunede çözünen atomların dislokasyonların hareketini engellediğini ve dinamik çökelmeye bağlı olarak mukavemetin arttığını göstermektedir. Artan sıcaklıkla birlikte 250°C ve 350°C’de test edilen numunelerde 150°C’de test edilen numuneye göre akma ve çekme mukavemetinde azalma meydana gelmektedir. Ayrıca, 250°C ve 350°C’de test edilen numunelerin 25°C’de test edilen numuneden daha yüksek akma mukavemeti gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumun numunelerde artan sıcaklıkla birlikte meydana gelen dinamik çökeltiden kaynaklandığı bilinmektedir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak oluşan çökeltilerin kabalaşması mukavemetin düşmesine neden olmaktadır. 25°C-350°C’de test edilen solüsyona alınmış numunelerde dinamik olarak oluşan çökeltilerin boyutları malzemenin mekanik özelliklerini

etkilemektedir. Bu durum literatürde yapılan çeşitli çalışmalarda gösterilmektedir [15,104-107].

Çizelge 6.2. Solüsyona alınan numunelerin çekme testi sonuçları.

Test Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	% 0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
25	457	251	28
150	468	349	26
250	426	302	24
350	332	254	14

Şekil 6.4, 25°C-350°C’de $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında test edilen solüsyona alınmış numunelerin gerilme-uzama grafiklerini göstermektedir. Şekilde görüldüğü gibi 150°C, 250°C ve 350°C’de test edilen numunelerin gerilme-uzama grafikleri, 25°C’de test edilen numunelere göre daha fazla çalışma sertleşmesi davranışı sergilemiştir. Ayrıca 25°C’de test edilen solüsyona alınmış numune PLC etkisi olarak bilinen ve alüminyum alaşımlarında kolaylıkla gözlemlenen testere dişi davranış görülmektedir [108-111]. Metallerde görülen testere dişi davranış yer alan atomların dislokasyonların hareketini engellemesi sonucu ortaya çıkmaktadır [112-115]. Bu mekanizma mukavemetin artmasına katkı sağlamaktadır. Literatür araştırmaları A, B ve C tipi PLC bantlarının alüminyum alaşımlarında oluştuğunu göstermektedir [116-121]. Şekil 6.4.’de görüldüğü gibi 25°C’de test edilen solüsyona alınmış numuneler gerilme-uzama diyagramı üzerinde A tipi PLC bandı sergilemiştir. A tipi PLC bandı en yüksek gerilmede oluşan ve yayılan kayma bandının tekrarlı şekilde çekirdeklenmesiyle meydana gelmektedir [113]. Bu davranış hareketli dislokasyonlarla Cu atomunun veya atom kümelerinin birbirinin hareketini engellemesine bağlı olarak dislokasyon yoğunluğunun artması sonucunda meydana gelmektedir.



Şekil 6.4. Solüsyona alınan numunelerin gerilme-uzama diyagramları.

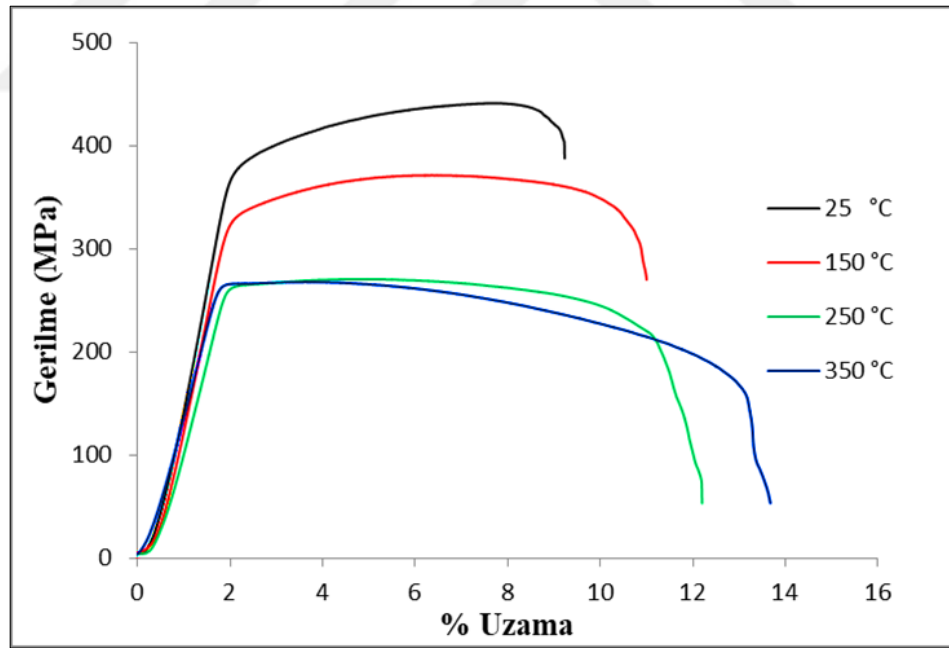
6.2.3. Yaşlanan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 6.3’de 520°C’de 2 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan ve ardından 190°C’de 24 saat yaşlandırılan ve farklı sıcaklıklarda test edilen numunelerin çekme test sonuçları gösterilmektedir. Çizelge 6.3’de görüldüğü gibi 25°C’de teste tabi tutulan numunenin çekme ve akma dayanımı sırasıyla 441 MPa ve 391 MPa’dır. Test sıcaklığının 150°C-350°C’ye çıkmasıyla çekme ve akma dayanımının düştüğü görülmüştür. Örneğin, artan sıcaklıkla birlikte 350°C’de test edilen numunenin çekme ve akma dayanımının sırasıyla 268 MPa ve 266 MPa olmuştur. Çizelge 6.3’de görüldüğü gibi artan sıcaklığa bağlı olarak çekme ve akma dayanımında azalma, % uzamada ise artış meydana gelmiştir. 150°C’nin üzerindeki sıcaklıklarda dayanımdaki düşüşün daha hızlı olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda artan sıcaklıkla birlikte mukavemetin azalmasının deformasyon sürecinde meydana gelen dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmeden kaynaklandığı bildirilmektedir [14,17-20,101-103].

Çizelge 6.3. Yaşlanan numunelerin çekme testi sonuçları.

Test Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	% 0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
25	441	391	9
150	371	337	11
250	270	264	12
350	268	266	14

Şekil 6.5’de 520°C’de 2 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan ve ardından 190°C’de 24 saat yaşlandırılan ve farklı sıcaklıklarda çekme testi uygulanan numunelerin gerilme- uzama grafiklerini göstermektedir. Şekil 6.5’de görüldüğü gibi sıcaklığın artışına bağlı olarak dayanım değerlerinin düştüğü, fakat % uzama değerlerinin arttığı açık bir şekilde görülmektedir. Ayrıca yaşlanma işlemi uygulanan numunelerin ana malzeme gibi bütün test sıcaklıklarında belirgin olmayan yani sürekli bir akma davranışı sergilemiştir. Ayrıca grafiklerin hepsinde yani bütün test sıcaklıklarında testere dişi davranış görülmemiştir.



Şekil 6.5. Yaşlanan numunenin gerilme-uzama diyagramları.

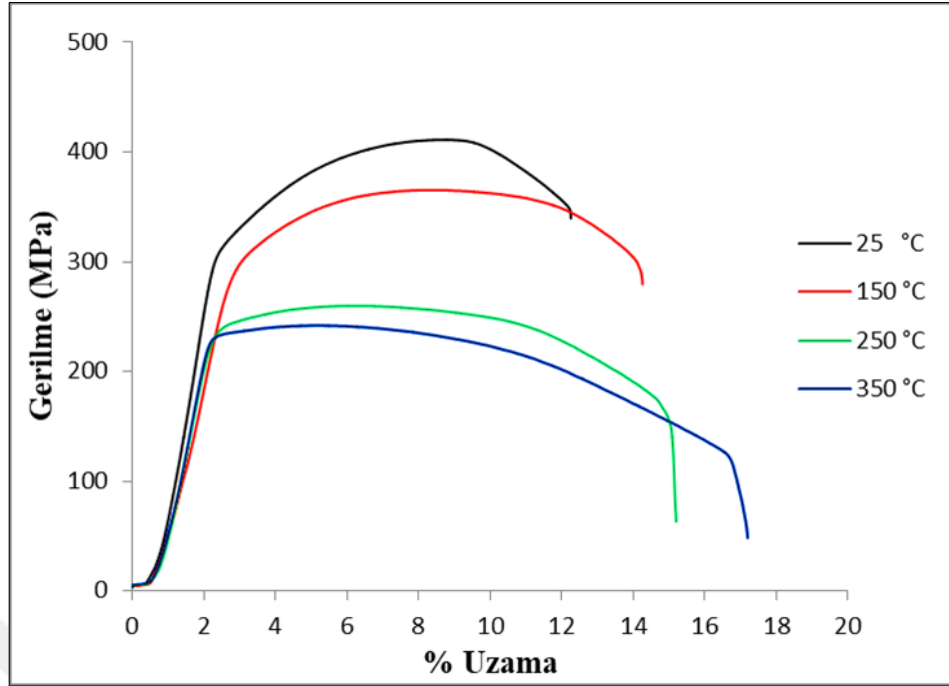
6.2.4. Aşırı Yaşlanan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Çizelge 6.4’de 520°C’de 2 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan ve ardından 190°C’de 72 saat yaşlandırılan numunelerin farklı sıcaklıktaki çekme testi sonuçları gösterilmektedir. Çizelge 6.4’de görüldüğü gibi 25°C’de test edilen numunenin çekme ve akma dayanımı sırasıyla 411 MPa ve 324 MPa’dır. Test sıcaklığının 150°C-350°C’ye çıkmasıyla çekme ve akma dayanımının düştüğü görülmüştür. Örneğin artan sıcaklıkla birlikte 350°C’de test edilen numunede çekme ve akma dayanımı sırasıyla 242 MPa ve 234 MPa olmuştur. Ayrıca artan deformasyon sıcaklığına bağlı olarak çekme ve akma dayanımında azalma, olurken % uzamada artış olduğu görülmektedir. Bu durum aşırı yaşlanan numunede kaba çökeltilerin bulunmasına ve test sıcaklığının artmasına bağlanabilir. Kaba çökeltiler, dislokasyon hareketini yeterli düzeyde engelleyemediği için aşırı yaşlanan numunelerin mukavemeti düşmüş, fakat % uzama değerleri artmıştır. Çökeltilerin kabalaşması mukavemetin düşmesine neden olan önemli bir parametredir [15].

Çizelge 6.4. Aşırı yaşlanan numunelerin çekme testi sonuçları.

Test Sıcaklığı (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	% 0,2 Akma Dayanımı (MPa)	Yüzde Uzama (%)
25	411	324	12
150	365	310	14
250	260	239	15
350	242	234	17

Şekil 6.6’da 520°C’de 2 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan ve ardından 190°C’de 72 saat yaşlandırılan ve farklı sıcaklıklarda çekme testi uygulanan numunelerin gerilme-uzama grafikleri gösterilmektedir. Şekil 6.6’da görüldüğü gibi aşırı yaşlanan numunelerin gerilme-uzama grafikleri ana malzeme ve yaşlanan numuneler gibi benzer davranış göstermiştir. Aşırı yaşlanan numunelerin dayanım değerleri artan test sıcaklığına bağlı olarak düşerken, % uzama değerleri artmıştır. Ayrıca aşırı yaşlanan numuneler bütün test sıcaklıklarında belirgin akma davranışı göstermemiştir.

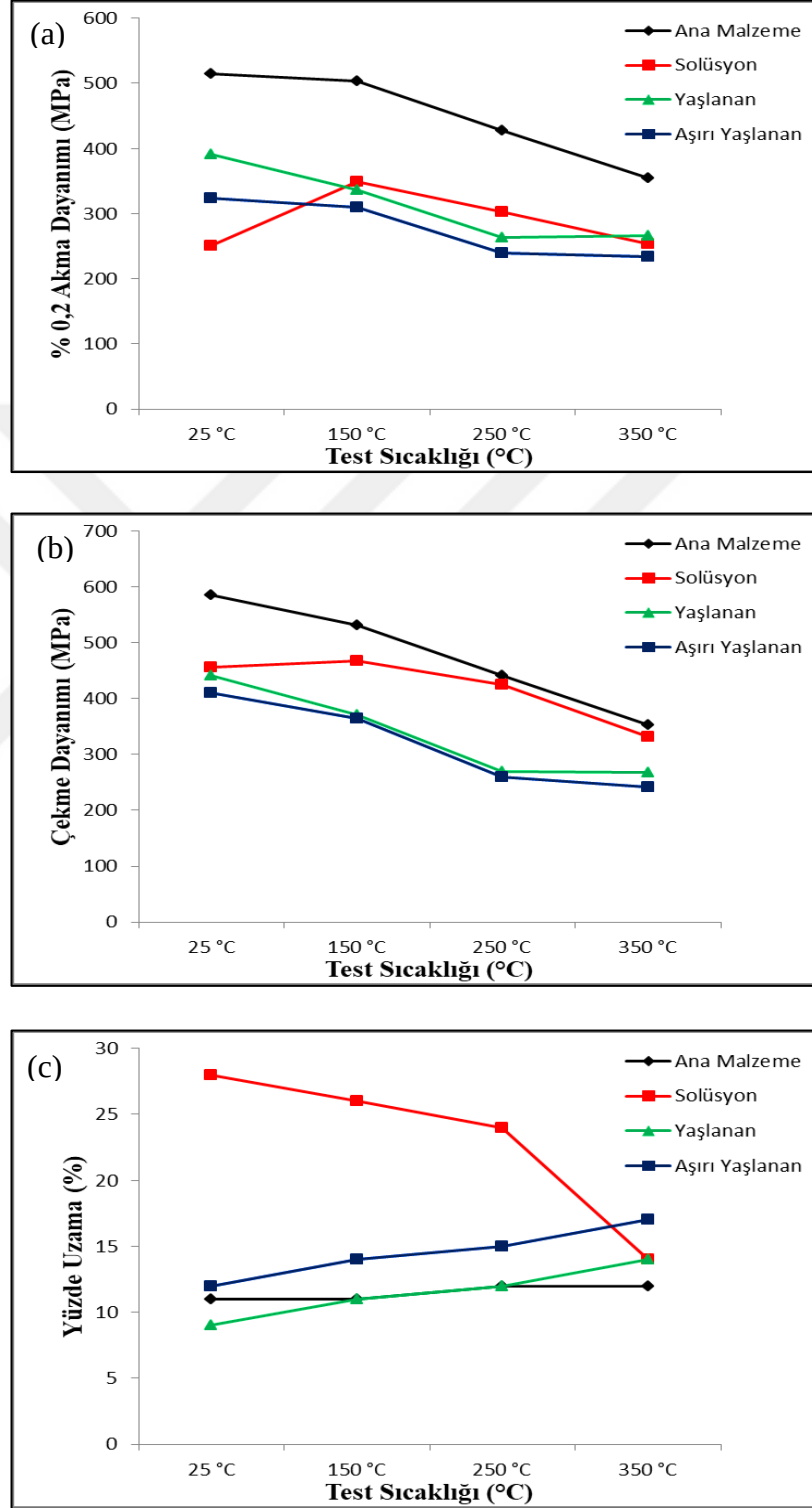


Şekil 6.6. Aşırı yaşlanan numunelerin gerilme-uzama diyagramları.

6.2.5. Ana Malzeme, Solüsyona Alınan, Yaşlanan ve Aşırı Yaşlanan Numunelerin Çekme Deneyi Sonuçlarının Karşılaştırmalı Olarak Değerlendirilmesi

Şekil 6.7 ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çekme, akma ve % uzama değerlerini test sıcaklığına bağlı olarak göstermektedir. Şekil 6.7’de görüldüğü gibi ana malzemenin akma dayanımı 515 MPa olarak tespit edilmiştir. En düşük akma dayanımı 520°C’de 2 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan numunede 251 MPa olarak elde edilmiştir. Akma dayanımının solüsyona alma sonrası 190°C’de 24 saat yaşlandırılan numunelerde artarak 391 MPa’a çıktığı görülmüştür. Yaşlanma zamanını 24 saatten 72 saate çıkmasıyla birlikte akma dayanımının tekrar düşerek 324 MPa olduğu tespit edilmiştir. Benzer sonuçlar çekme dayanımında da görülmekle birlikte solüsyona alınan numuneler daha fazla Al ve Cu gibi yer alan atomlarını katı çözelti içerisinde serbest olarak barındırdığı için yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelere kıyasla biraz daha yüksek çekme dayanımı sergilemiştir. Ayrıca ana malzemenin % uzama değeri % 11 iken solüsyona alınan numunelerde en yüksek değerine ulaşarak % 28 olmuştur. Solüsyona alma işlemi sonrası 190°C’de 24 saat yaşlandırılan numunede % uzama değerinin % 9’a düştüğü

tespit edilmiştir. Aşırı yaşılanan numunenin % uzaması 190°C’de 72 saat yaşılandırıldıktan sonra % 12’ye yükseldiği görülmüştür.



Şekil 6.7. Ana malzeme, solüsyona alınan, yaşılanan ve aşırı yaşılanan numunelerin çekme deneyi sonuçları; a) % 0,2 akma dayanımı, b) çekme dayanımı ve c) yüzde uzama değerleri.

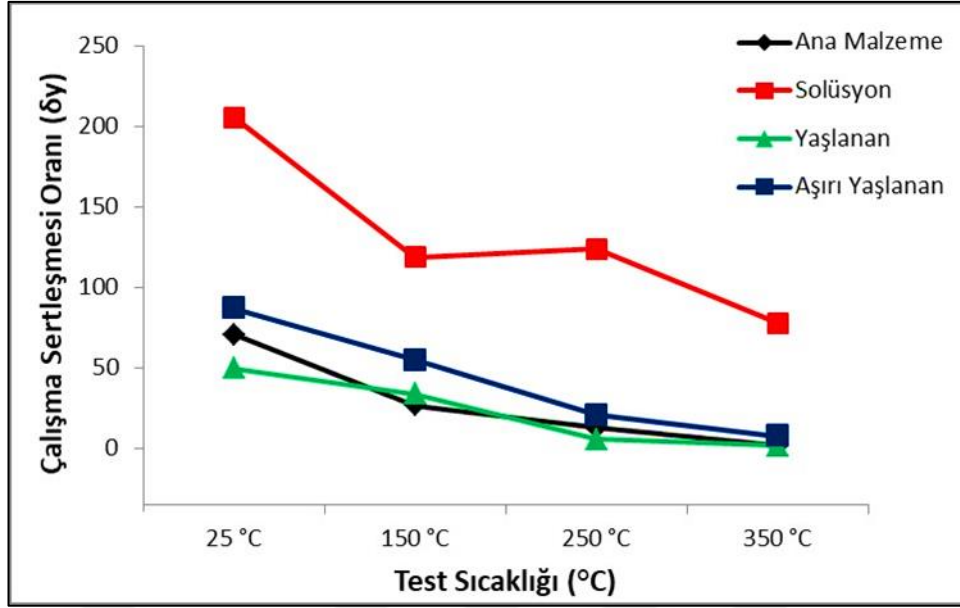
Elde edilen sonuçlar solüsyona alma işleminin, yaşlandırma sıcaklığının ve zamanının AA 2024 alüminyumun çökeltme sertleşmesinde çok önemli bir rol oynadığını açık bir şekilde göstermektedir. Kararlı (S''), yarı kararlı (S') ve Al_2Cu veya Al_2CuMg gibi kararlı olmayan (S) çökeltilerinin oluşmasıyla farklı mukavemet ve sünekliliğin elde edildiği bilinmektedir. Yapay yaşlanma işlemiyle S tipi çökeltiler oluşmaya başlar ve yaşlanma süresine bağlı olarak hacimsel oranı artar. Bunun bir sonucu olarak, alaşımın mukavemeti yükselir, ancak % uzaması düşer. Yaşlanma süresindeki daha fazla artış, daha büyük S tipi çökeltilerin oluşmasına yol açar ve AA 2024 alaşımının mukavemetinde düşüş, % uzamasında ise artış meydana gelir [122-125].

Şekil 6.7'de görüldüğü gibi ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çekme ve akma dayanım değerleri, $25^{\circ}C$ - $350^{\circ}C$ test sıcaklığı aralığında sürekli azalmıştır. Bununla birlikte solüsyona alınan numunelerin test sıcaklığı $150^{\circ}C$ 'ye yükseldiğinde çekme ve akma mukavemetinde artış gözlenmektedir. Test sıcaklığının $250^{\circ}C$ ve $350^{\circ}C$ 'ye yükselmesiyle birlikte akma ve çekme dayanımı düşmüştür. Bu durum $150^{\circ}C$ 'de sıcak çekme testinden sonra solüsyona alınan numunede dinamik çökeltmenin gerçekleştiğini göstermektedir. Bu sonuç, $-50^{\circ}C$ - $150^{\circ}C$ sıcaklık aralığında test edildikten sonra AA 2024 alaşımında önemli bir deformasyon sertleşmesi gözlemleyen ve malzemenin $300^{\circ}C$ ve üzeri sıcaklıkta deformasyon sertleşmesinin oluşmadığı sonucuna varmış olan Seidt ve Gilat'ın çalışması ile tutarlıdır [14]. Yukarıda bahsedilen tartışmadan, $300^{\circ}C$ ve üzerindeki sıcaklıklarda basma, burulma ve çekme deneyi testlerinden sonra malzemede gerilme yumuşamasının meydana geldiği açıktır. Bu yumuşama etkisi, diğer araştırmacılar tarafından önerildiği gibi dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmeden kaynaklanmaktadır [19,20].

Ayrıca şekil 6.7'de görüldüğü gibi test sıcaklığı $150^{\circ}C$ - $350^{\circ}C$ 'ye yükseldiğinde ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin uzamasında sürekli bir artış olmuştur. Bunun nedeni ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerde meydana gelen dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmedir. Test sıcaklığı arttıkça tane sınırının kilit etkisi zayıflamaktadır. Bununla birlikte solüsyona alınan numunelerin % uzama değerlerinde ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan

numunelere kıyasla artan test sıcaklığına bağlı olarak sürekli bir düşüş görülmüştür [106,107]. Bilindiği gibi, solüsyona alınan numunelerde, tam çökme için yeterli zaman vermeyen yüksek soğutma hızı nedeniyle katı çözeltilerde daha fazla Al, Cu ve Mg atomu bulunmaktadır [126]. Bununla birlikte solüsyona alınan numuneler 150°C-350°C’de çekme testine tabi tutulduğunda bu numunelerde dinamik çökme gerçekleşmektedir. Solüsyona alınan numunelerde oluşan çökeltiler dayanımı artırırken uzama değerlerini düşürmektedir. Örneğin solüsyona alınmış numuneler 150°C, 250°C ve 350°C’de test edildiğinde 25°C’ye göre akma dayanımında sırasıyla % 39, % 20 ve % 1 oranında bir artış olmuştur. Bu durum solüsyona alınan numunelerde dinamik çökmenin çok aktif olduğunu göstermektedir.

Yer alan ve arayer atomlarının dislokasyonların hareketini engellemesi ile oluşan dinamik yaşlanma (PLC) etkisini araştırmak için ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çalışma sertleşmesi oranı (δy) hesaplanmıştır [127]. Çalışma sertleşmesi oranı (δy) 25°C-350°C’de test edilen numunelerin maksimum çekme mukavemeti ile % 0,2 akma mukavemeti arasındaki fark dikkate alınarak hesaplanmıştır. Şekil 6.8’de görüldüğü gibi test sıcaklığı 150°C’ye yükseldiğinde solüsyona alınan numunenin çalışma sertleşmesi oranının azaldığı ve daha sonra test sıcaklığına bağlı olarak arttığı görülmektedir. 350°C’de test edilen numunede ise çalışma sertleşmesi oranının düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çalışma sertleşmesi oranı 25°C-350°C test sıcaklığı aralığında sürekli düşüş göstermiştir. Mevcut çalışmalardan elde edilen sonuçlar, tüm test sıcaklıklarında ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelere kıyasla solüsyona alınan numunelerin çalışma sertleşmesi oranında daha fazla artış olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum solüsyona alınan numunelerin dinamik deformasyon yaşlanması ve dinamik çökme derecesinin ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerden çok daha yüksek olduğunu göstermektedir.



Şekil 6.8. Ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çalışma sertleşmesi oranının test sıcaklığına bağlı olarak değişimi.

6.3. SEM SONUÇLARININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Bu bölümde, 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C’de test edilen ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin SEM mikroyapı ve kırık yüzey analizleri yapılarak değerlendirilmiştir.

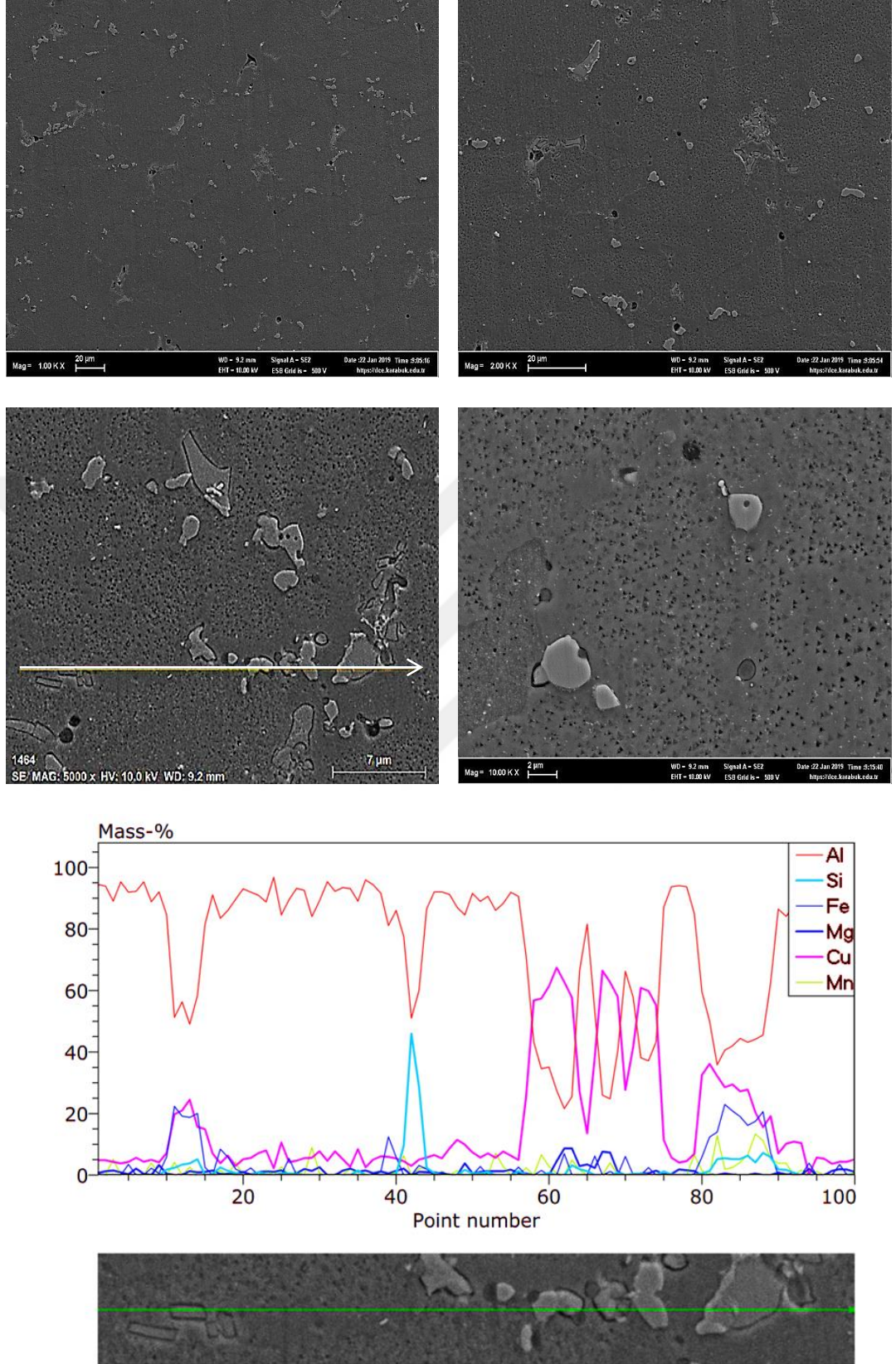
6.3.1. SEM Mikroyapı Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C test sıcaklıklarında ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin mikroyapı görüntüleri değerlendirilmiştir. Şekil 6.9, 10, 11 ve 12 sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C’de test edilen ana malzemenin SEM mikroyapı resimlerini göstermektedir.

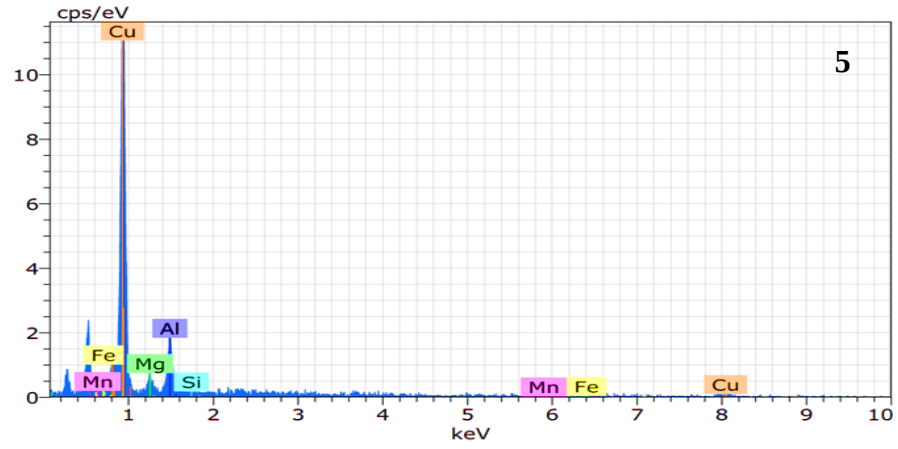
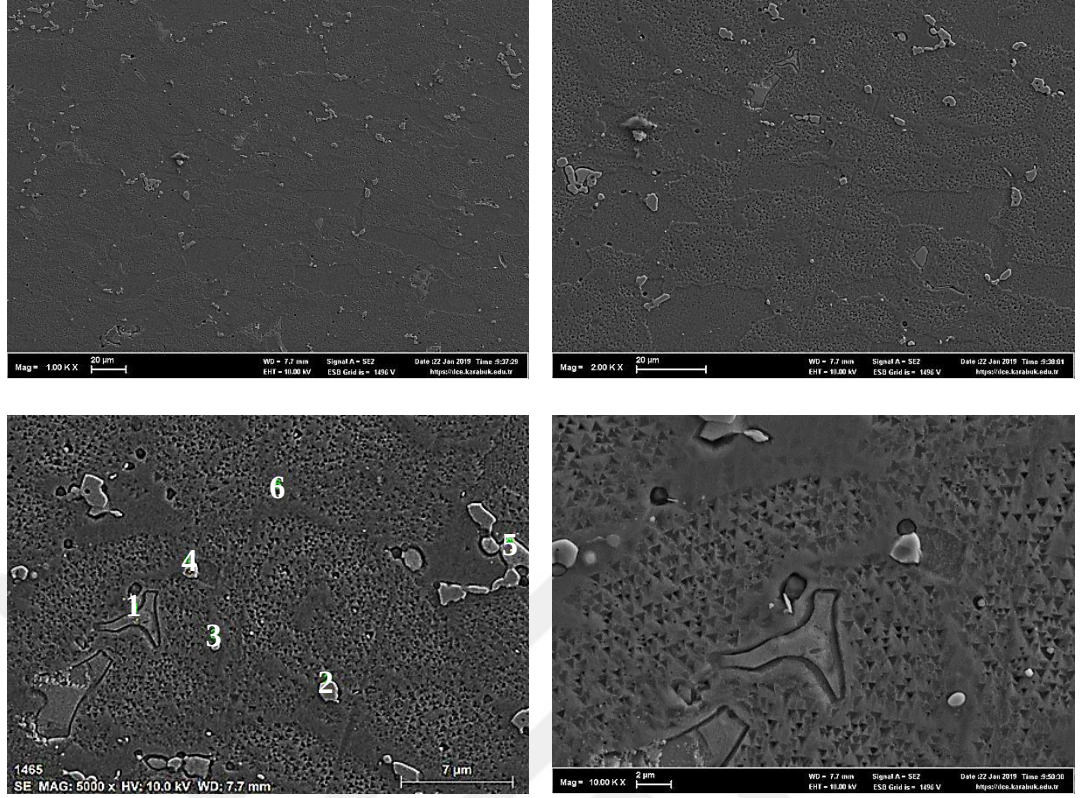
Şekil 6.9, 25°C’de test edilen ana malzemenin farklı büyütme oranlarında alınan SEM mikroyapı resimlerini göstermektedir. SEM mikroyapı resimlerinde görüldüğü gibi ana malzeme, T3 doğal yaşlanma şartlarında oluşan eş eksenli alüminyum tanelerin içerisinde dağılmış küçük çökelti parçacıklarını içermektedir. Bu çökelti parçacıkları ana malzemenin dayanımının artmasına katkı sağlayarak en yüksek dayanım değerleri sergilemesine neden olmuştur. Literatür araştırması AA 2024 alanında

homojen olarak dağılmış çökelti parçacıklarının alaşımın dayanımına önemli katkı sağladığını göstermektedir [1]. Test sıcaklığının 150°C, 250°C ve 350°C'ye çıkması ile difüzyon hızının artmasına bağlı olarak şekil 6.10-6.12'de görüldüğü gibi çökelti boyutlarının arttığı tespit edilmiştir. Artan çökelti boyutunun yapılan çekme testi sonuçlarında görüldüğü gibi artan sıcaklıkla birlikte mukavemetin azalmasına sebep olduğu tespit edilmiştir.

Ayrıca şekiller 6.9-6.12 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C'de çekme testi uygulanan numunelerin çizgi ve nokta EDS analizlerini göstermektedir. Yapılan analizler sonucunda AA 2024 ana malzemenin iç yapısında homojen olarak dağılmış Al_2CuMg ve Al (Cu, Fe, Mn, Si) çökeltilerinin olduğu görülmüştür.

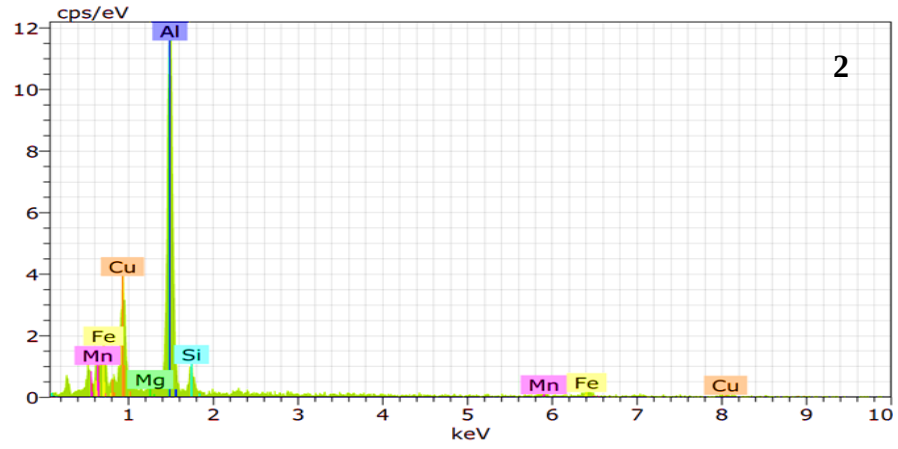
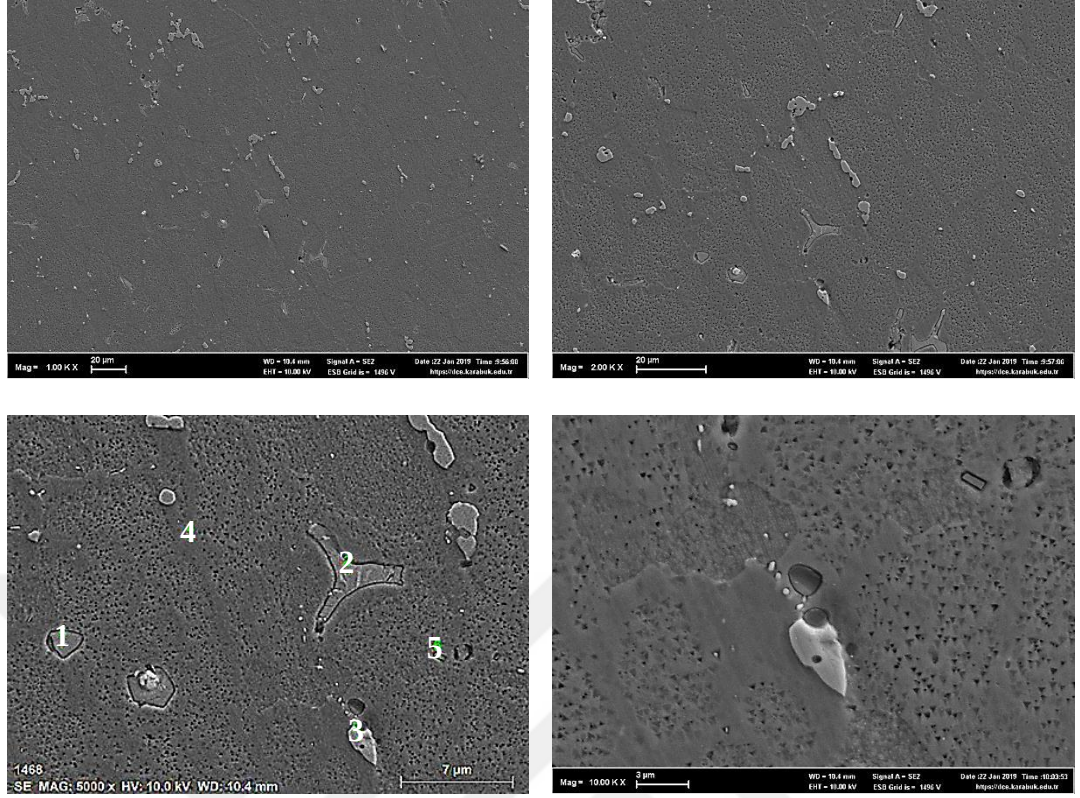


Şekil 6.9. 25°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütmelelerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve çizgi EDS analizi.



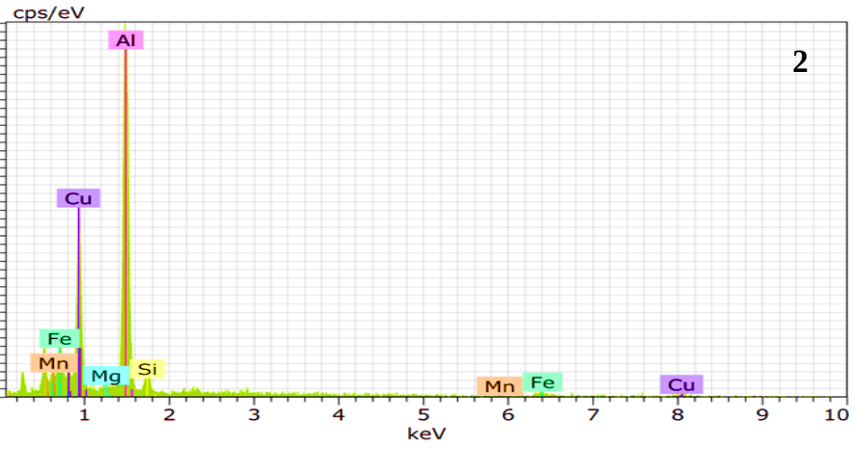
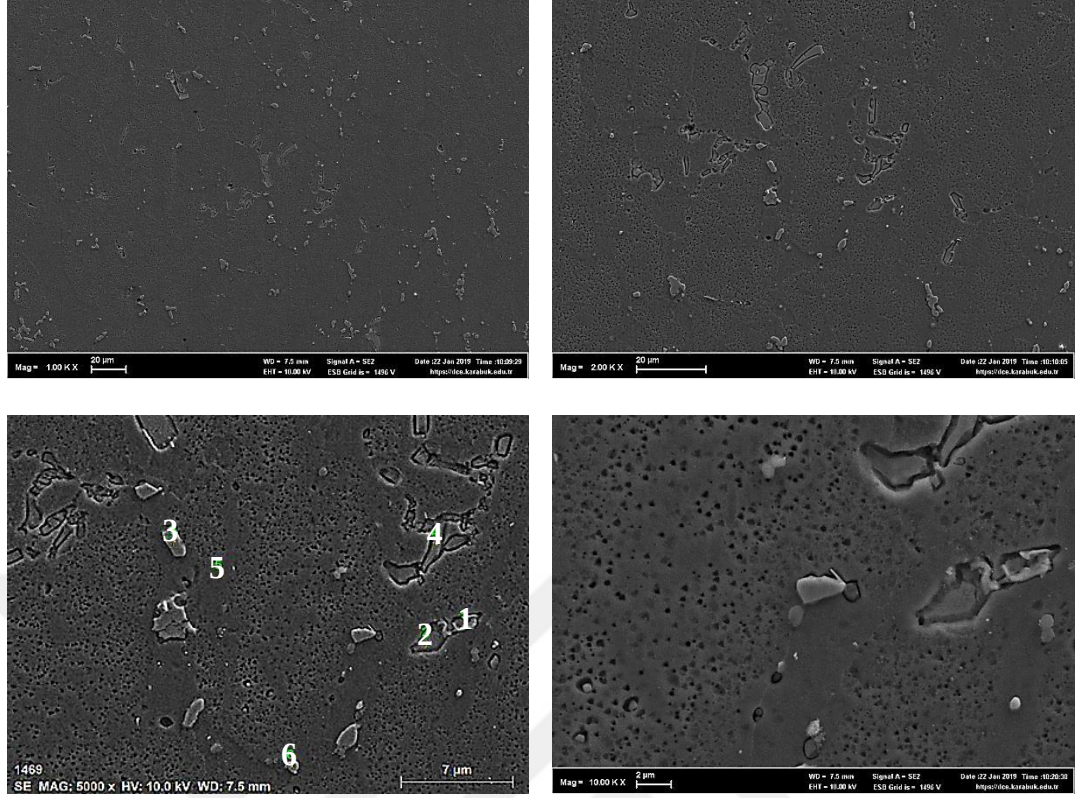
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.00	49.04	5.60	5.90	13.90	25.56
2	0.10	38.72	0.24	0.00	0.50	60.43
3	1.19	48.13	0.05	0.12	0.41	50.10
4	0.24	38.42	0.09	0.63	0.00	60.62
5	2.99	9.23	0.00	0.00	1.13	86.65
6	2.03	86.86	0.05	1.42	1.78	7.86
Mean value:	1.09	45.07	1.01	1.35	2.95	48.54
Sigma:	1.22	25.06	2.25	2.30	5.40	28.02
Sigma mean:	0.50	10.23	0.92	0.94	2.20	11.44

Şekil 6.10. 150°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütmelerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.19	46.03	5.49	4.28	15.46	28.55
2	0.44	45.42	4.76	5.34	14.94	29.09
3	0.83	38.75	0.09	0.21	0.00	60.13
4	1.54	91.15	0.06	0.00	0.36	6.88
5	1.35	65.57	0.88	3.04	6.77	22.39
Mean value:	0.87	57.39	2.26	2.57	7.51	29.41
Sigma:	0.58	21.37	2.65	2.40	7.52	19.37
Sigma mean:	0.26	9.56	1.19	1.07	3.37	8.66

Şekil 6.11. 250 °C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.

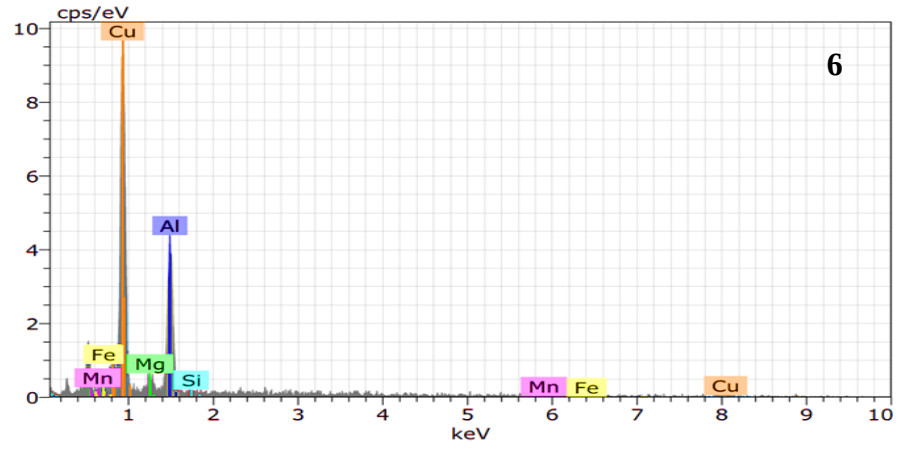
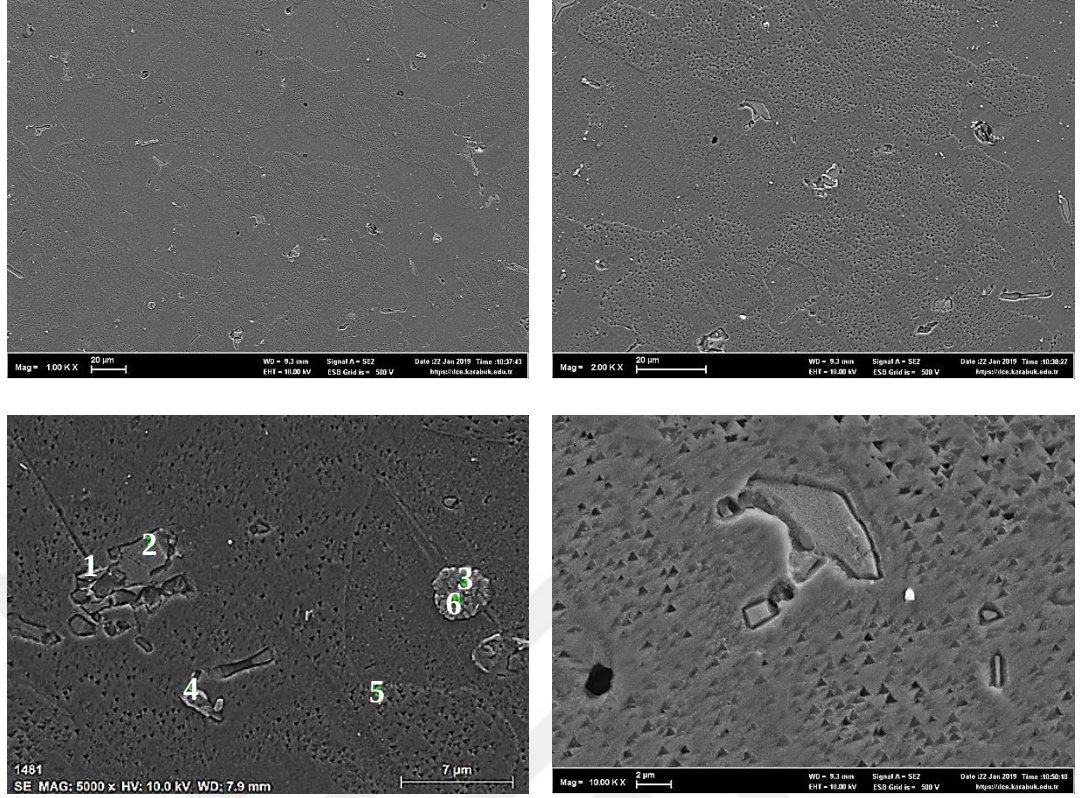


Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.81	61.40	0.18	0.00	1.68	35.94
2	0.11	43.41	3.46	3.00	10.89	39.14
3	1.77	59.49	0.79	0.34	1.54	36.07
4	0.76	51.38	3.62	8.02	16.16	20.07
5	1.77	90.04	0.00	0.00	1.58	6.61
6	1.16	82.30	0.13	0.63	0.00	15.79
Mean value:	1.06	64.67	1.36	2.00	5.31	25.60
Sigma:	0.64	18.00	1.71	3.16	6.61	13.32
Sigma mean:	0.26	7.35	0.70	1.29	2.70	5.44

Şekil 6.12. 350 °C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.

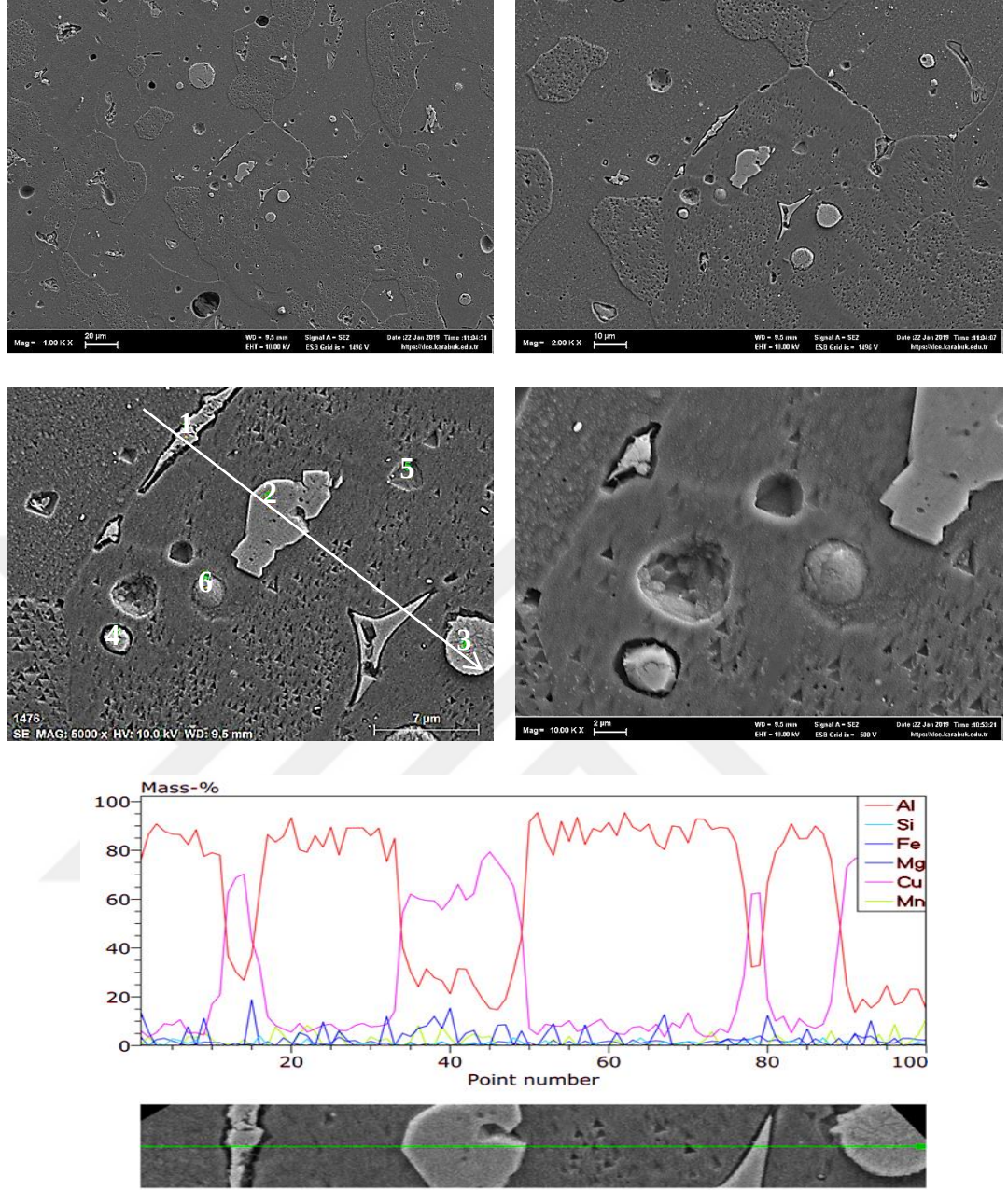
Şekil 6.13, 14, 15 ve 16’da sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C’de test edilen solüsyona alınmış numunelerin SEM mikroyapı resimleri gösterilmektedir. Şekil 6.13 statik olarak oluşan çökeltileri gösterirken, şekil 6.14, 6.15 ve 6.16 deformasyon sıcaklığına bağlı olarak dinamik oluşan çökeltileri göstermektedir. Bu durum çökeltilerin solüsyona alınan numunelerde oluştuğunu ve test sıcaklığının artmasıyla kabalaştığını göstermektedir. Mikroyapı görüntüleri 150°C’de çekme testine tabi tutulan numunelerde taneler içerisinde karmaşık veya yuvarlak şekilli ince çökeltilerin oluştuğunu işaret etmektedir. Kompleks veya yuvarlak şekilli çökeltilerin boyutu, test sıcaklığının 250°C ve 350°C’ye yükselmesiyle artarak kabalaşmaktadır. Benzer sonuçlar 2024 ve 6A02 alüminyum alaşımının sıcak deformasyonu konusunda yapılan araştırmalarda bazı yazarlar tarafından bildirilmiştir [15,106].

Şekil 6.15’de 250°C’de test edilen solüsyona alınmış numunenin 1 numaralı noktasının Al, Si, Mn, Fe ve Cu, 2-6 arasındaki noktaların ise Al, Mg ve Cu içerdiği görülmüştür. Bu elementlerin varlığı $(\text{Fe, Mn})_3\text{Si}_2\text{Al}_{15}$, Al_2Cu veya Al_2CuMg çökeltilerinin 250°C’de test edilen solüsyona alınmış numunede oluştuğunu göstermektedir. Bu çökelti AA 2024 alaşımının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Elde edilen sonuçlar Zhang ve Baker’in yapmış olduğu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile paralellik göstermektedir [105].

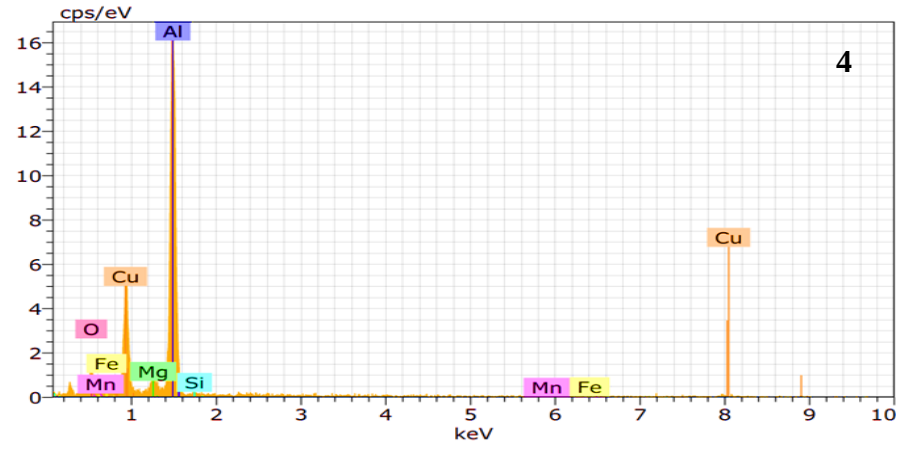
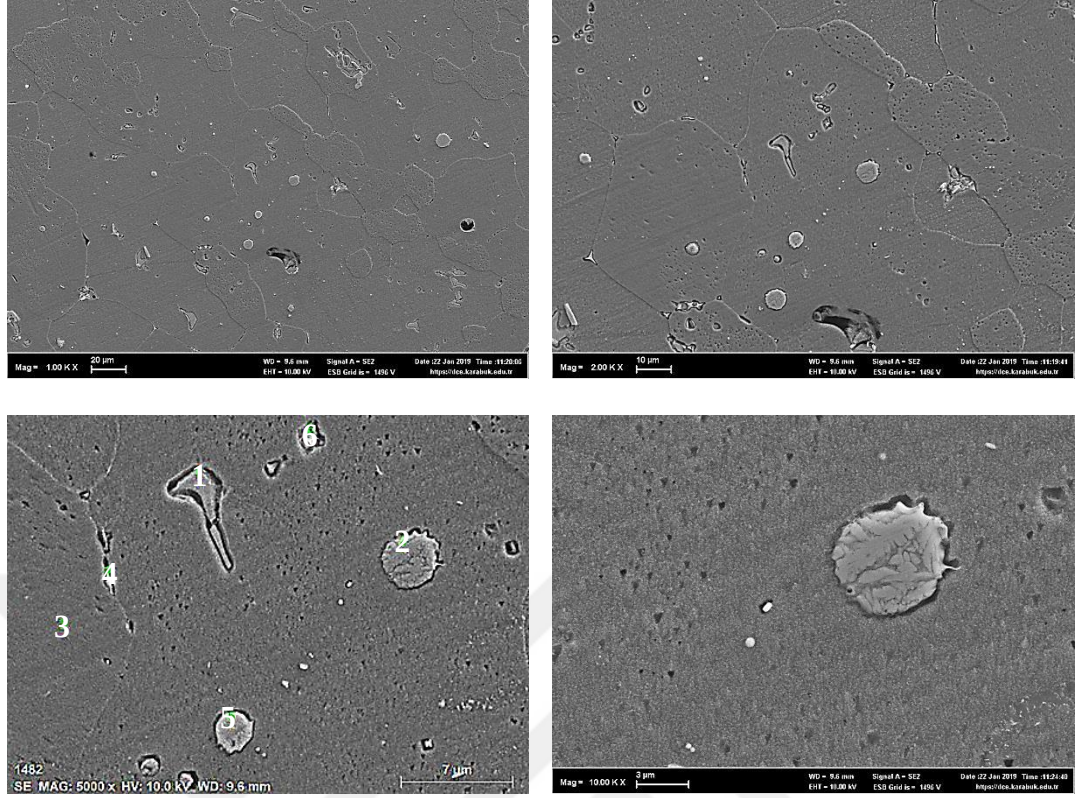


Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.42	63.02	27.17	0.23	0.00	8.15
2	0.00	43.72	4.98	5.37	15.07	30.86
3	3.89	24.69	0.47	0.12	0.00	70.83
4	0.13	41.78	2.20	3.34	11.24	41.31
5	1.63	88.21	0.25	1.73	0.44	7.74
6	2.53	22.26	0.40	0.32	0.00	74.49
Mean value:	1.60	47.28	5.91	1.85	4.46	38.90
Sigma:	1.47	24.91	10.57	2.12	6.85	29.23
Sigma mean:	0.60	10.17	4.32	0.87	2.80	11.93

Şekil 6.13. 25°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütmelerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.

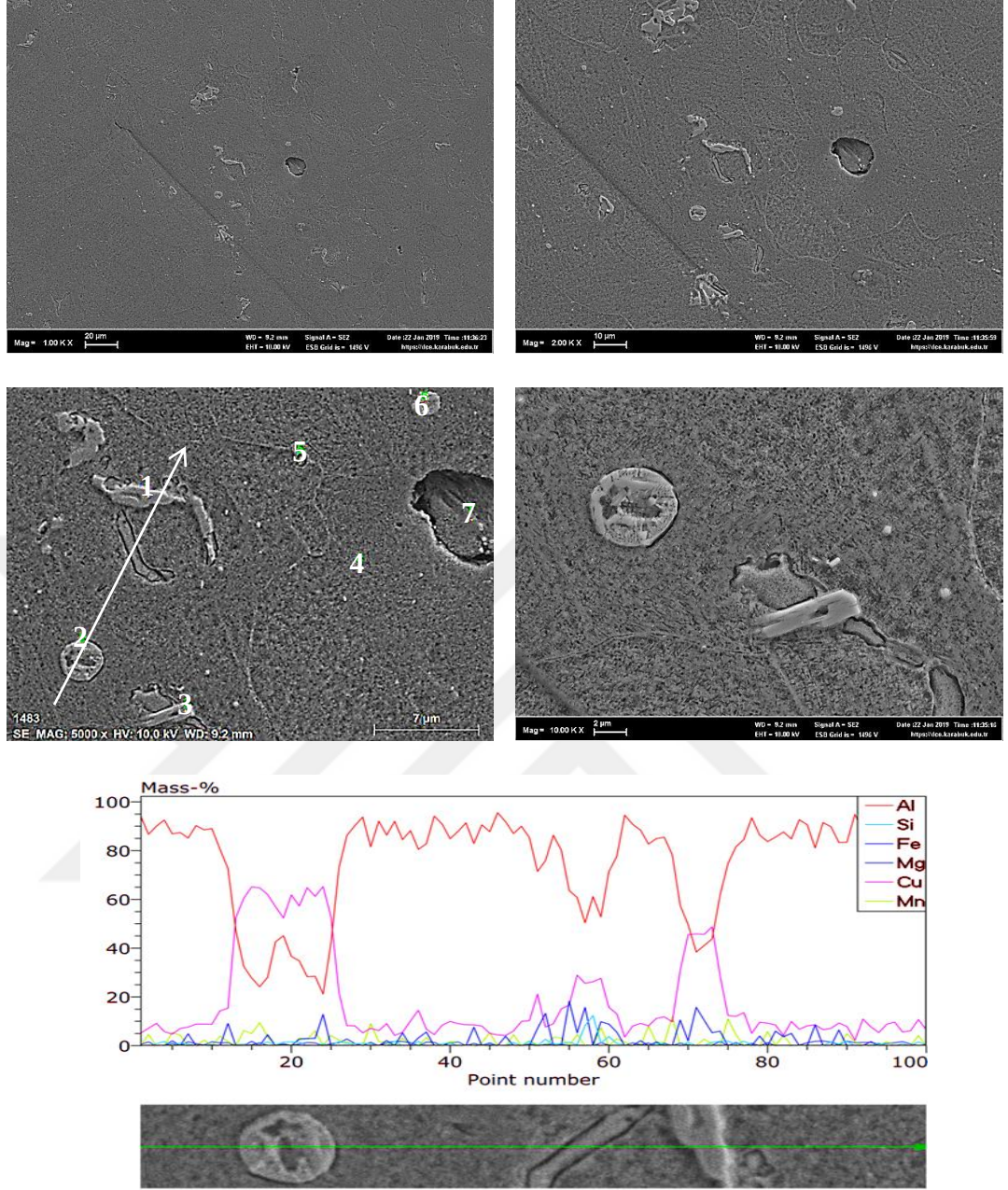


Şekil 6.14. 150°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)							
Spectrum	O	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	4.50	0.00	35.42	3.99	3.22	12.05	40.83
2	7.52	1.93	25.45	0.14	0.00	0.00	64.97
3	2.03	1.86	86.21	0.10	0.00	0.28	9.51
4	5.32	2.65	59.68	0.51	0.10	0.26	31.48
5	9.64	2.28	19.13	0.39	0.00	0.04	68.52
6	7.50	1.56	36.41	0.16	0.83	0.03	53.51
Mean value:	6.08	1.71	43.72	0.88	0.69	2.11	44.80
Sigma:	2.69	0.92	24.99	1.53	1.28	4.87	22.29
Sigma mean:	1.10	0.38	10.20	0.63	0.52	1.99	9.10

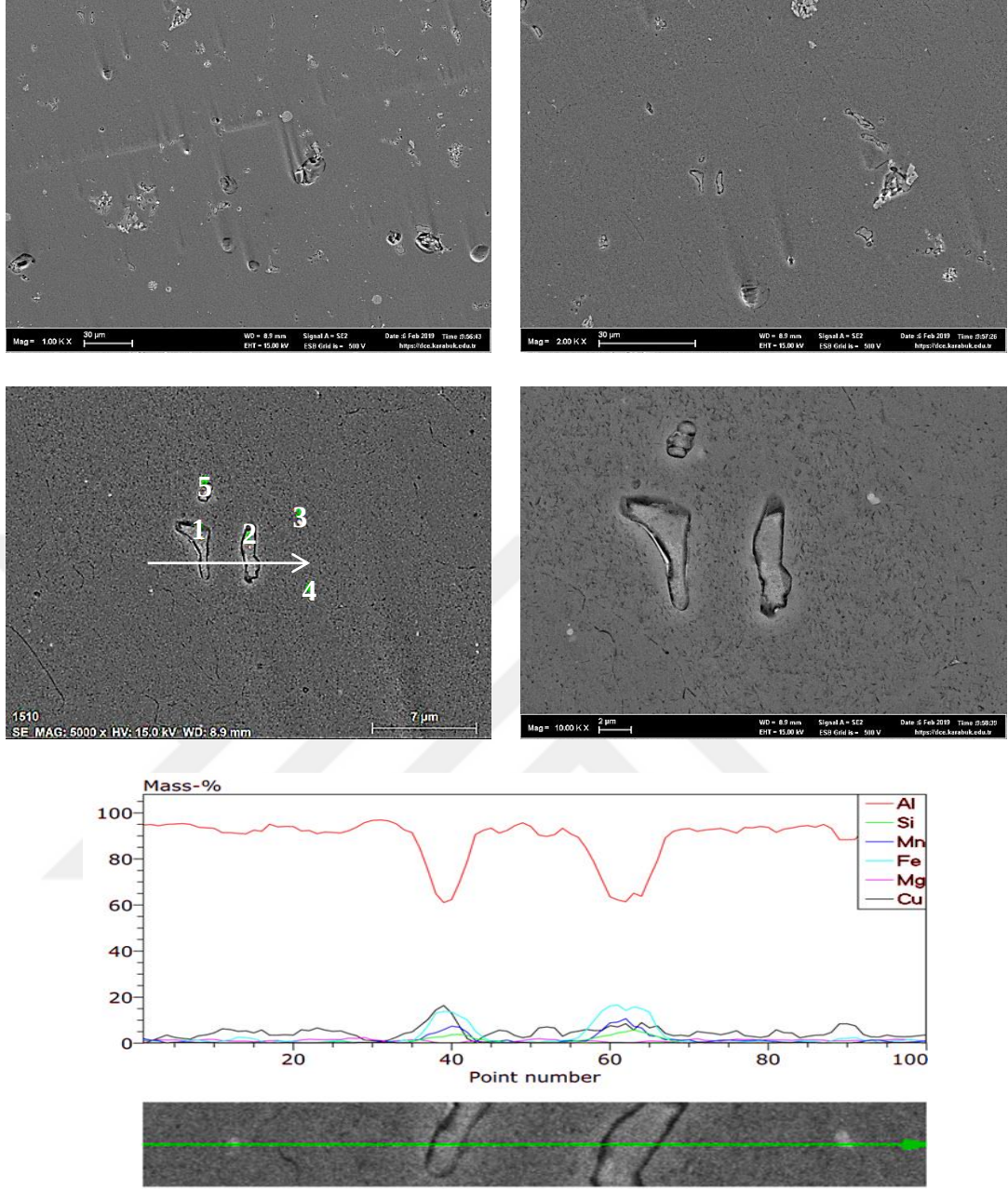
Şekil 6.15. 250°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütmelerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri ve nokta EDS analizi.



Şekil 6.16. 350°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.

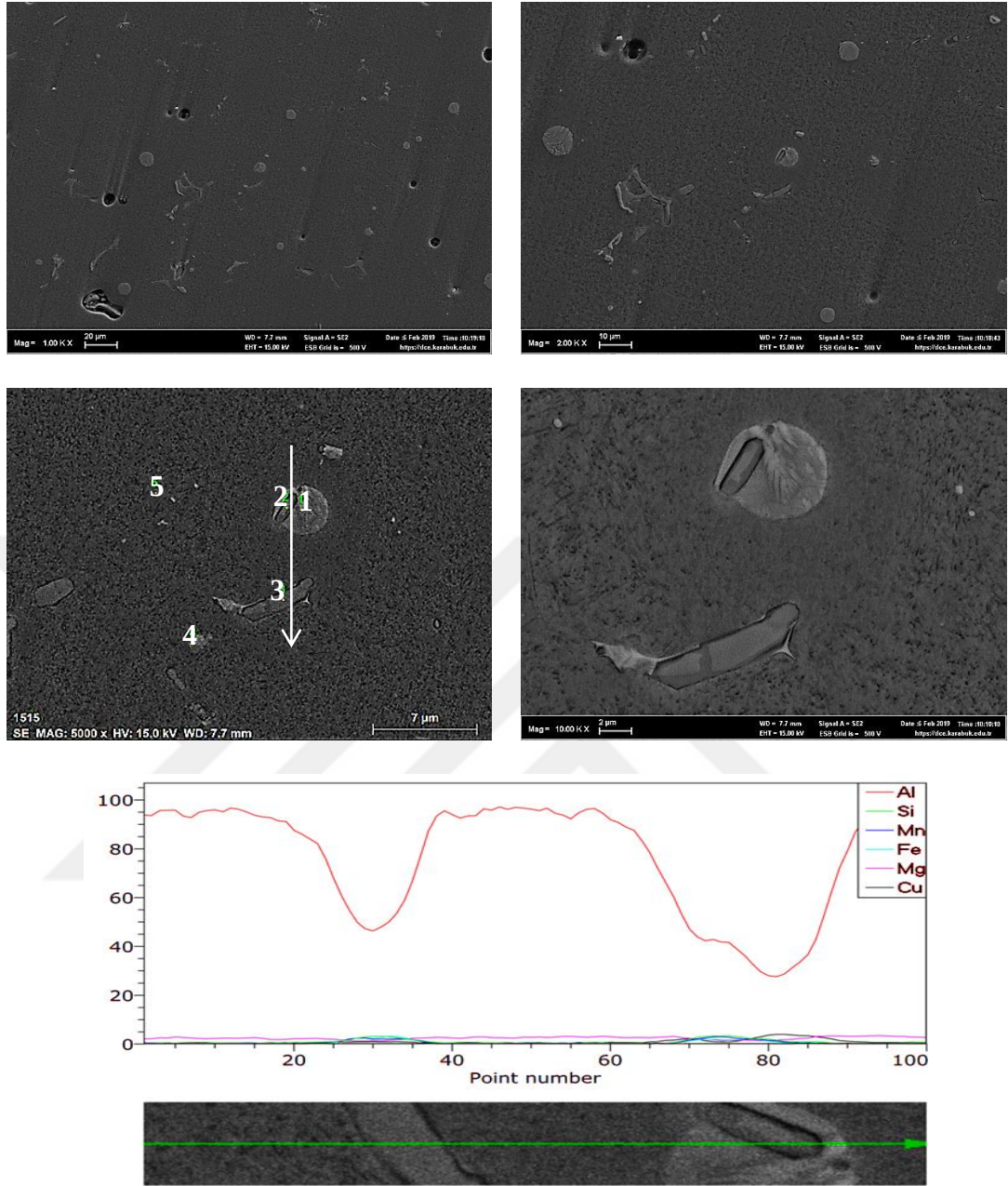
Şekil 6.17, 18, 19 ve 20’de sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C’de test edilen yaşlanan numunelerin SEM mikroyapı resimleri gösterilmektedir. Şekil 6.17’de homojen olarak dağılmış küçük ve orta büyüklükteki çökelti parçacıklarından oluşan bir yapı görülmektedir. Yapılan EDS analizleri sonucunda Al₂CuMg ve Al (Cu, Fe, Mn, Si) çökeltilerin yaşlanan numunelerde olduğu tespit edilmiştir. Artan test sıcaklığına bağlı olarak çökelti boyutlarının arttığı görülmektedir.

Yaşlanan numuneler bilindiği gibi 520°C’de 2 saat solüsyona alma sonrası suda soğutma ve ardından 190°C’de 24 yaşlandırma işlemiyle elde edilmiştir. Solüsyona alma ve ardından yapılan soğutma işlemi neticesinde T3 ısıl işlemiyle oluşturulmuş çökelti çözünerek Al, Mg ve Cu elementleri katı ergiyik içerisinde serbest halde kalmaktadır. Ardından yapılan 190°C’de 24 saat yaşlandırma işlemi ile bu elementler bir araya gelerek kararlı (S’), yarı kararlı (S) ve kararlı olmayan (S) çökeltilerini oluşturarak AA 2024 alaşımının dayanımını artırmaktadır [123,124]. Yaşlanan numunelerin dayanımında meydana gelen artış şekiller 6.17-20’de gösterilen farklı boyut ve dağılımda olan Al₂CuMg ve Al (Cu, Fe, Mn, Si) gibi çökeltilerin varlığından kaynaklanmaktadır.



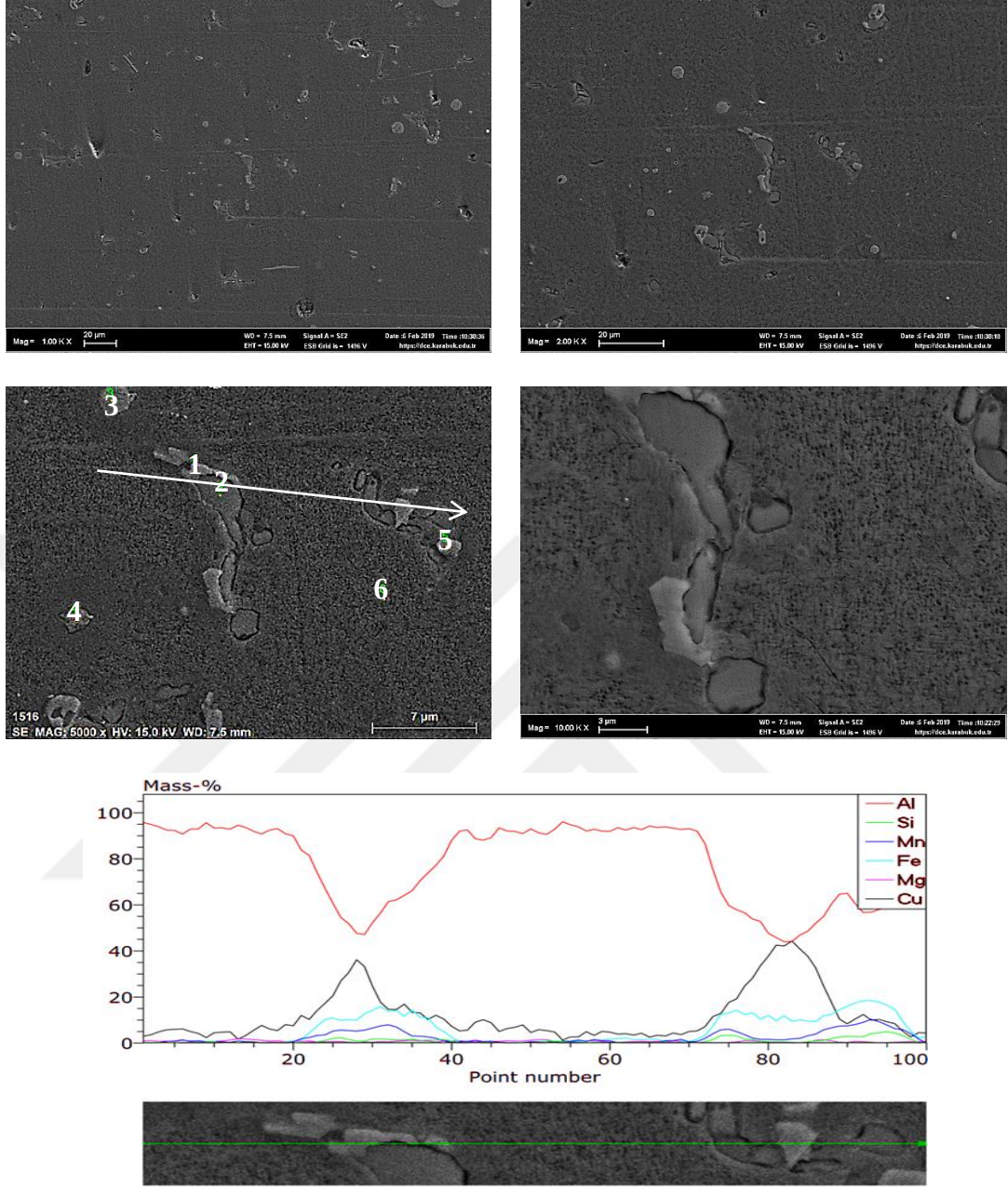
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.61	60.45	5.09	8.19	17.29	8.38
2	0.78	60.81	4.60	8.79	16.48	8.53
3	1.57	87.00	0.01	0.33	1.07	10.03
4	1.88	95.02	0.00	0.29	0.00	2.80
5	1.26	68.65	2.37	3.91	7.21	16.61
Mean value:	1.22	74.39	2.41	4.30	8.41	9.27
Sigma:	0.53	15.78	2.43	4.10	8.22	4.94
Sigma mean:	0.24	7.06	1.09	1.83	3.67	2.21

Şekil 6.17. 25°C'de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.



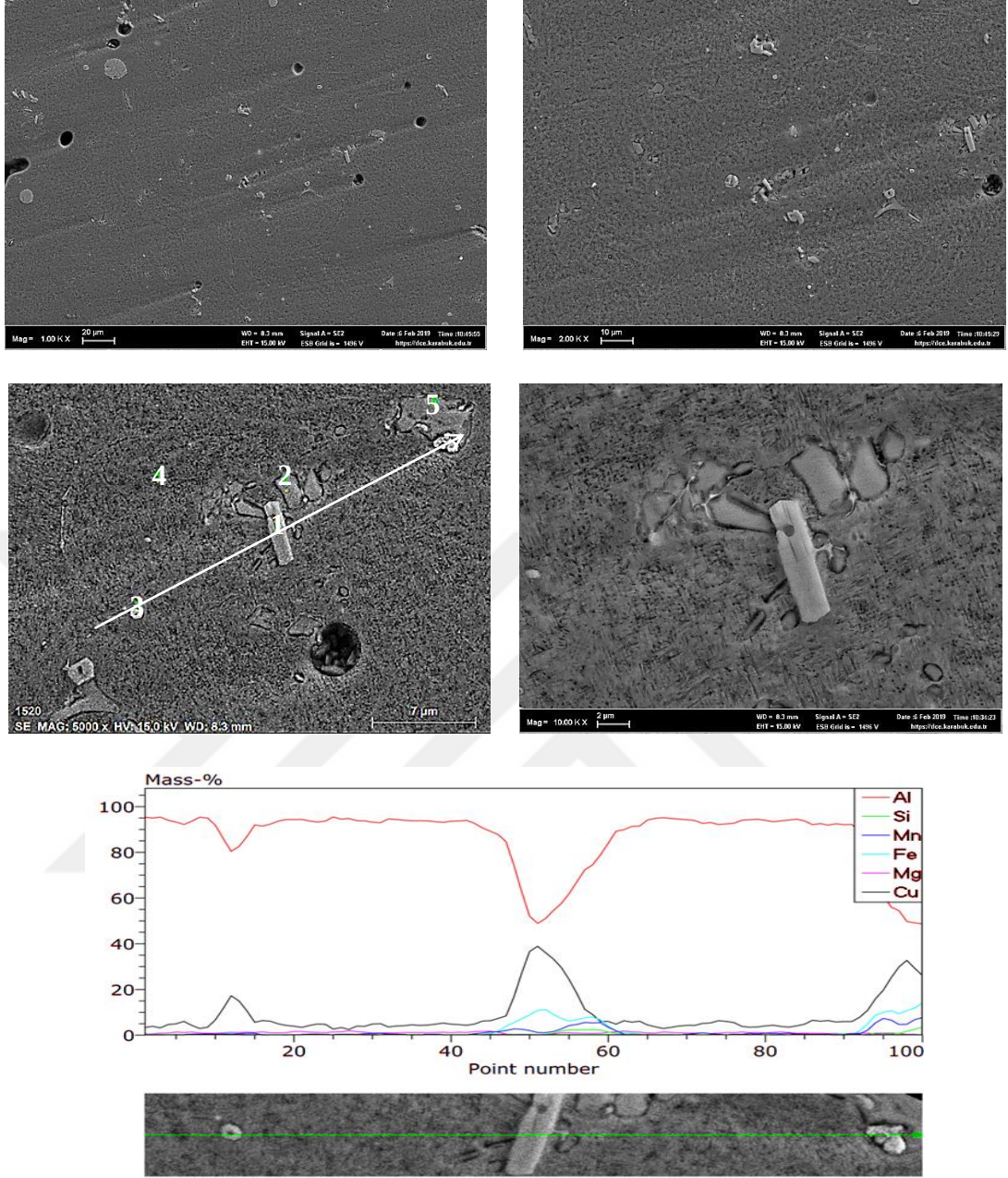
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	3.70	36.75	0.59	0.94	0.26	57.76
2	0.48	53.64	4.33	8.44	15.48	17.63
3	0.13	58.81	4.92	7.88	15.84	12.43
4	1.54	66.47	0.34	0.87	2.86	27.92
5	1.60	91.95	0.24	0.27	0.00	5.94
Mean value:	1.49	61.52	2.08	3.68	6.89	24.34
Sigma:	1.39	20.21	2.33	4.10	8.09	20.34
Sigma mean:	0.62	9.04	1.04	1.83	3.62	9.10

Şekil 6.18. 150°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.36	49.44	0.92	2.38	12.37	34.53
2	0.29	53.33	4.49	10.03	19.43	12.43
3	5.94	34.17	0.64	0.76	0.00	58.50
4	1.87	70.11	0.30	0.00	0.37	27.36
5	0.20	44.79	0.68	1.55	10.47	42.30
6	1.53	92.96	0.09	0.01	0.30	5.11
Mean value:	1.70	57.47	1.19	2.45	7.16	30.04
Sigma:	2.19	21.00	1.64	3.83	8.16	19.59
Sigma mean:	0.90	8.57	0.67	1.56	3.33	8.00

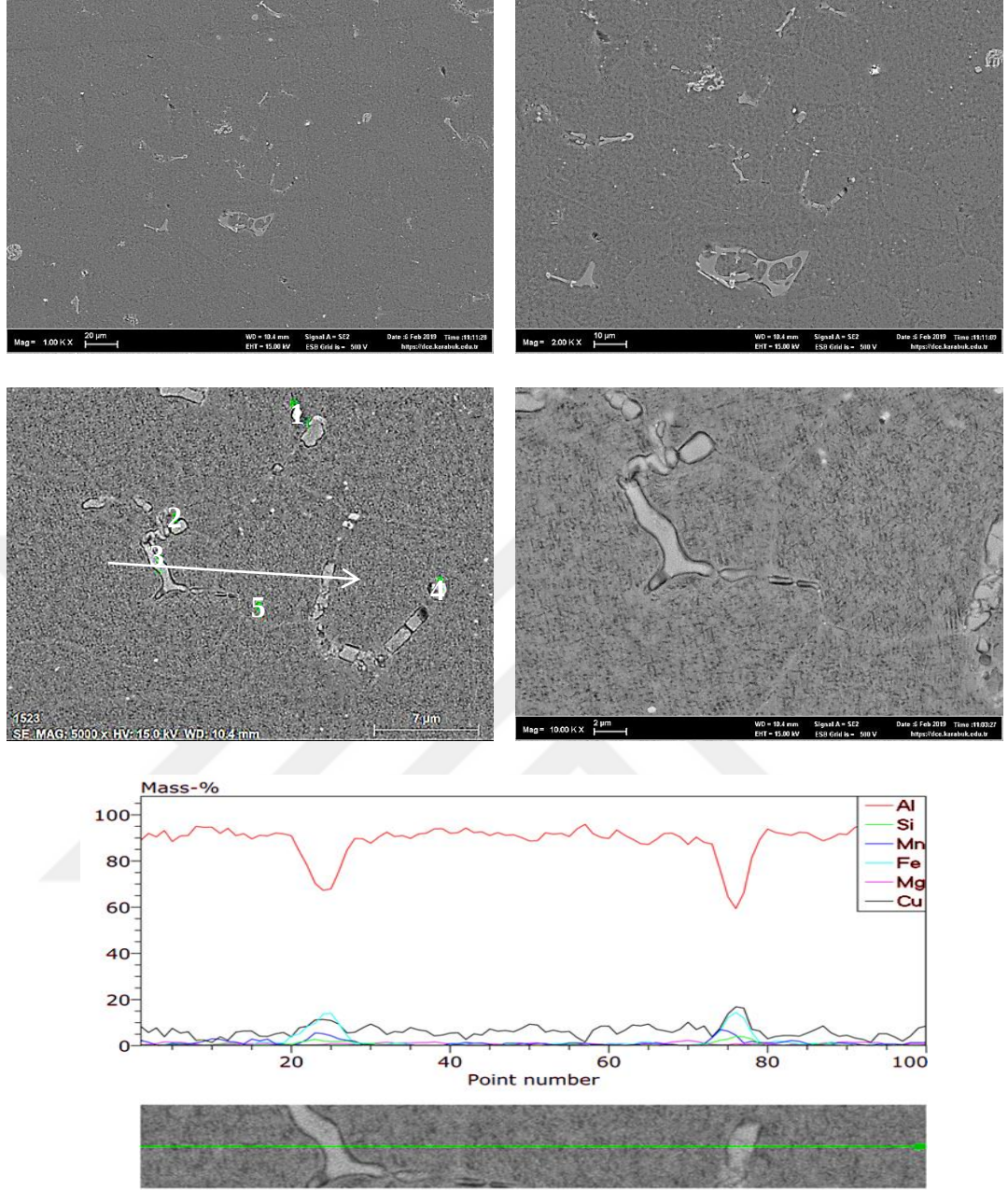
Şekil 6.19. 250°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.



Şekil 6.20. 350°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütmelelerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.

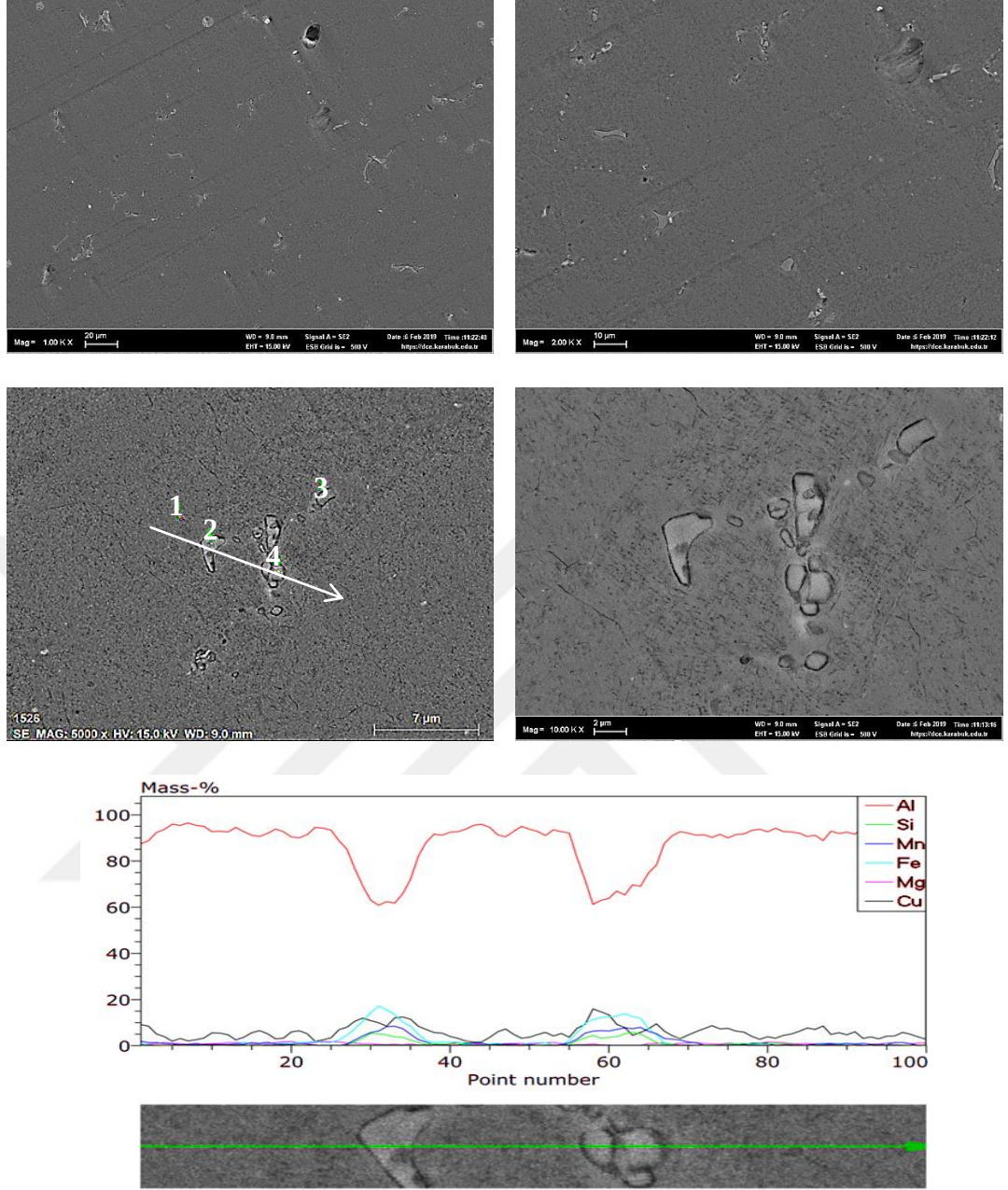
Şekil 6.21, 22, 23 ve 24 sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C’de test edilen aşırı yaşlanmış numunelerin SEM mikroyapı resimlerini göstermektedir. Şekillerden de görüldüğü gibi yaşlanma süresindeki aşırı artış, küçük çökelti parçacıkların çözünmesine ve sayıca daha az olmasına sebep olmaktadır. Aşırı yaşlanma sonucu büyük çökeltilerin olduğu farklı büyütmelerde alınan SEM resimlerinde görülmektedir. Bu literatürde çökeltilerin kabalaşması olarak ifade edilmektedir. Kaba çökelti dislokasyonların hareketini engelleyemez ve bunun sonucunda dislokasyonlar kolay hareket ederek mukavemetin düşmesine fakat şekillenebilirlik özelliğinin artmasına neden olur [1,97]. Bu nedenle 520°C’de 2 saat solüsyona alındıktan sonra suda soğutulan ve ardından 190°C’de 72 saat yaşlandırılan aşırı yaşlanmış numunelerin dayanım değerleri düşerken şekillenebilirlik artmıştır.

Şekil 6.21, 25°C’de test edilen aşırı yaşlanmış numunenin matris fazı ile çökelti fazından geçen EDS çizgi analiz sonuçlarını göstermektedir. Şekil 6.21’de Al, Cu ve Fe elementlerinin çizgi boyunca konsantrasyon dağılımı belirgin şekilde görülmektedir. Matris fazının Al, Cu ve Fe elementlerince zengin olduğu tespit edilmiştir. Fakat analiz çizgisinin çökeltiyi kestiği anda Al miktarı düşerken Fe ve Cu miktarının arttığı görülmüştür. Bu durum Al₂Cu çökeltilerinin aşırı yaşlanma sürecinde oluştuğunu ve kabalaştığını göstermektedir.



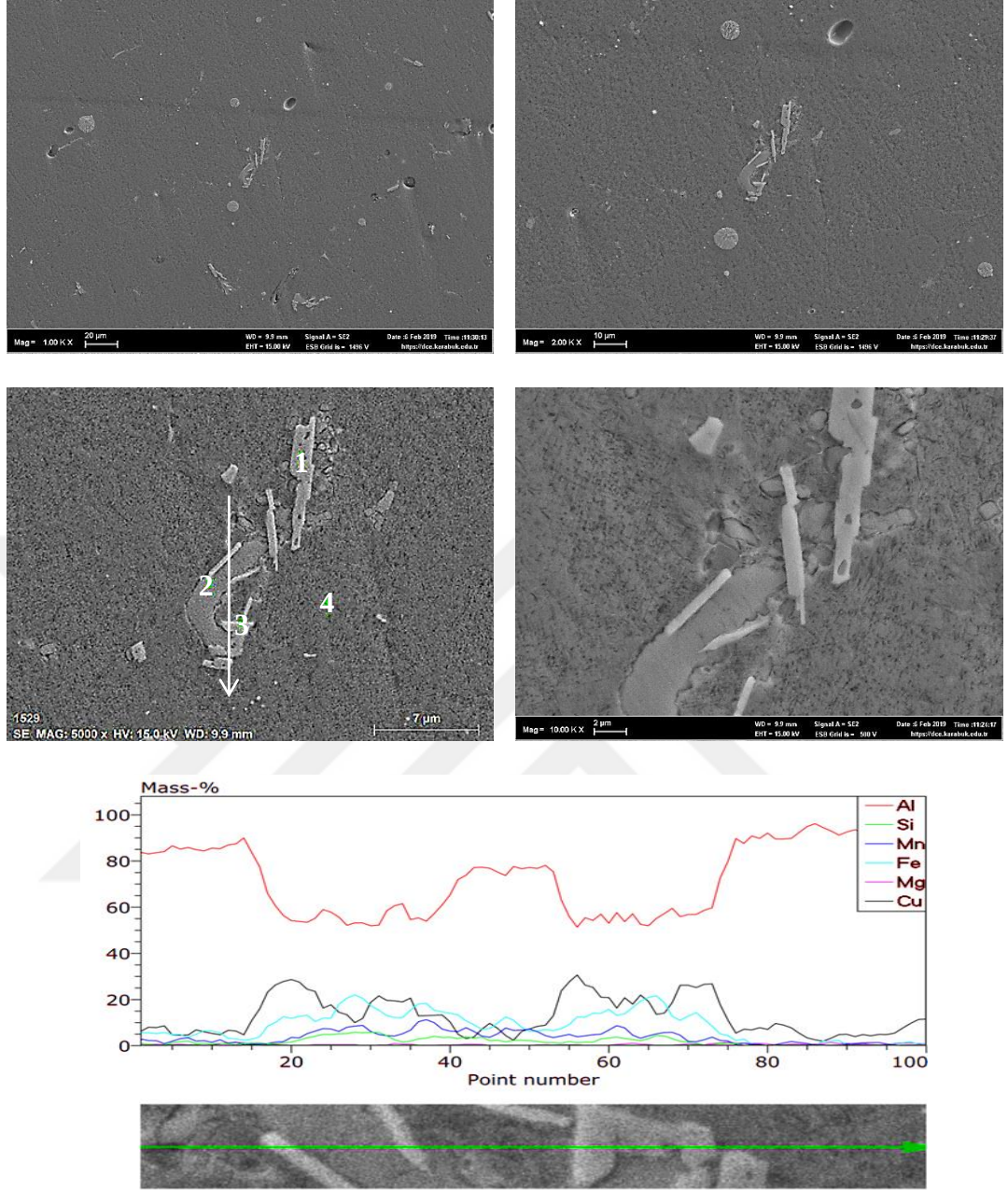
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.00	57.41	4.98	6.67	18.98	11.97
2	0.05	61.15	4.43	8.45	15.27	10.65
3	0.02	60.30	3.49	7.17	13.72	15.31
4	1.01	65.37	0.00	1.07	6.28	26.27
5	1.28	92.19	0.22	0.65	0.00	5.66
Mean value:	0.47	67.28	2.62	4.80	10.85	13.97
Sigma:	0.62	14.21	2.36	3.66	7.62	7.70
Sigma mean:	0.28	6.36	1.05	1.64	3.41	3.44

Şekil 6.21. 25°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.



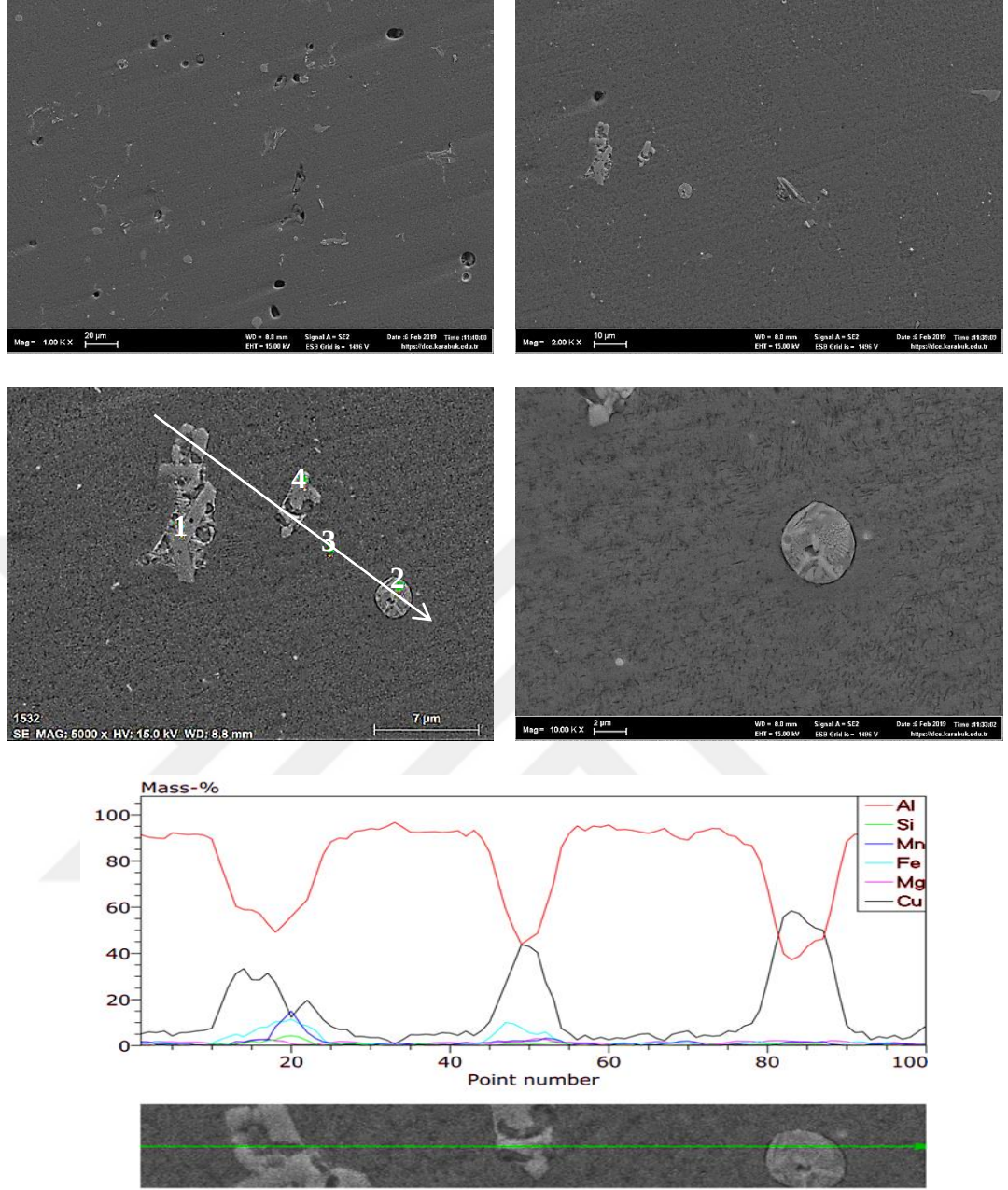
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.62	94.53	0.33	0.00	0.04	3.48
2	0.00	59.76	5.22	7.01	20.33	7.68
3	0.00	62.57	4.22	7.10	15.97	10.14
4	0.92	65.37	4.26	8.21	13.34	7.90
Mean value:	0.64	70.56	3.51	5.58	12.42	7.30
Sigma:	0.79	16.15	2.17	3.76	8.74	2.78
Sigma mean:	0.39	8.07	1.08	1.88	4.37	1.39

Şekil 6.22. 150°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütmelerde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.00	49.24	0.25	1.64	11.24	37.64
2	0.27	55.01	5.20	7.95	18.82	12.75
3	0.15	52.64	1.78	4.76	13.49	27.18
4	1.72	93.73	0.17	0.56	0.25	3.57
Mean value:	0.53	62.65	1.85	3.73	10.95	20.28
Sigma:	0.80	20.85	2.36	3.33	7.81	15.11
Sigma mean:	0.40	10.43	1.18	1.66	3.91	7.55

Şekil 6.23. 250°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.00	48.76	0.11	2.42	10.97	37.73
2	0.44	40.78	0.68	0.16	0.12	57.82
3	1.70	92.26	0.00	0.00	0.36	5.68
4	1.71	52.54	0.08	1.64	6.14	37.90
Mean value:	0.96	58.58	0.22	1.05	4.40	34.78
Sigma:	0.87	22.98	0.31	1.17	5.19	21.57
Sigma mean:	0.44	11.49	0.16	0.59	2.60	10.79

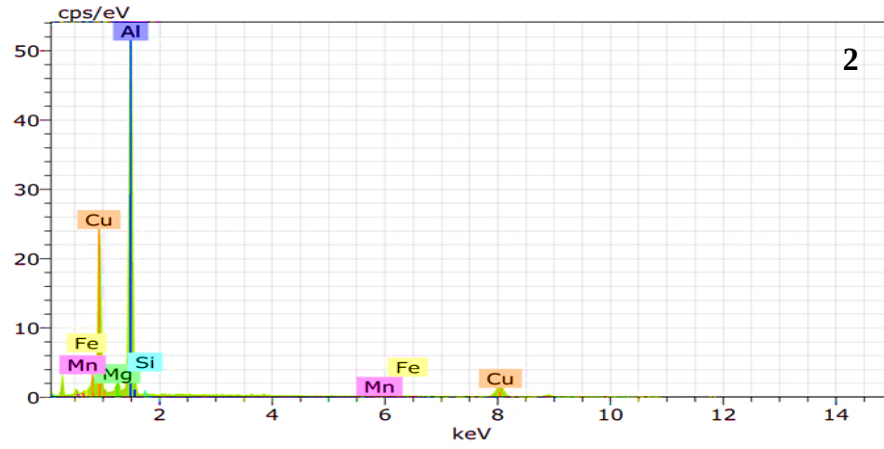
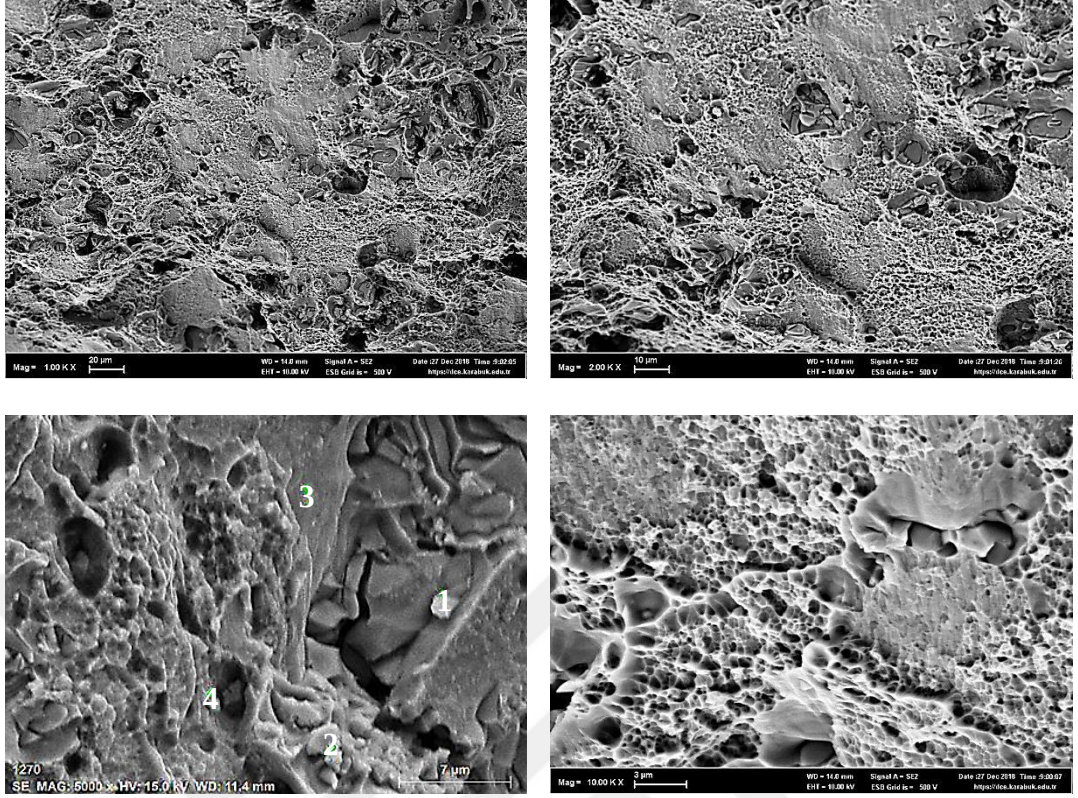
Şekil 6.24. 350°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM mikroyapı görüntüleri, çizgi ve nokta EDS analizi.

6.3.2. SEM Kırık Yüzey Görüntülerinin Değerlendirilmesi

Bu bölümde, 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C sıcaklıklarında test edilen ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin kırık yüzey görüntüleri değerlendirilmiştir. Sıcaklığın kırılma tipine etkisi belirlenmiştir. Şekil 6.25, 26, 27 ve 28'de sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C'de test edilen ana malzemenin SEM kırık yüzey resimleri gösterilmektedir.

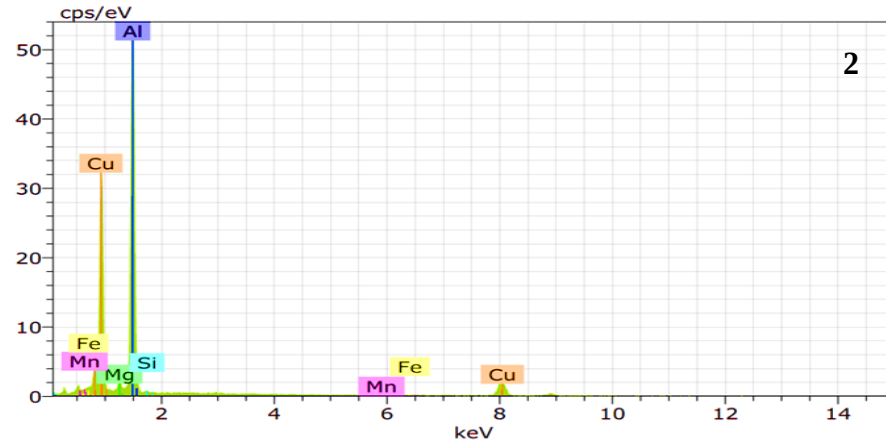
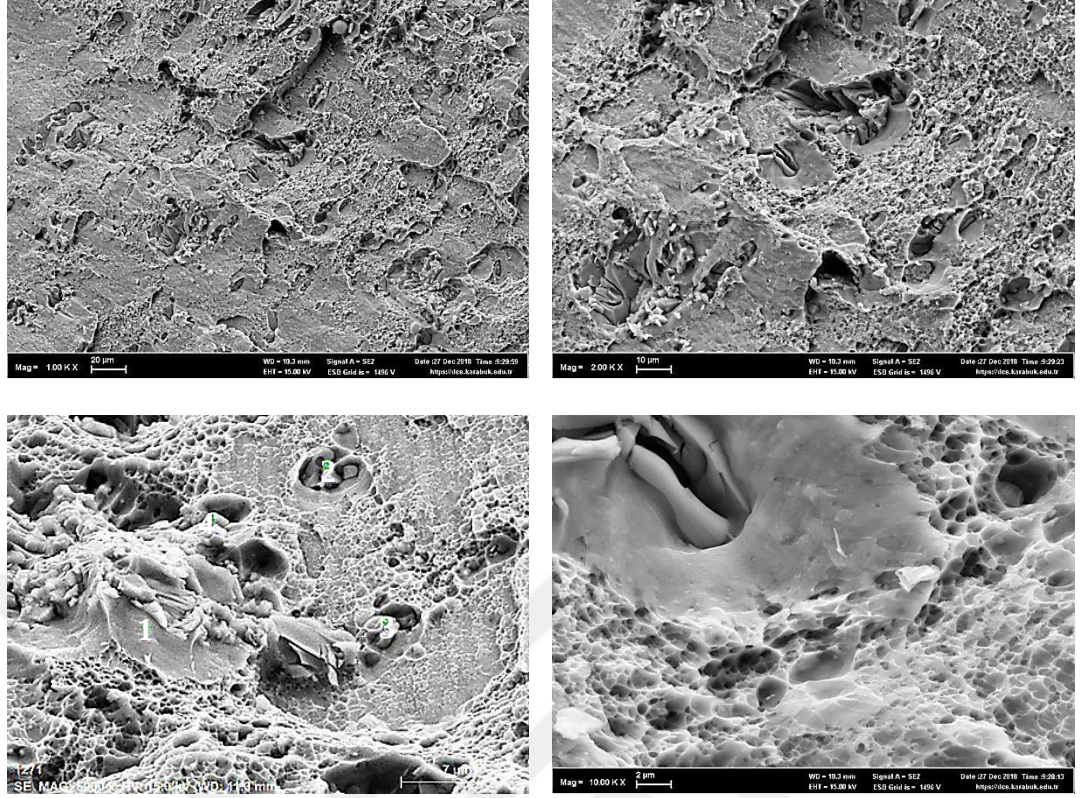
25°C ve 150°C'de test edilen numunelerde çukurcukların birleşmesi ile oluşan mikro boşluk morfolojisinde transgranüler (tane içi) kırılma tipi gözlenmiştir. Artan sıcaklıkla birlikte 250°C ve 350°C'de test edilen numunelerde intergranüler (taneler arası) kırılma meydana gelmekte ve derin çukurcuklar oluşmaktadır. Metalik malzemelerin kırılma tipinin sıcaklık arttıkça transgranüler kırılmadan intergranüler kırılma tipine geçiş gösterdiği bilinmektedir. Transgranüler kırılmada klivaj düzlemleri veya kayma düzlemleri tane sınırlarından daha zayıftır ve kırılma taneler içindeki kayma düzlemleri veya klivaj düzlemleri boyunca olur. İntergranüler kırılmada ise tane sınırlarının daha zayıf olması sebebi ile kırılma tane sınırı boyunca gerçekleşir [89,100,128].

Ayrıca şekiller 6.25-28, 25°C-350°C'de test edilen ana malzemenin nokta EDS analiz sonuçlarını göstermektedir. Yapılan EDS analizi incelemelerinde ana malzemedeki Al_2Cu , Al_2CuMg ve Al (Cu, Fe, Mn, Si) çökeltilerinin olduğu görülmektedir.



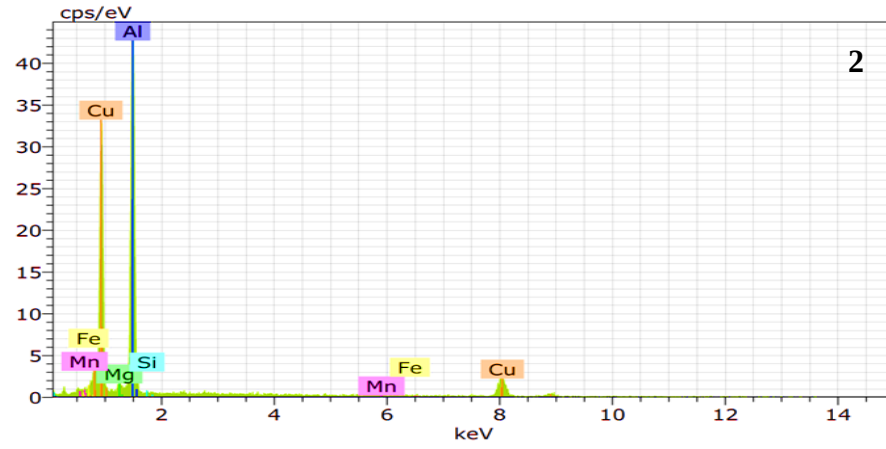
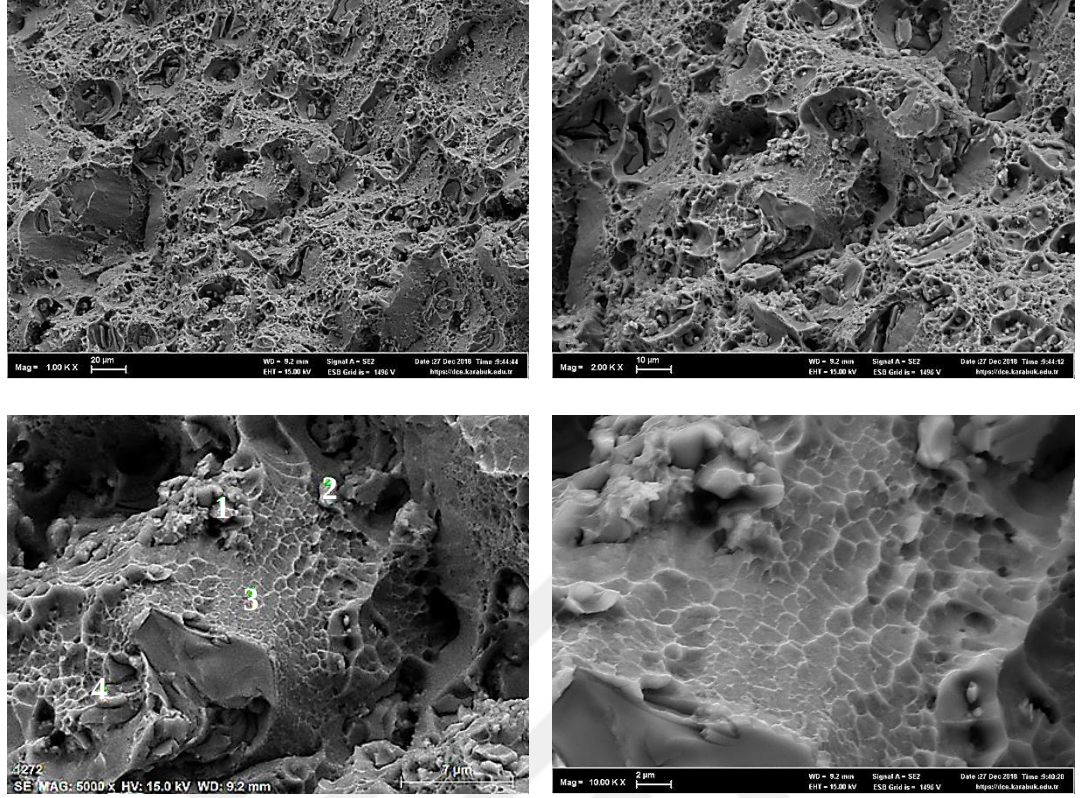
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.96	66.57	4.98	5.00	13.96	8.54
2	2.05	59.25	0.51	0.02	0.29	37.88
3	1.66	92.25	0.31	0.77	0.45	4.56
4	1.65	61.20	0.33	0.14	0.23	36.44
Mean value:	1.58	69.82	1.53	1.48	3.73	21.85
Sigma:	0.45	15.27	2.30	2.37	6.82	17.76
Sigma mean:	0.23	7.64	1.15	1.18	3.41	8.88

Şekil 6.25. 25°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütmelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



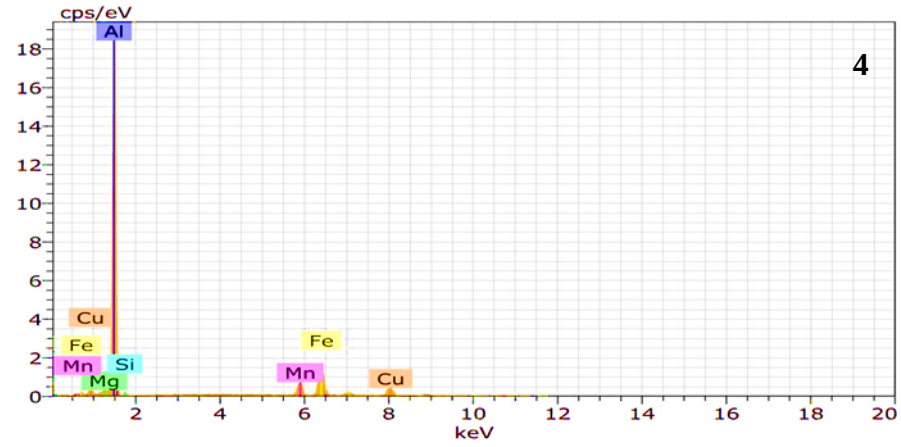
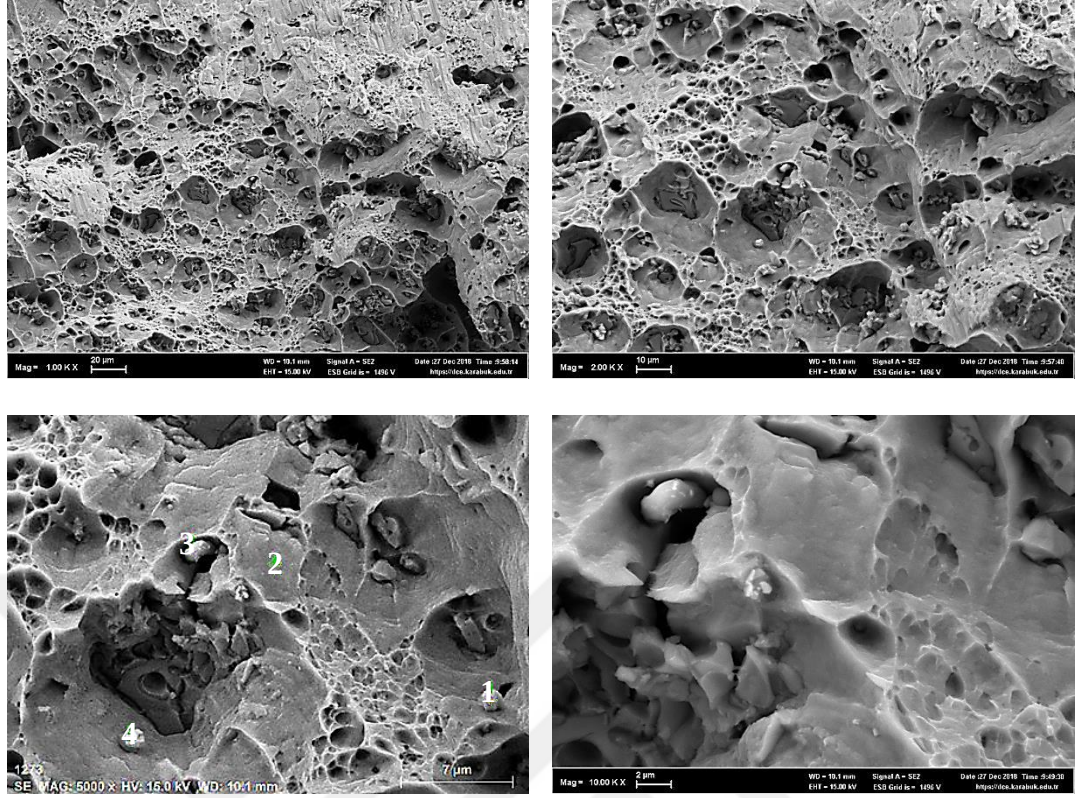
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.89	93.54	0.36	0.50	0.20	3.52
2	1.69	56.43	0.40	0.15	0.02	41.32
3	1.57	57.02	0.35	0.00	0.12	40.94
4	1.23	68.95	4.37	5.80	12.50	7.14
Mean value:	1.59	68.98	1.37	1.61	3.21	23.23
Sigma:	0.27	17.36	2.00	2.80	6.20	20.72
Sigma mean:	0.14	8.68	1.00	1.40	3.10	10.36

Şekil 6.26. 150°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.69	94.02	0.12	0.53	0.51	3.14
2	1.46	50.68	0.17	0.12	0.28	47.28
3	1.82	95.33	0.18	0.06	0.12	2.49
4	1.87	92.99	0.40	0.56	0.80	3.38
Mean value:	1.71	83.26	0.22	0.32	0.43	14.07
Sigma:	0.18	21.74	0.13	0.26	0.30	22.14
Sigma mean:	0.09	10.87	0.06	0.13	0.15	11.07

Şekil 6.27. 250°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütmelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.

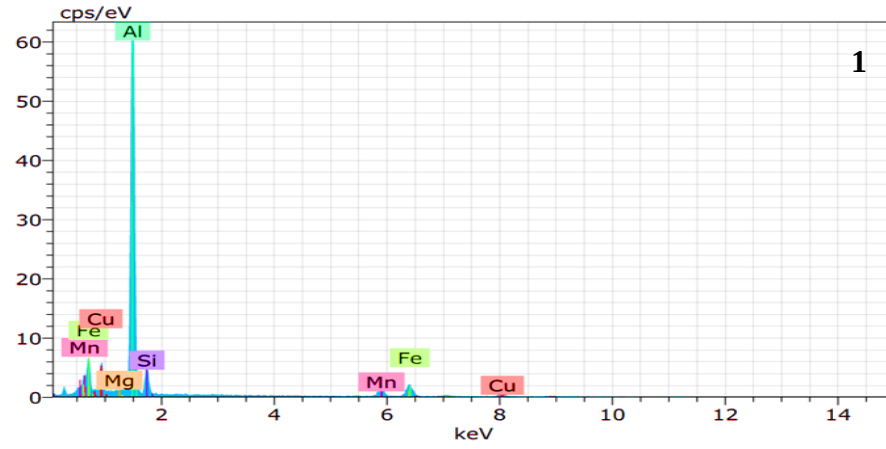
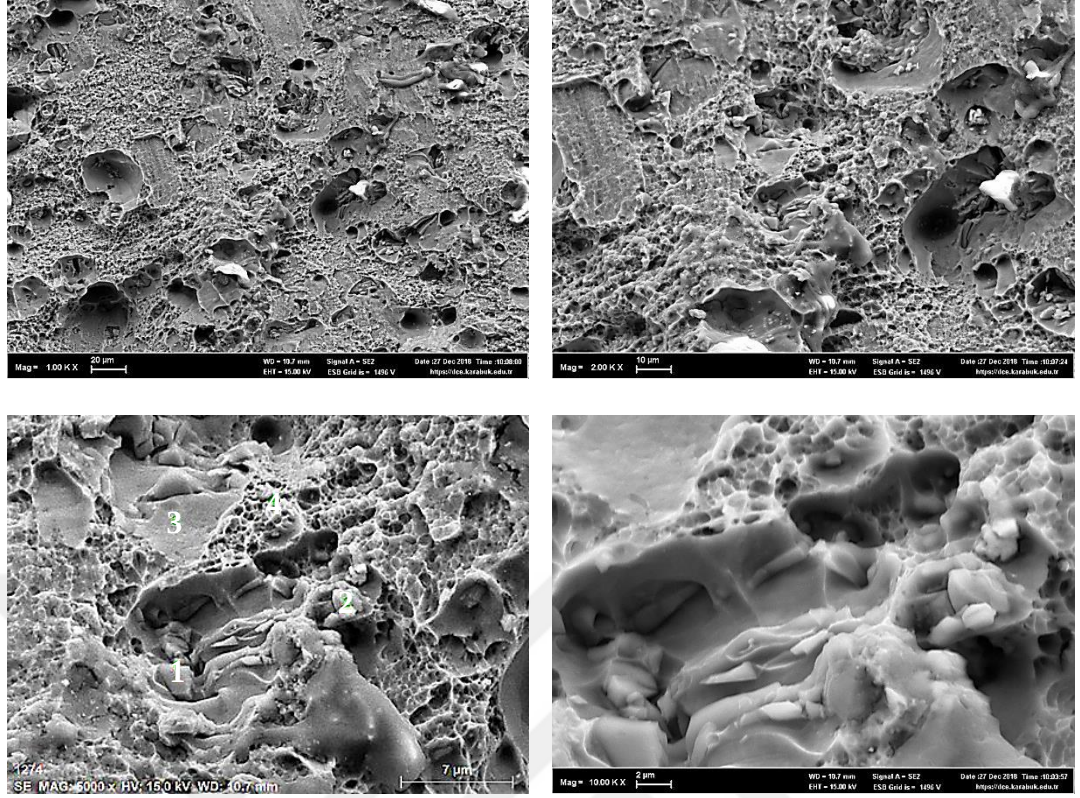


Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.87	87.26	0.00	1.61	0.70	9.56
2	1.86	92.53	0.46	0.45	0.21	4.48
3	0.82	22.08	0.00	0.58	2.16	74.35
4	0.62	60.45	0.24	7.36	19.59	11.75
Mean value:	1.04	65.58	0.17	2.50	5.67	25.04
Sigma:	0.56	32.23	0.22	3.28	9.32	33.02
Sigma mean:	0.28	16.11	0.11	1.64	4.66	16.51

Şekil 6.28. 350°C’de çekme testine tabi tutulan ana malzemenin farklı büyütmelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.

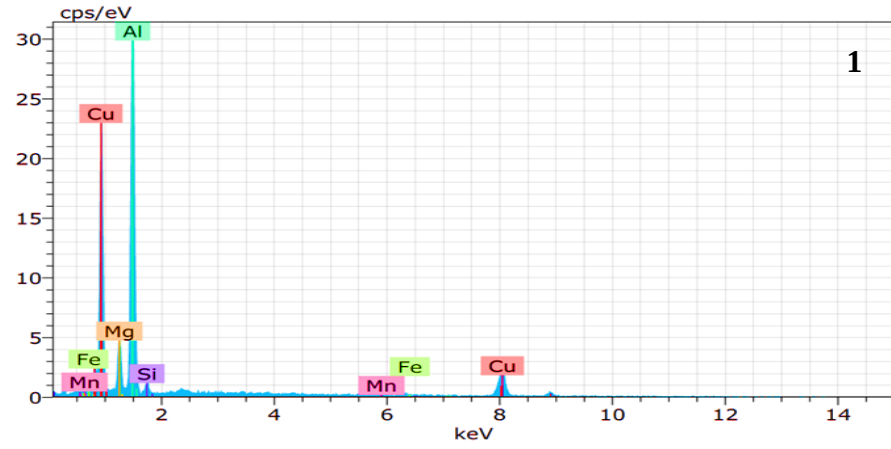
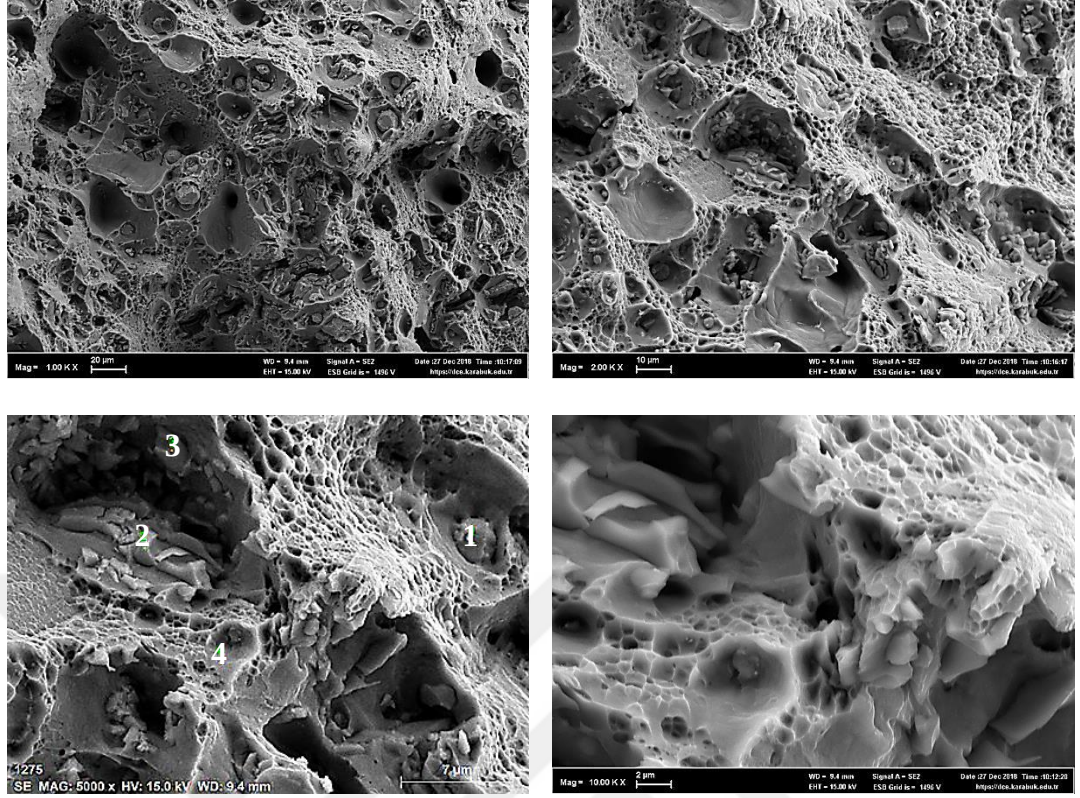
Şekil 6.29, 30, 31 ve 32 sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C’de test edilen solüsyona alınmış numunelerin SEM kırık yüzey resimlerini göstermektedir. Numunelerin kırık yüzeylerinde çukurcuklar ve ayrılma düzlemleri görülmektedir. Diğer taraftan test sıcaklığının 25°C’den 150°C, 250°C ve 350°C’ye çıkmasıyla tekrar çukurcuklar gözlenmiş olup miktarı da artmaktadır. Çukurcukların oluşumu Al_2Cu , Mg_2Si veya Al_2CuMg gibi çökelti parçacıklarının ısıtma işlem ve soğutma hızına bağlı olarak AA 2024 alaşımında oluşması ve çekme testi esnasında yüzeyden ayrılması ile yakından ilgilidir [129,130].

Solüsyona alınan numunelerin 150°C, 250°C ve 350°C’de uygulanan çekme deneyi sırasında hareketli dislokasyonlar dinamik olarak meydana gelen farklı boyutlara sahip çökelti parçacıklarıyla etkileşime girmektedir. Bu çökelti parçacıkları özellikle 250°C ve 350°C’de yapılan çekme testi sonrası kabalaşarak matris fazı içerisinde kalmaktadır ve büyük çukurcukların oluşmasına neden olmaktadır. Aynı zamanda bu çukurcukların içerisinde farklı boyutlarda çökelti bulunabilmektedir. Solüsyona alınmış ve farklı sıcaklıklarda test edilmiş numunelerden alınan nokta EDS analiz sonuçları karmaşık şekilli Al-Cu-Mg içeren çökeltilerin bu malzemede oluştuğunu göstermektedir.



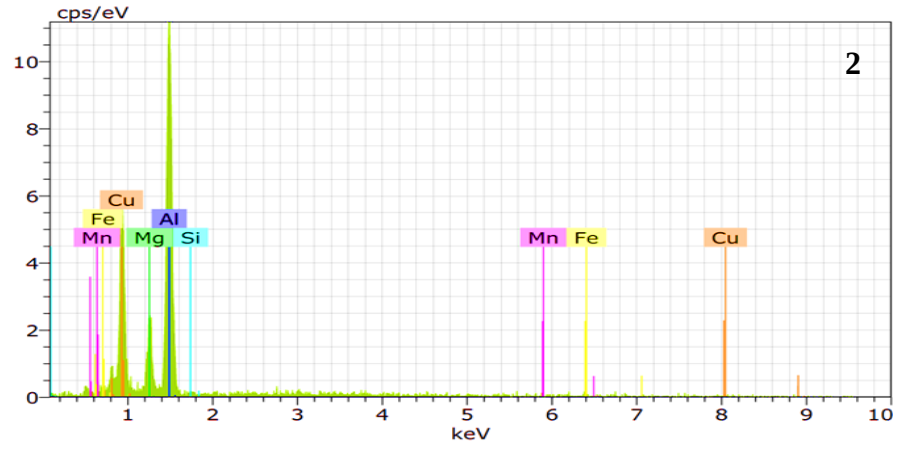
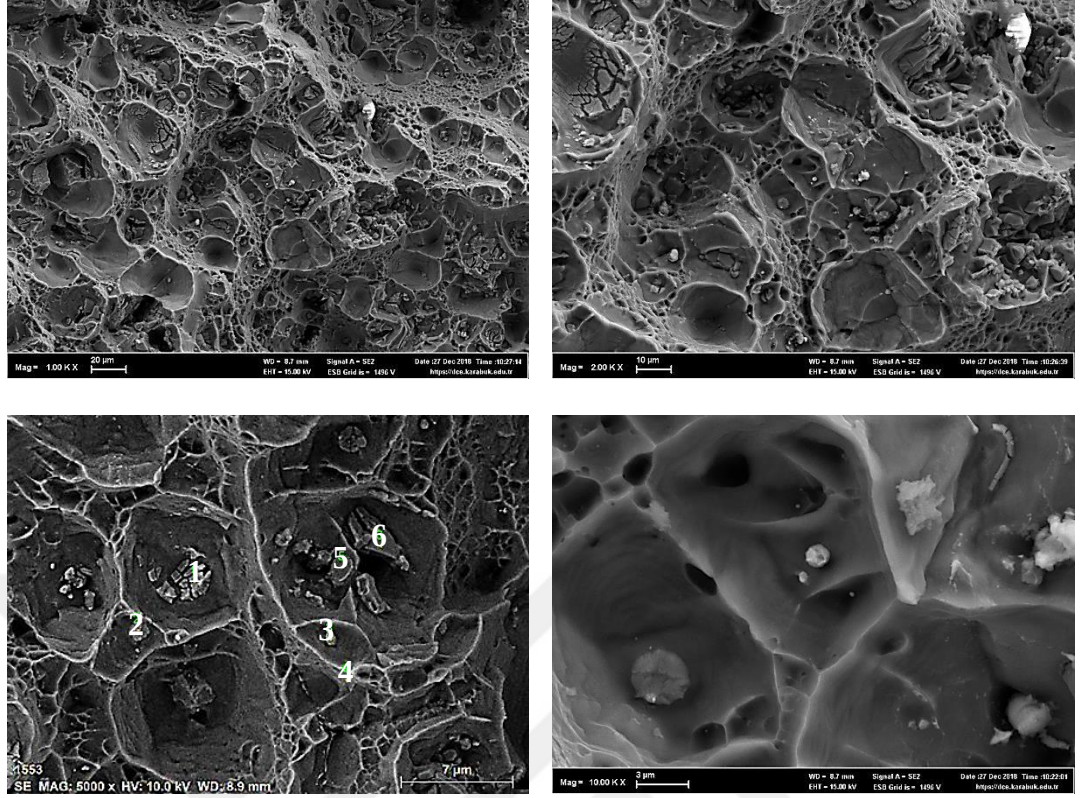
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.75	61.32	6.15	7.02	16.33	8.43
2	1.50	73.37	3.97	5.33	9.90	5.93
3	1.91	93.99	0.44	0.23	0.12	3.30
4	1.90	92.67	0.50	0.25	0.28	4.41
Mean value:	1.51	80.34	2.77	3.21	6.66	5.52
Sigma:	0.54	15.80	2.79	3.50	7.91	2.22
Sigma mean:	0.27	7.90	1.40	1.75	3.95	1.11

Şekil 6.29. 25°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



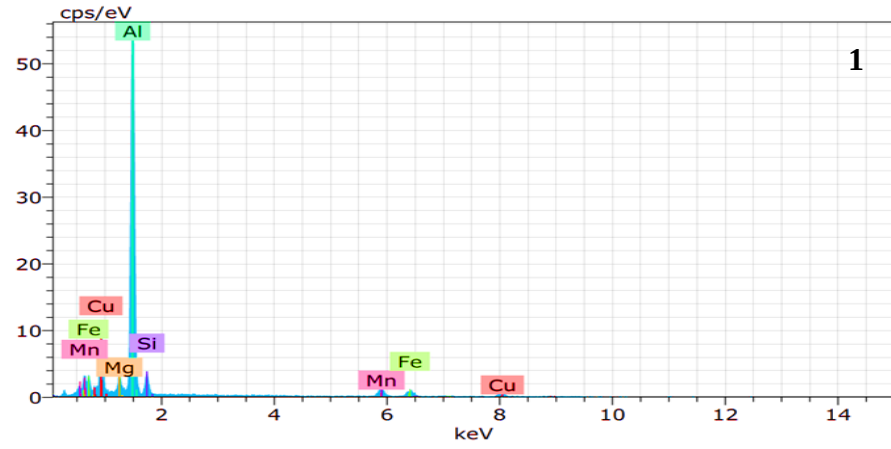
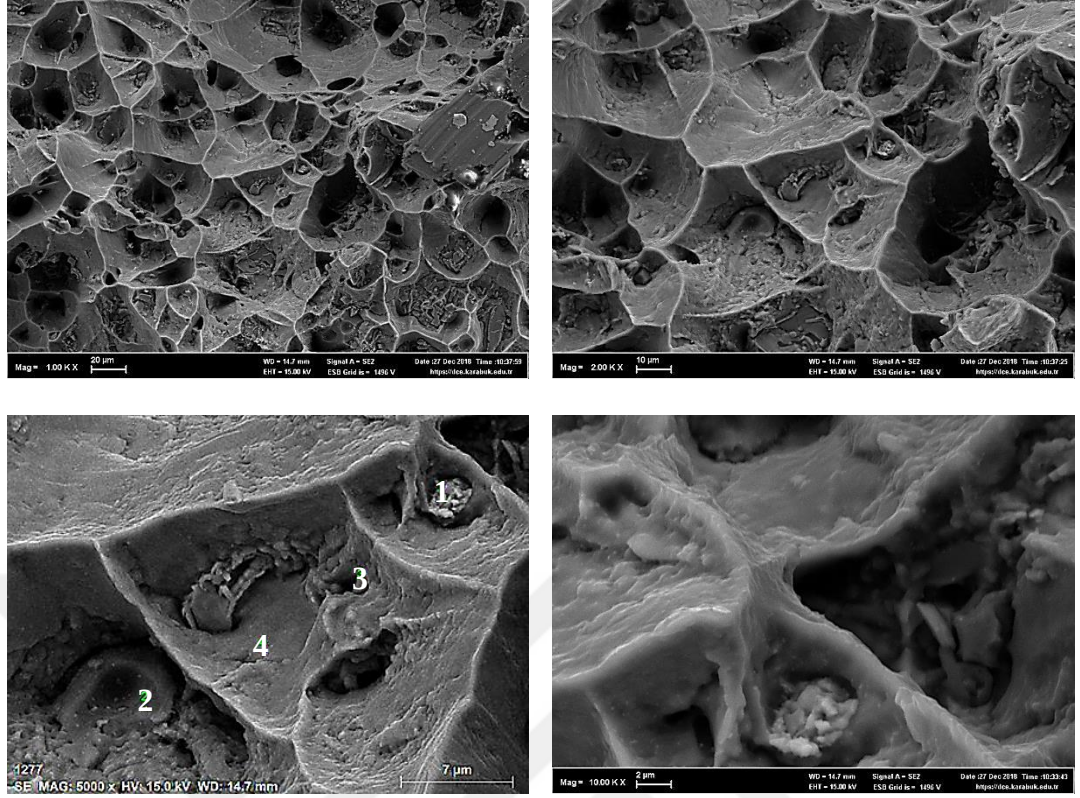
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	6.43	43.29	1.23	0.45	0.27	48.32
2	0.71	61.14	3.84	9.21	15.82	9.28
3	0.30	42.20	0.08	12.85	28.01	16.55
4	1.91	93.07	0.39	0.53	0.27	3.83
Mean value:	2.34	59.93	1.38	5.76	11.09	19.49
Sigma:	2.81	23.74	1.71	6.26	13.45	19.91
Sigma mean:	1.41	11.87	0.86	3.13	6.73	9.96

Şekil 6.30. 150°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	8.98	50.01	0.67	0.00	0.00	40.35
2	8.18	48.81	0.46	0.31	2.92	39.32
3	0.61	52.56	5.33	9.75	19.59	12.17
4	1.46	94.56	0.11	0.79	0.00	3.08
5	0.00	47.89	0.72	18.76	28.71	3.92
6	0.75	20.31	0.06	17.90	59.64	1.33
Mean value:	3.33	52.36	1.22	7.92	18.48	16.69
Sigma:	4.10	23.86	2.03	8.85	23.35	18.31
Sigma mean:	1.67	9.74	0.83	3.61	9.53	7.47

Şekil 6.31. 250°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütmelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.

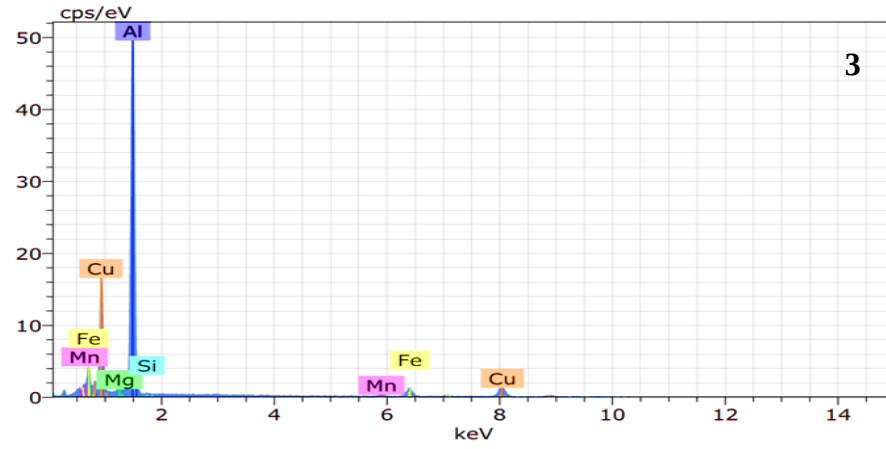
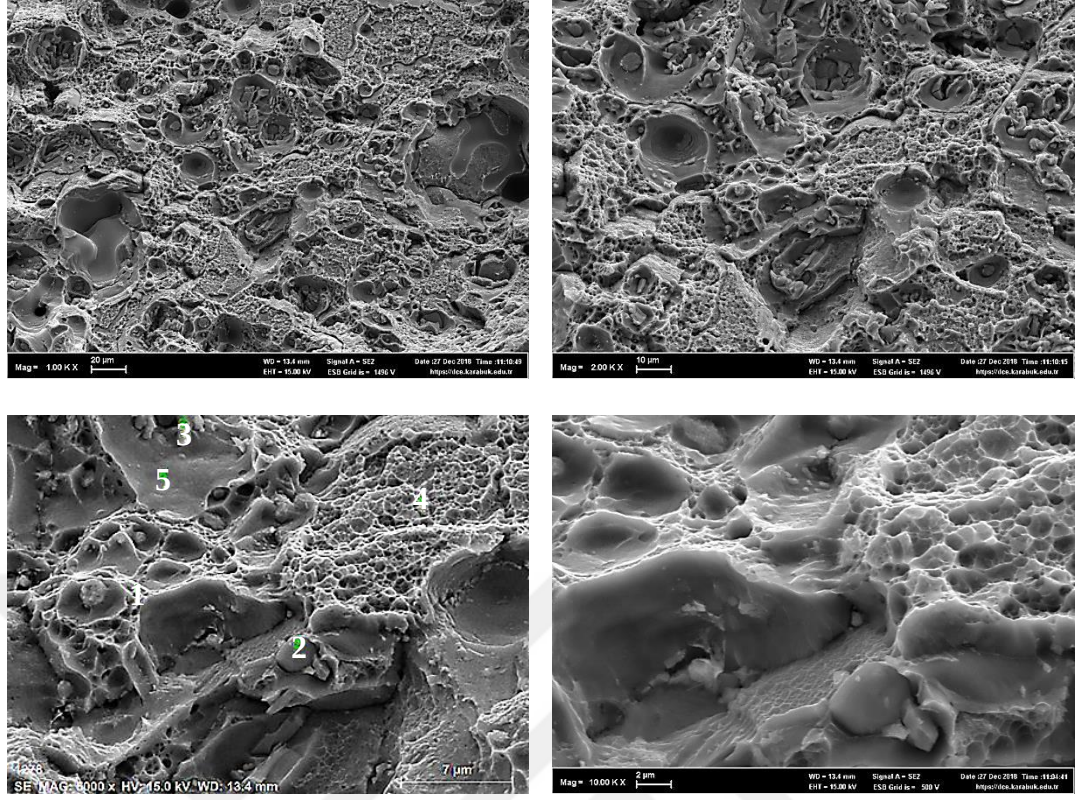


Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	2.95	63.75	5.23	8.70	8.08	11.28
2	1.68	92.69	0.16	0.71	0.16	4.60
3	0.73	64.25	2.70	7.72	14.13	10.47
4	1.70	93.02	0.09	0.59	0.40	4.21
Mean value:	1.76	78.43	2.04	4.43	5.69	7.64
Sigma:	0.91	16.66	2.45	4.38	6.72	3.75
Sigma mean:	0.46	8.33	1.22	2.19	3.36	1.88

Şekil 6.32. 350°C’de çekme testine tabi tutulan solüsyona alınmış numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.

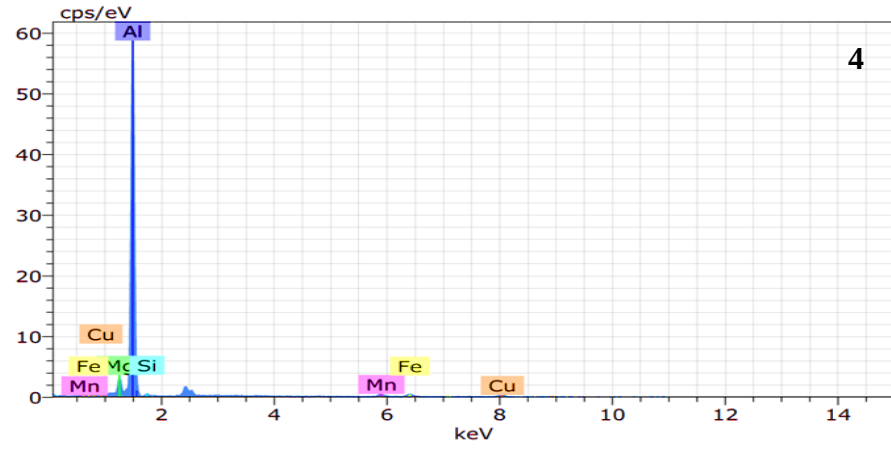
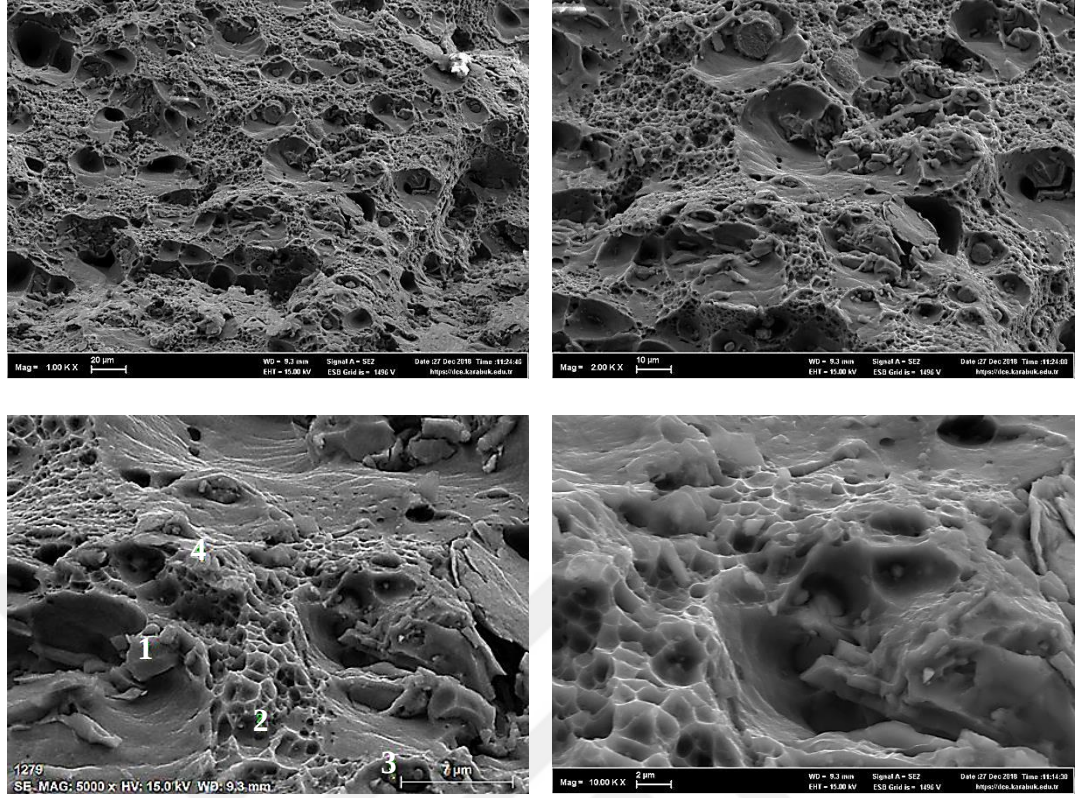
Şekil 6.33, 34, 35 ve 36'da sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C'de test edilen yaşlanan numunelerin SEM kırık yüzey resimleri görülmektedir. 25°C'de test edilen numunede çukurcuklar ve ayrılma düzlemleri bir arada gözlenmektedir. Bu durum 25°C'de test edilen yaşlanmış numunenin kısmen sünek kısmen gevrek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bu sonuç % uzama değerleri ile uyumludur. Örneğin 190°C'de 24 saat yaşlanan numune, ana malzeme, solüsyona alınan ve aşırı yaşlanan numunelere göre 25°C'de en düşük % uzama değerine sahip olmuştur. % uzama değerinin düşük çıkması dislokasyon ile çökeltilerin etkileşiminden kaynaklanmaktadır [131].

Test sıcaklığının 25°C'den 150°C, 250°C ve 350°C'ye çıkmasıyla kırılma tipinin transgranüler kırılmadan intergranüler kırılmaya geçtiği şekiller 6.33-6.36'da görülmektedir. Ayrıca test sıcaklığının artmasıyla birlikte çukurcuk boyut ve sayısında arttığı tespit edilmiştir. Yapılan EDS analiz incelemelerinde farklı sıcaklıklarda test edilen yaşlanan numunelerin kırık yüzeylerinde Al_2Cu , Al_2CuMg ve Mg_2Si çökeltilerinin olduğu görülmektedir. Bu tip çökelti dislokasyonların hareketini engelleyerek dayanımın artmasına neden olurken % uzama değerlerini düşürebilmektedir [132].



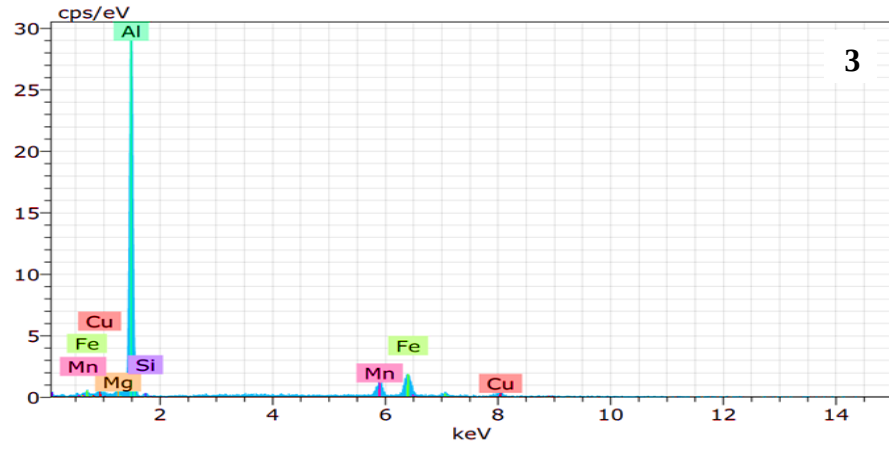
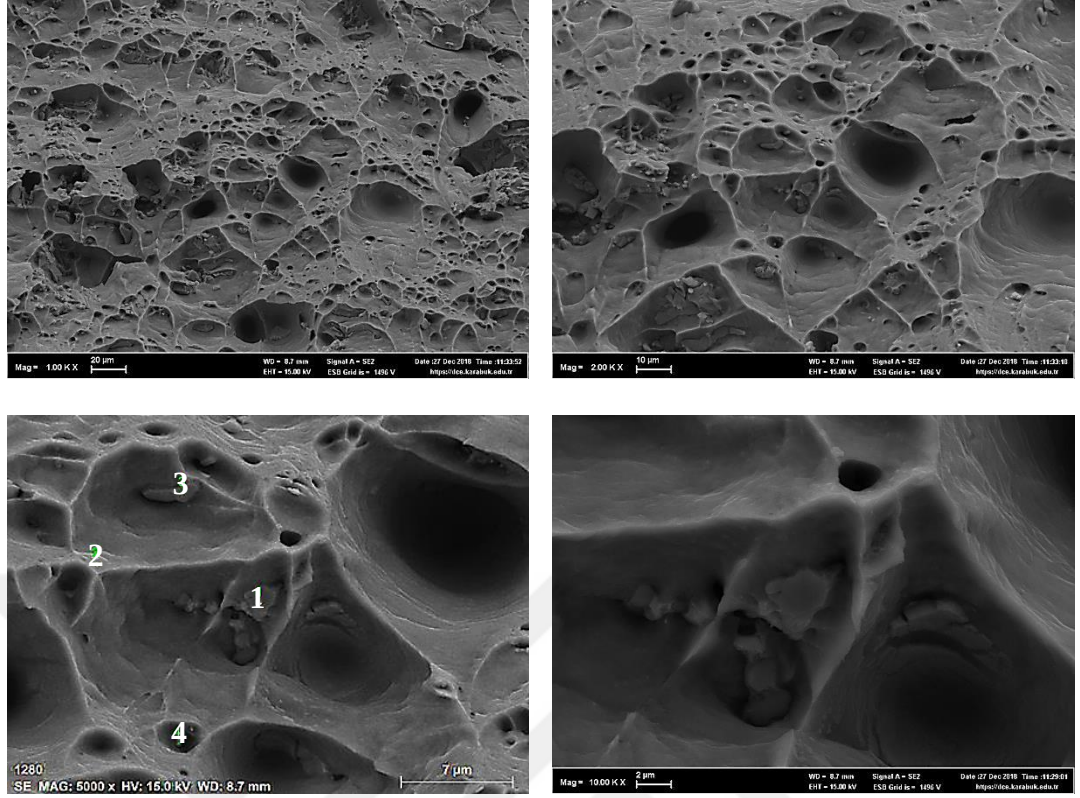
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.90	93.77	0.39	0.16	0.00	3.77
2	1.08	62.48	5.85	10.91	12.32	7.36
3	1.09	58.92	0.29	1.55	9.35	28.78
4	4.77	89.64	0.47	0.33	0.02	4.77
5	2.04	93.54	0.32	0.13	0.06	3.92
Mean value:	2.18	79.67	1.46	2.62	4.35	9.72
Sigma:	1.52	17.44	2.45	4.67	6.01	10.75
Sigma mean:	0.68	7.80	1.10	2.09	2.69	4.81

Şekil 6.33. 25°C'de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



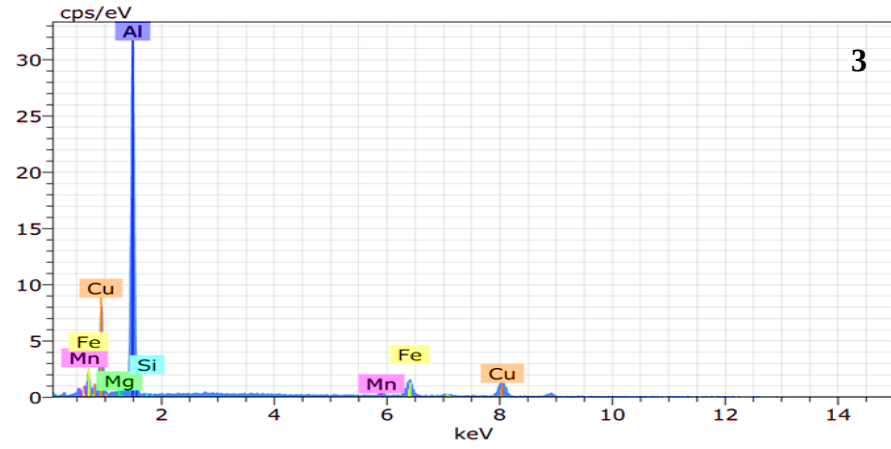
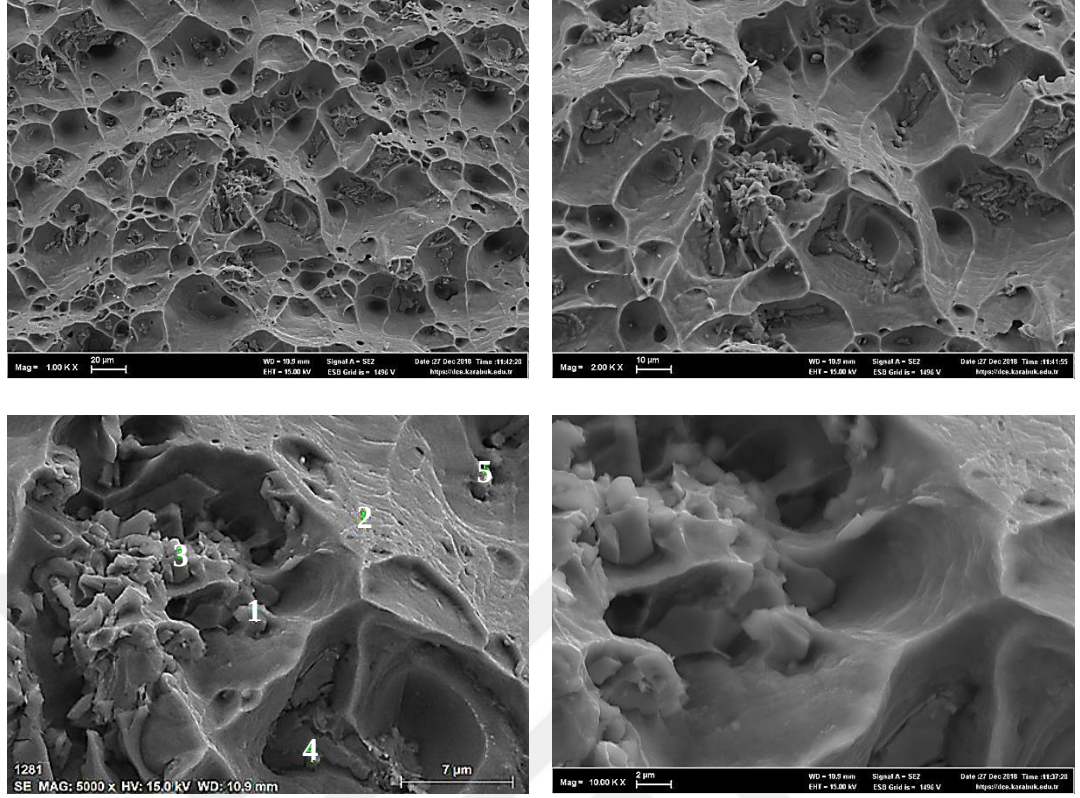
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	2.06	93.75	0.33	0.27	0.11	3.48
2	0.62	54.90	0.09	9.35	21.87	13.16
3	1.36	60.84	0.43	2.13	9.49	25.75
4	10.80	84.10	0.92	0.45	0.62	3.12
Mean value:	3.71	73.40	0.44	3.05	8.02	11.38
Sigma:	4.76	18.52	0.35	4.28	10.19	10.65
Sigma mean:	2.38	9.26	0.17	2.14	5.09	5.32

Şekil 6.34. 150°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.78	93.20	0.14	0.58	0.30	4.00
2	0.78	61.24	2.29	9.64	17.33	8.72
3	0.81	59.68	0.00	6.88	16.25	16.38
4	5.55	57.22	1.23	0.07	0.22	35.70
Mean value:	2.23	67.83	0.92	4.29	8.53	16.20
Sigma:	2.26	16.99	1.07	4.72	9.55	13.97
Sigma mean:	1.13	8.49	0.53	2.36	4.78	6.98

Şekil 6.35. 250°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütmelelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.

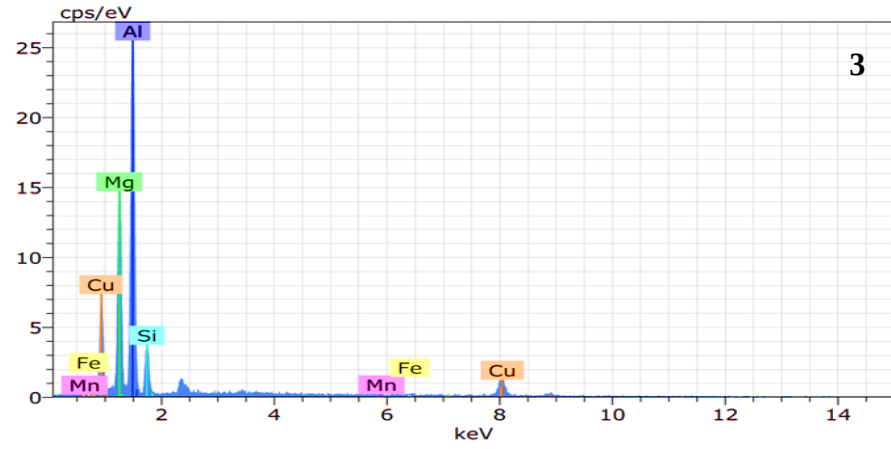
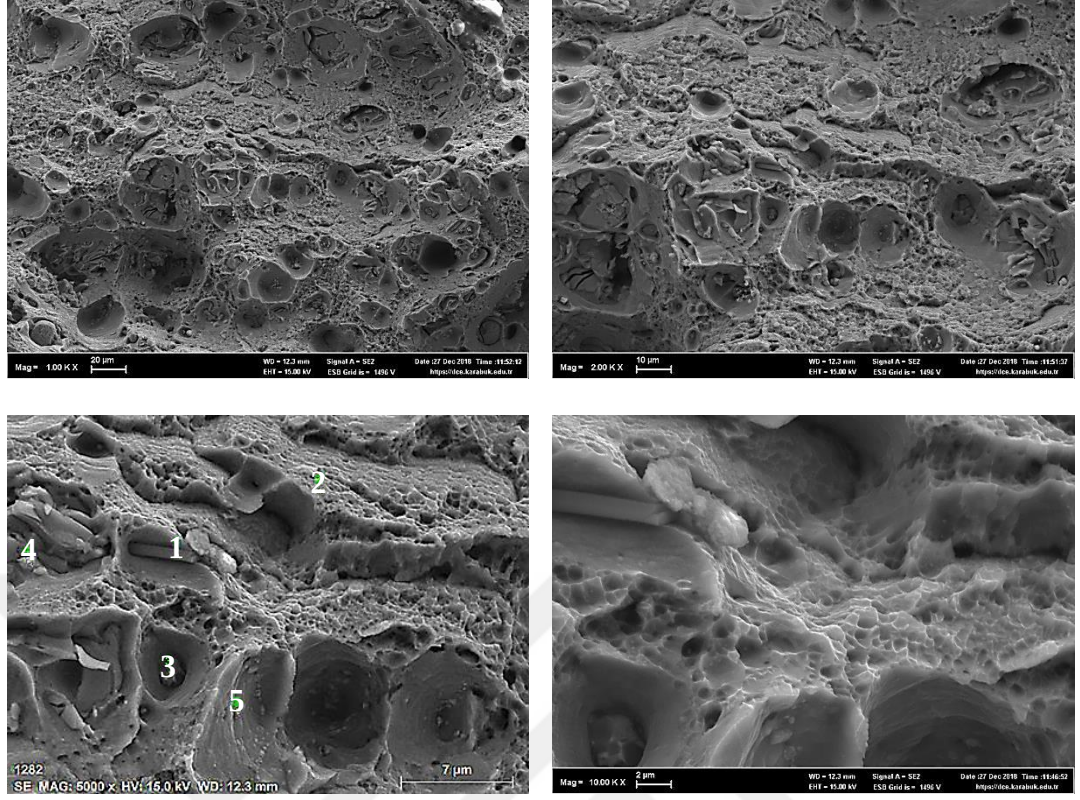


Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	0.92	66.11	2.39	9.36	14.32	6.90
2	1.86	93.71	0.27	0.21	0.18	3.78
3	0.57	47.49	0.06	1.75	13.31	36.82
4	0.86	63.26	3.26	7.62	15.16	9.84
5	2.20	67.67	4.91	9.10	7.93	8.19
Mean value:	1.28	67.65	2.18	5.61	10.18	13.11
Sigma:	0.70	16.64	2.05	4.31	6.26	13.44
Sigma mean:	0.31	7.44	0.92	1.93	2.80	6.01

Şekil 6.36. 350°C’de çekme testine tabi tutulan yaşlanan numunenin farklı büyütmeelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.

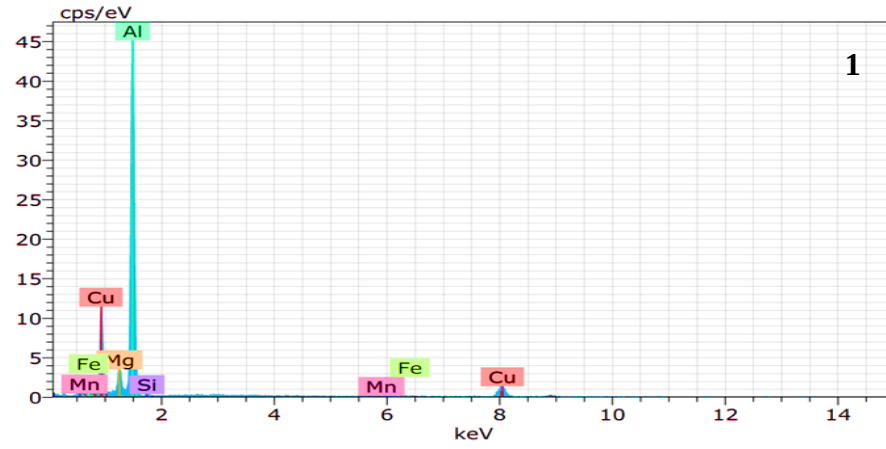
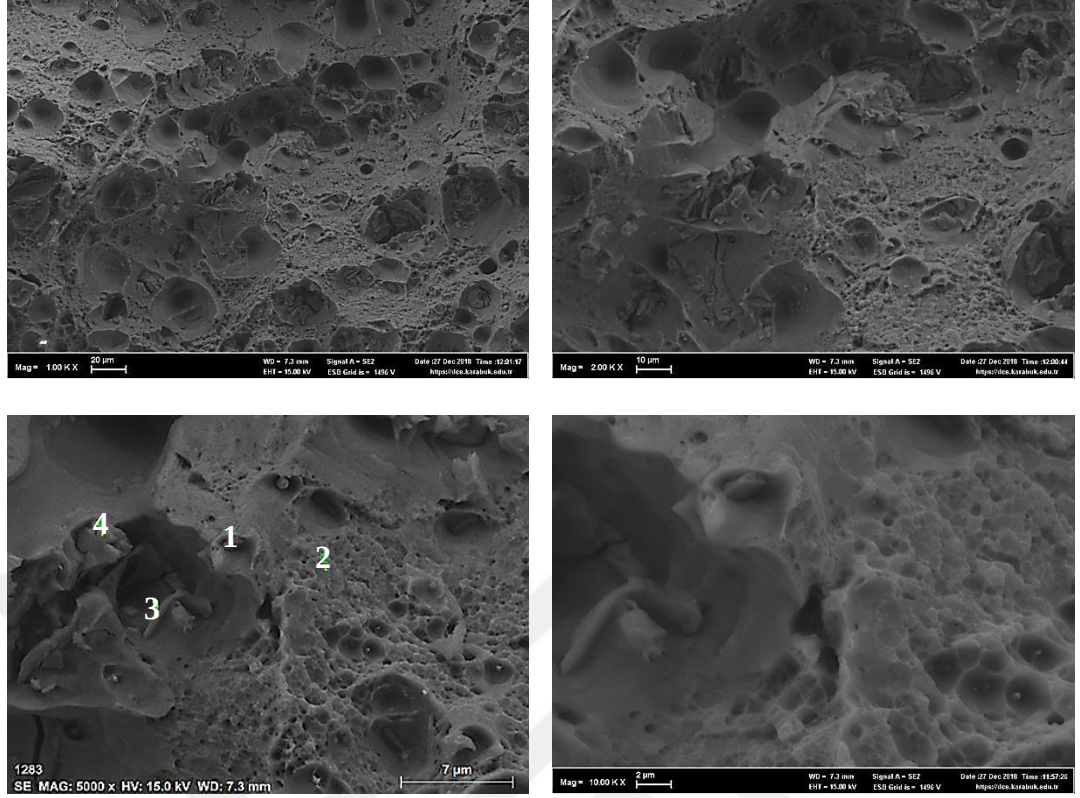
Şekil 6.37, 38, 39 ve 40'da sırasıyla 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C'de test edilmiş aşırı yaşlanan numunelerin SEM kırık yüzey resimleri gösterilmektedir. Yaşlanma süresindeki artışa bağlı olarak, aşırı yaşlanan numunelerin kırık yüzeyinde çukurcukların yani petekli yapının daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Petekli yapının fazla olması sünek kırılmanın oluşmasına neden olarak % uzama değerlerini arttırmıştır. 190°C'de 72 saat yaşlandırılan aşırı yaşlanmış numunelerde çökeltilerin kabalaşmasından dolayı dislokasyonlar herhangi bir engelle karşılaşmadan rahat bir şekilde hareket edebilmektedir [97,131]. Bunun sonucunda kırık yüzey petekli yapıdan oluşur ve numunelerin % uzama değerleri artar. Ayrıca farklı sıcaklıklarda çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunelerde derin ve büyük çukurcukların kırılma yüzeylerinde olduğu görülmüştür. Bu derin ve büyük çukurcuklar farklı sıcaklıklarda uygulanan çekme testi sırasında kaba çökeltilerin yüzeyden ayrılmasıyla meydana gelmektedir. Farklı sıcaklıklarda test edilen numunelerin kırık yüzeylerinden alınan EDS analiz sonuçlarına göre bu çökeltilerin Al_2Cu , Al_2CuMg ve Al (Cu, Fe, Mn, Si) çökeltileri olduğu tespit edilmiştir.

Ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin SEM kırık yüzey resimleri birbirleri ile kıyaslandığında, 25°C'de test edilen ana malzemenin ve solüsyona alınan numunenin çukurcukların birleşmesinden oluşan mikro boşluklu transgranüler (tane içi) kırılma ile sünek olarak koptuğu görülmektedir. Fakat yaşlanan numunenin kırılma yüzeyi petekli yapı ve ayrılma düzlemlerinden meydana geldiği için kırılmanın kısmen sünek ve kısmende gevrek olduğu tespit edilmiştir. Aşırı yaşlanan numuneler ise 190°C'de 72 saat yaşlandırma işleminde çökeltilerin kabalaşmasına bağlı olarak daha fazla petekli yapı sergilemişlerdir. Bu durum aşırı yaşlanan numunelerin sünek kırılma ile kopmasına öncülük etmiştir. Ayrıca ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin hepsi test sıcaklığının 25°C'den 150°C, 250°C ve 350°C'ye çıkması ile kırılma tipinin transgranüler (tane içi) kırılmadan intergranüler (tane sınırı) kırılmaya geçtiğini göstermiştir.



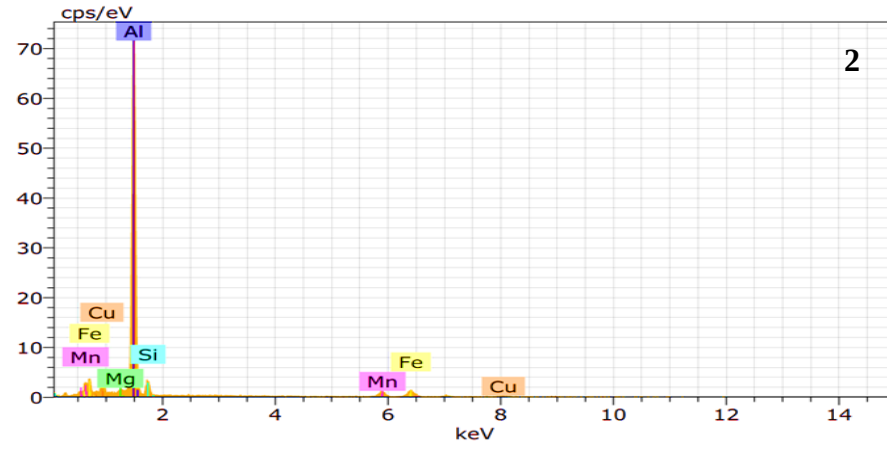
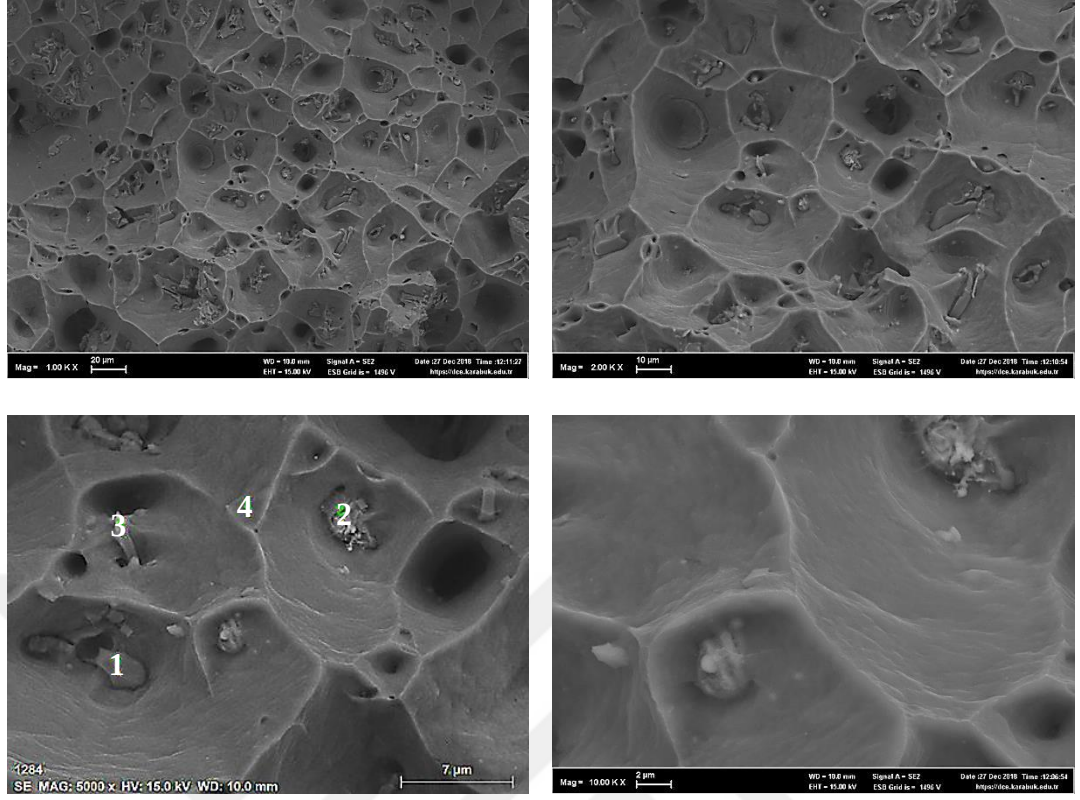
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.02	64.80	3.67	7.10	14.19	9.22
2	1.83	94.29	0.45	0.29	0.00	3.13
3	20.45	41.04	5.93	0.55	0.26	31.77
4	1.21	73.53	3.42	5.66	9.92	6.27
5	16.30	71.47	8.58	0.32	0.63	2.70
Mean value:	8.16	69.03	4.41	2.78	5.00	10.62
Sigma:	9.44	19.14	3.04	3.32	6.62	12.12
Sigma mean:	4.22	8.56	1.36	1.49	2.96	5.42

Şekil 6.37. 25°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütme ölçeklerinde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



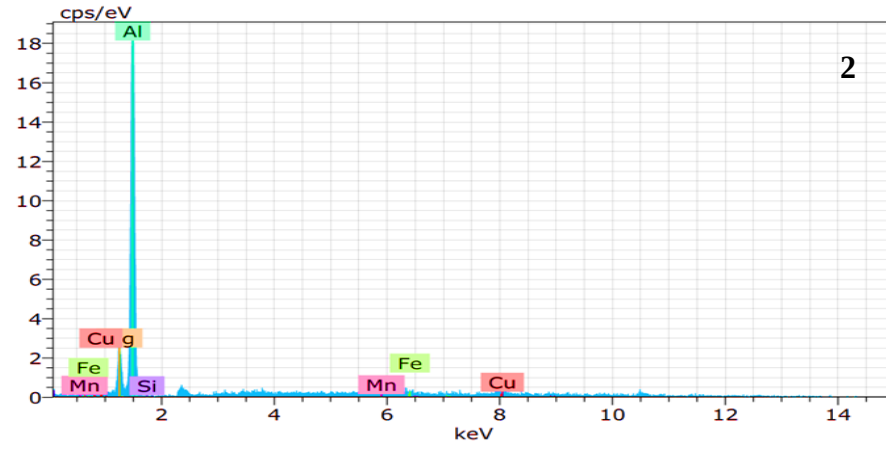
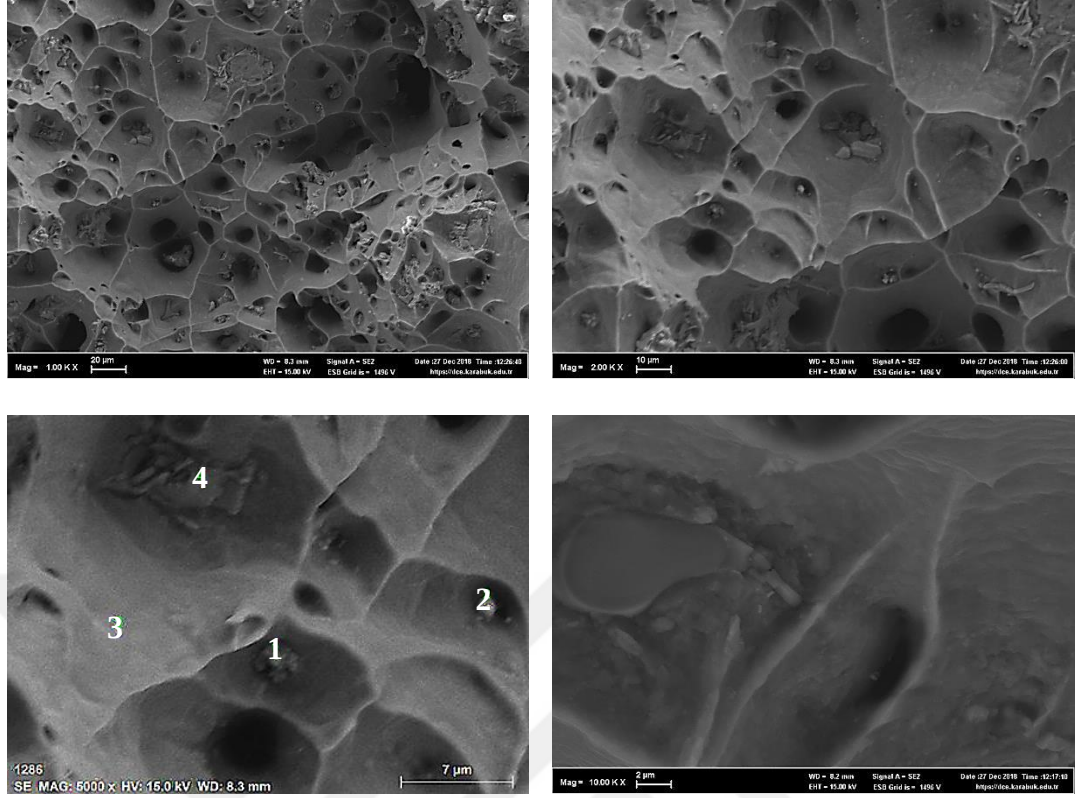
Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	4.56	59.31	0.19	0.29	0.51	35.14
2	1.96	91.30	0.64	0.81	0.35	4.95
3	0.96	65.74	3.16	7.53	13.82	8.79
4	0.90	55.60	0.40	2.50	9.98	30.63
Mean value:	2.09	67.99	1.09	2.78	6.16	19.88
Sigma:	1.71	16.10	1.39	3.30	6.80	15.21
Sigma mean:	0.86	8.05	0.69	1.65	3.40	7.61

Şekil 6.38. 150°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütmelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.61	91.34	0.00	0.79	0.29	5.96
2	0.83	60.73	0.50	6.98	15.76	15.19
3	13.93	79.79	1.25	0.88	0.00	4.15
4	1.92	93.23	0.07	0.44	0.04	4.30
Mean value:	4.58	81.27	0.46	2.27	4.02	7.40
Sigma:	6.26	14.93	0.58	3.14	7.82	5.26
Sigma mean:	3.13	7.46	0.29	1.57	3.91	2.63

Şekil 6.39. 250°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütmelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.



Mass percent (%)						
Spectrum	Mg	Al	Si	Mn	Fe	Cu
1	1.97	93.31	0.27	0.29	0.00	4.16
2	1.15	79.90	0.00	2.21	0.67	16.07
3	1.97	94.14	0.21	0.08	0.06	3.54
4	1.33	82.70	0.01	2.12	3.13	10.70
Mean value:	1.60	87.51	0.13	1.18	0.96	8.62
Sigma:	0.43	7.27	0.14	1.15	1.47	5.93
Sigma mean:	0.21	3.64	0.07	0.57	0.74	2.97

Şekil 6.40. 350°C’de çekme testine tabi tutulan aşırı yaşlanmış numunenin farklı büyütmelerde alınan SEM kırık yüzey görüntüleri ve nokta EDS analizi.

BÖLÜM 7

GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

7.1. GENEL SONUÇLAR

Bu çalışmada, ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan AA 2024 alüminyum alaşımının soğuk, ılık ve sıcak deformasyon kabiliyetine çökelti oluşumunun etkisi araştırılmıştır. Bu amaçla, numunelere $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranında 25°C, 150°C, 250°C ve 350°C test sıcaklığında çekme testi uygulanmış olup aşağıda belirtilen sonuçlar bu çalışma kapsamında elde edilmiştir.

1. Solüsyona alma işlemi, yaşlandırma sıcaklığı ve süresi AA 2024 alüminyum alaşımının çökelti sertleşmesinde çok önemli bir rol oynamaktadır. Kararlı (S'), yarı kararlı (S') ve Al₂Cu veya Al₂CuMg gibi kararlı olmayan (S) çökelti oluşmasıyla farklı mukavemet ve süneklik değerleri elde edilmektedir. Yapay yaşlanma işlemiyle S tipi çökelti oluşmaya başlar ve yaşlanma süresine bağlı olarak hacimsel oranı artar. Bunun bir sonucu olarak alaşımın mukavemeti yükselir, ancak % uzaması düşer. Yaşlanma süresindeki daha fazla artış, daha büyük S tipi çökelti oluşmasına yol açar ve AA 2024 alaşımının mukavemetinde düşüş, % uzamada ise artış meydana gelir.
2. Ana malzeme, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin çekme ve akma dayanım değerleri, 25°C-350°C test sıcaklığı aralığında sürekli azalmıştır. Bununla birlikte solüsyona alınan numunelerin test sıcaklığı 150°C'ye yükseldiğinde çekme ve akma mukavemetinde artış gözlenmektedir. Test sıcaklığının 250°C ve 350°C'ye yükselmesiyle birlikte akma ve çekme dayanımı düşmüştür. Bu durum 150°C'de sıcak çekme testinden sonra solüsyona alınan numunede dinamik çökeltinin gerçekleştiğini göstermektedir.

3. Ana malzeme, yaşılanan ve aşırı yaşılanan numunelerin % uzama değerleri 25°C-350°C test sıcaklığı aralığında sürekli artmıştır. Bunun nedeni ana malzeme, yaşılanan ve aşırı yaşılanan numunelerde meydana gelen dinamik toparlanma ve dinamik yeniden kristalleşmedir. Bununla birlikte solüsyona alınmış numuneler 150°C, 250°C ve 350°C’de test edildiğinde 25°C’ye göre akma dayanımında sırasıyla % 39, % 20 ve % 1 oranında bir artış olmuştur. Bu durum solüsyona alınan numunelerde dinamik çökmenin çok aktif olduğunu göstermektedir.
4. 25°C’de test edilen solüsyona alınmış numunede PLC etkisi olarak bilinen ve alüminyum alaşımlarında kolaylıkla gözlemlenen testere dişi davranış görülmektedir. Metallerde görülen testere dişi davranış yer alan atomların dislokasyonların hareketini engellemesi sonucu ortaya çıkmaktadır. Bu mekanizma mukavemetin artmasına katkı sağlamaktadır.
5. Solüsyona alınan numune 150°C’de test edildiğinde çalışma sertleşmesi oranının azaldığı fakat test sıcaklığının 250°C’ye çıkması ile arttığı görülmektedir. 350°C’de test edilen numunede ise çalışma sertleşmesi oranının düştüğü görülmüştür. Bununla birlikte ana malzeme, yaşılanan ve aşırı yaşılanan numunelerin çalışma sertleşmesi oranı 25°C-350°C test sıcaklığı aralığında sürekli düşüş göstermiştir. Solüsyona alınan numuneler, ana malzeme, yaşılanan ve aşırı yaşılanan numunelere kıyasla tüm test sıcaklıklarında daha yüksek çalışma sertleşmesi oranı göstermiştir. Bu durum solüsyona alınan numunelerin dinamik deformasyon yaşlanmasından ve dinamik çökelti oluşumundan daha fazla etkilendiğini ortaya koymaktadır.
6. Ana malzeme, solüsyona alınan, yaşılanan ve aşırı yaşılanan numunelerin SEM kırık yüzey resimleri birbirleri ile kıyaslandığında, 25°C’de test edilen ana malzemenin ve solüsyona alınan numunenin çukurcukların birleşmesinden oluşan mikro boşluklu transgranüler (tane içi) kırılma ile sünek olarak koptuğu görülmektedir. Fakat yaşılanan numunenin kırılma yüzeyi petekli yapı ve ayrılma düzlemlerinden meydana geldiği için kısmen sünek ve kısımda gevrek olduğu tespit edilmiştir. Aşırı yaşılanan numuneler ise 190°C’de 72 saat

yaşlandırma işleminde çökeltilerin kabalaşmasına bağlı olarak daha fazla petekli yapı sergilemişlerdir. Bu durum aşırı yaşlanan numunelerin sünek kırılma ile kopmasına öncülük etmiştir.

7. Ana malzeme, solüsyona alınan, yaşlanan ve aşırı yaşlanan numunelerin hepsi test sıcaklığının 25°C'den 150°C, 250°C ve 350°C'ye çıkması ile kırılma tipinin transgranüler (tane içi) kırılmadan intergranüler (tane sınırı) kırılmaya geçtiğini göstermektedir.

7.2. ÖNERİLER

1. Çökelme sertleşmesi solüsyona alma sıcaklığı ve tutma süresi, yaşlanma sıcaklığı ve tutma süresi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini etkilemektedir. Bu çalışmada solüsyona alma sıcaklığı 520°C, tutma süresi 2 saat, yaşlandırma sıcaklığı 190°C, tutma süresi 24 ve 72 saat olarak belirlenmiş ve kullanılmıştır. Buna bağlı olarak farklı solüsyona alma sıcaklığı, yaşlandırma sıcaklığı ve tutma süreleri kullanılarak AA 2024 alaşımının soğuk, ılık ve sıcak deformasyon kabiliyeti araştırılabilir.
2. Bu çalışma $5,55 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ deformasyon oranı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Farklı deformasyon oranları kullanılarak AA 2024 alaşımının soğuk, ılık ve sıcak deformasyon kabiliyeti araştırılabilir.
3. AA 2024 alaşımının kriyojenik sıcaklıklardaki deformasyon kabiliyeti araştırılabilir.

KAYNAKLAR

1. Alexopoulos, N. D., Velonaki Z., Stergiou, C. I. and Kourkoulis S. K., “Effect of ageing on precipitation kinetics, tensile and work hardening behavior of Al-Cu-Mg (2024) alloy”, **Mater. Sci. Eng. A**, 700: 457-467 (2017).
2. Lin, Y. C., Xia, Y. C., Jiang, Y. Q., Zhou, H. M. and Li, L. T., “Precipitation hardening of 2024-T3 aluminum alloy during creep ageing”, **Mater. Sci. Eng. A**, 565: 420-429 (2013).
3. Li, H., Xu, W., Wang, Z., Fang, B., Song, R. and Zheng, Z., “Effects of re-ageing treatment on microstructure and tensile properties of solution treated and cold-rolled Al-Cu-Mg alloys”, **Mater. Sci. Eng. A**, 650: 254-263 (2016).
4. Trimble, D. and Donnell, G. E. O., “Flow stress prediction for hot deformation processing of 2024Al-T3 alloy”, **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 26: 1232-1250 (2016).
5. Zhou, J., Xu, S., Huang S., Meng X., Sheng, J., Zhang, H., Li, J., Sun Y. and Boateng, E. A., “Tensile properties and microstructures of a 2024-T351 aluminum alloy subjected to cryogenic treatment”, **Metals**, 6 (279): 1-10 (2016).
6. Jena, P. K., Savio, S. G., Kumar, K. S., Madhu, V., Mandal, R. K. and Singh, A. K., “An experimental study on the deformation behavior of aluminium armour plates impacted by two different non-deformable projectiles”, **Procedia Engineering**, 173: 222-229 (2017).
7. Radutoiu, N., Alexis, J., Lacroix, L., Petit, J. A., Abrudeanu, M., Rizea, V. and Vulpe, S., “Effect of the over-ageing treatment on the mechanical properties of AA2024 aluminum alloy”, **Revista de Chimie**, 63 (10): 1042-1045 (2012).
8. He, Z., Wang, Z., Lin, Y. and Fan, X., “Hot deformation behavior of a 2024 aluminum alloy sheet and its modeling by fields-backofen model considering strain rate evolution”, **Metals**, 9 (243): 1-13 (2019).
9. Peralta, O. N., Figueroa, I. A., Rodriguez, G. L. and Gonzalez, G., “New evidence on the nature of the metastable S''-phase on Al-Cu-Mg alloys”, **Mater. Chem. and Phys.**, 130: 431-436 (2011).
10. Gazizov, M., Marioara, C. D., Friis, J., Wenner, S., Holmestad, R. and Kaibyshev, R., “Precipitation behavior in an Al-Cu-Mg-Si alloy during ageing”, **Mater. Sci. Eng. A**, 767: 1-16 (2019).

11. Song, Y. F., Ding, X. F., Zhao, X. J., Xiao, L. R. and Guo, L., “The effect of stress-aging on dimensional stability behavior of Al-Cu-Mg alloy”, **Journal of Alloys and Compounds**, 718: 298-303 (2017).
12. Koziel, J., Blaz, L., Wloch, G., Sobata, J. and Lobry, P., “Precipitation processes during non-isothermal ageing of fine-grained 2024 alloy”, **Arch. Metall. Mater.**, 61 (1): 169-176 (2016).
13. Huda, Z., Taib, N. I. and Zaharinie, T., “Characterization of 2024-T3: An aerospace aluminum alloy”, **Mater. Chem. Phys.**, 113: 515-517 (2009).
14. Seidt, J. D. and Gilat A., “Plastic deformation of 2024-T351 aluminum plate over a wide range of loading conditions”, **Int. J. of Solids and Struc.**, 50: 1781-1790 (2013).
15. Ebrahimi, G. R. and Ezatpour H. R., “Effect of precipitation on the warm deformation of AA2024 alloy”, **Mater. Sci. Eng. A**, 681: 10-17 (2017).
16. El-Danaf, E. A., AlMajid, A. A. and Soliman, M. S., “Hot deformation of AA6082-T4 aluminum alloy”, **J. Mater. Sci.**, 43: 6324-6330 (2008).
17. Zhang, H., Li, L., Yuan D. and Peng, D., “Hot deformation behavior of the new Al-Mg-Si-Cu aluminum alloy during compression at elevated temperatures”, **Mater. Charact.**, 58: 168-173 (2007).
18. Zhang, H., Jin, N. and Chen, J., “Hot deformation behavior of Al-Zn-Mg-Cu-Zr aluminium alloys during compression at elevated temperature”, **Trans. Nonferrous Met. Soc. China**, 21: 437-442 (2011).
19. 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).
20. Zhao, D. and Lampman, S., “Hot tension and compression testing”, ASM Handbook, 8, **ASM Inter.**, 152-163 (2000).
21. Nalçacıoğlu, C., “Toz metalürjisi yöntemi ile üretilen AA7075 alüminyum alaşımlarında T6 ısıtıl işlem parametrelerinin elektrik iletkenliği ve korozyon özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 3-5 (2017).
22. Dilmeç, M., Tınkır, M. ve Arıkan, H., “Al 2024 alaışımının çökelme sertleşmesi işlemi koşullarının şekillendirilebilirliğe etkisinin incelenmesi”, **Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi**, 30 (1): 231-248 (2015).
23. Özel, S., “Alüminyum alaşımı ve bronz yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprey yöntemiyle kaplanması araştırılması”, Doktora Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 3-5 (2009).

24. Yalçın, N., Kayır, Y. ve Erkal, S., “AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlanma yöntemlerinin işlenebilirliğe etkisinin taguchi ve anova ile araştırılması”, *Politeknik Dergisi*, 20 (4): 743-751 (2017).
25. 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, 3-4 (2013).
26. Delikanlı, Y. E., “Alüminyum alaşımlarında çökelme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Isparta, 1-9 (2011).
27. 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, 5-9 (2015).
28. Fakıoğlu, A., “ Yaşlandırılan AA7075 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-4 (2012).
29. Başer, E., “Yaşlandırma parametrelerinin ETİAL-160 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-12, 17, 20 (2018).
30. Gökçe, A., “Toz metalürjisi yöntemiyle üretilen Al-Cu alaşımlarının mekanik özelliklerinin geliştirilmesi”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 26-28 (2013).
31. Büyükdoğan, S., “Yaşlandırılan Al-Mg-Si alaşımının aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-8, 16, 23-26, 75-76 (2011).
32. Gülerüz, K., “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alaşımının mekanik özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-11, 36-37 (2011).
33. 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, 9-11, 14, 17-20 (2011).
34. Eren, H., “Al-Si alaşımının mekanik özelliklerine magnezyum elementinin etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 3-9, 12, 17 (2017).
35. Onur, A., “AA6XXX serisi alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemine bağlı olarak işlenebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Bilecik, 2-9 (2014).

36. Dilmeç, M., “2024-T4 Alüminyum sacların şekillendirme sınır eğrilerin kalınlığa göre değişimi”, Doktora Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 6-7 (2012).
37. Avşar, M., “Yaşlandırma parametrelerinin AA6061 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine ve şekillendirmeye olan etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Niğde, 4, 8, 37, 41 (2011).
38. Erkal, S., “AA2024 Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısıtma işlemlerinin mekanik özelliklere ve işlenebilirliğe etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 5-10, 14-16 (2011).
39. Koç, F. G., “AA7075 Alüminyum alaşımına ısıtma işlem parametrelerinin endüstriyel koşullarda optimizasyonu”, Doktora Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 5-6, 28, 71 (2019).
40. Bebekoğlu, S., “Havacılık sanayinde kullanılan, 2024 ve 7075 alüminyum alaşımlarının, tig kaynak yöntemi ile birleştirilmesi, makro ve mikro yapı ile mukavemet özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Arel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 15, 83 (2019).
41. Meyveci, A., “Yaşlandırılmış 2XXX ve 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının aşınma davranışlarının incelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 9, 12-13, 18-27, 52-53 (2007).
42. Tufan, M., “AA6082 Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısıtma işleminin işlenebilirliğe ve yüzey pürüzlülüğüne etkisinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 5-9, 38 (2011).
43. Tekin, R., “AA 2014, AA 6082 Alüminyum alaşımlarının oksidasyonu ve mekanik özelliklerin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Afyon, 10, 12, 15-17, 27 (2014).
44. 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, 34 (2018).
45. Burmabıyık, M., “Bakır-alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Edirne, 7-8 (2019).
46. Ölmez, S., “Alüminyum esaslı alaşımların yüksek sıcaklıkta aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 18 (2016).

47. Mercan, E., “5XXX-6XXX Alüminyum alaşımlarının otomatik mig kaynak yöntemi ile birleştirilebilirliğinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 10-11 (2018).
48. Patır, A., “AA 2024-B₄C Kompozitlerin özelliklerine yaşlandırma parametrelerinin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Trabzon, 17, 24-27, 85-86 (2014).
49. Çolak, H., “AA 7075 Alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma işleminin mikroyapı ve bazı mekanik özelliklerine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Elazığ, 5 (2019).
50. 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, 9-10 (2015).
51. Tomruk, S., “Toz metalürjisi yöntemi ile üretilmiş AA2014 alüminyum alaşımının mikroyapısal karakterizasyonu ve aşınma davranışlarının incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 26-32 (2010).
52. Erdoğan Y. A., “Termo-Mekanik işlem uygulanmış AA6082 alüminyum alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik karakterizasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kocaeli, 32-36 (2018).
53. Demirel, M. Y., “Alüminyum sac malzemelerde sıcaklığın geri esnemeye etkisinin deneysel araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 20-23 (2018).
54. Gündüz, S., “Mekanik Metalürji Ders Notları”, **Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği Bölümü**, Karabük (2015).
55. Savaşkan, T., “Malzeme Bilgisi ve Muayenesi”, **Celepler Matbaacılık**, Trabzon, 135-139 (2012).
56. Gündüz, S., “Metalürjide Faz Diyagramları”, **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, 82-86 (2013).
57. 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).
58. Bagaryatsky, Y. A., “Structural changes on aging Al-Cu-Mg”, **Dokl. Akad. SSSR.**, 87: 397-559 (1952).
59. Karabulut, H., “Mikroalaşımlı çeliklerde yaşlanma sertleştirilmesinin mekanik özelliklere etkisi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Zonguldak, 35-36 (2004).

60. Okumuş, Ş., “Düşük karbonlu mikroalaşımli çeliklerde soğuma ve deformasyon yaşlanmasının mekanik özelliklere etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 30-32 (2013).
61. Türkmen, M., “Çift fazlı çeliklerde martenzit morfolojisi ve hacim oranının statik deformasyon yaşlanma davranışı üzerine etkisi”, Doktora Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 36-37 (2013).
62. Bülbül, A., “İş makinalarının jantlarında statik yaşlanmanın etkisinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 9-10 (2014).
63. Taştür, D., “AISI H10 Sıcak iş takım çeliğinin dinamik deformasyon yaşlanma özelliklerinin araştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, **Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Karabük, 20-25 (2018).
64. Tosun, A., “Yaşlandırılan çift-fazlı çeliklerin mekanik davranışlarının incelenmesi”, Bilim Uzmanlığı Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Zonguldak, 44-45 (2007).
65. Bayramın, B., “Dynamic strain aging of dual phase steels in forming applications”, M. Sc. Thesis, **The Graduate School of Natural and Applied Sciences of Middle East Technical University**, Ankara, 25-26 (2017).
66. Ivanchenko, M., “Dynamic strain aging of austenitic stainless steels and Ni-base alloys”, Ph. D. Thesis, **Aalto University School of Science and Technology Faculty of Engineering and Architecture**, Espoo, 24-26 (2010).
67. Robinson, J. M., “Aspects of serrated flow in aluminium alloys”, Ph. D. Thesis, **The Department of Materials Engineering and The Faculty of Engineering of The University of Cape Town**, Cape Town, 7-13 (1992).
68. Mohamed, G. A., “Dynamic strain ageing behaviour of 316l austenitic stainless steel”, Ph. D. Thesis, **The Graduate School of Natural and Sciences of Karabük University**, Karabük, 44-48 (2018).
69. Gavas, M., Yaşar, M., Aydın, M. ve Altunpak, Y., “Üretim Yöntemleri ve İmalat Teknolojileri”, **Seçkin Yayıncılık**, Ankara, 145-147 (2013).
70. Aktaş, D., “Metalik malzemelerde tane boyutunun pekleşme katsayısına etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Bartın Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bartın, 56-60 (2012).
71. Demir, F. E., “Arayer atomsuz (IF-INTERSTITIAL FREE) çelikte farklı deformasyon oranları ve tavlama sıcaklıklarının tane büyümesine etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, **Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Zonguldak, 22-29 (2011).

72. Osmanoğlu, T., “AISI 304 ve 430 kalite paslanmaz çeliklerin mikroyapılarına, mekanik özelliklerine ve korozyon davranışlarına soğuk deformasyonun etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 29-31 (2012).
73. Akgün, M., “AISI 1040 Çeliğinde deformasyon oranının işlenebilirliğe etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 10-12 (2013).
74. Pekince, D., “Sac metal bükümlerinde K faktörünün mukavemetsel olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 5-11 (2019).
75. Tiryakioğlu, M. F., “AA 2024 ve AL 5754 sac metal malzemelerde bükme esnasında oluşan geri esneme miktarının deneysel verilerle matematiksel olarak modellenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 31-32 (2013).
76. Yıldırım, S., “Saf bakırın yüksek sıcaklıktaki mekanik davranışı: Dinamik yeniden kristalleşme ve dinamik tane büyümesi”, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4-6, 28-29, 41-43 (2001).
77. Anket, O., “DC04 Otomotiv sacının hidromekanik yöntem ile şekillendirilebilirliğinin sonlu elemanlar yöntemi ve deneysel olarak incelenmesi”, Doktora Tezi, *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Balıkesir, 38-46 (2011).
78. Koçar, O., “Derin çekme işleminde ürün kalitesinin tahmini ve kontrolü”, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Sakarya, 41-55 (2014).
79. Batuk, Ç., “AA7075 Alüminyum alaşımlarının konik şekillendirilebilirliğine işlem parametrelerinin etkisi”, Yüksek Lisans Tezi, *Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Karabük, 25-30 (2018).
80. Şenyüz, G., “304 Kalite paslanmaz çelik ve galvaniz sacların biçimlendirme kabiliyetlerinin çeşitli yönleri ile incelenerek karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, *Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 4, 95, 103-107, 134 (2008).
81. Kurumahmut, O., “22MnB5 Çelik sacların elektrikli ısıtma ile sıcak şekillendirilmesinin deneysel analizleri”, Yüksek Lisan Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul, 10-11 (2009).
82. Çavuşoğlu, O., “Sac metal şekillendirme işlemlerinde pres hızı ve malzemenin şekillendirmeye etkilerinin deneysel ve teorik olarak incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Ankara, 13-21 (2013).

83. Doğu, M., “Çamaşır makinesi imalatında kullanılan çelik sacların şekil alma kabiliyetinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, İstanbul, 11-36 (2014).
84. Pekel, H., “Sıcaklık ve çekme hızının AA 5754-O sacların şekillendirilebilirliğine etkileri”, Yüksek Lisans Tezi, **Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Konya, 3-22, 27 (2008).
85. Bayram, H., “Alüminyum alaşımlarının artışı şekillendirilebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Manisa, 11-17 (2014).
86. Ülker, S., “Al-2024 Alüminyum sacın inkremental şekillendirilebilirliğinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Dumlupınar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Kütahya, 11-15 (2011).
87. Meriç, C., Atik, E. ve Özkaya, E., “Deformasyon sıcaklığının ve deformasyon hızının Al 99.0’un mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 3 (1): 293-298 (1997).
88. Li, D. and Ghosh, A., “Tensile deformation behavior of aluminum alloys at warm forming temperatures”, **Mater. Sci. Eng. A**, 352: 279-286 (2003).
89. Kayalı, E. S. ve Ensari, C., “Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları”, **İTÜ**, İstanbul, 152-159 (2000).
90. Alnıak, Ş. T., “Pirinç ve bronz malzemelerin yüksek sıcaklıkta deformasyonu”, Yüksek Lisans Tezi, **Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Ankara, 20-22 (2004).
91. Akbaş, F., “Metallerin Sıcak Şekillendirme parametrelerinin incelenmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 3-4 (2011).
92. Eşiyok, F., “Türk otomotiv endüstrisinde sıcak şekillendirilebilirlik kalıp tasarımı yeteneğinin geliştirilmesi”, Yüksek Lisans Tezi, **Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü**, Bursa, 22-23 (2015).
93. Güleriyüz, K. ve Kaçar, R., “Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine etkisi”, **6th International Advanced Technologies Symposium (IATS’11)**, Elazığ, 147-152 (2011).
94. Reis, D. A. P., Couto, A. A., Domingues, N. I., Hirschmann, A. C. O., Zepka, S. and Neto, C. M., “Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024”, **Defect and Diffusion Forum**, 326-328: 193-198 (2012).

95. Güneş, İ., Erdoğan, M. and Çengelci, B., “Mechanical and electrical properties of artificially aged aluminium alloy AA 2024”, **Kovove Mater.**, 54: 379-387 (2016).
96. Zhao, Y. L., Yang, Z. Q., Zhang, Z., Su, G. Y. and Ma, X. L., “Double –peak age strengthening of cold-worked 2024 aluminum alloy”, **Acta Materialia**, 61: 1624-1638 (2013).
97. Tafti, M. F., Sedighi, M. and Hashemi, R., “Effects of natural ageing treatment on mechanical, microstructural and forming properties of Al 2024 aluminum alloy sheets”, **Iranian J. of Mater. Sci. Eng.**, 15 (4): 1-10 (2018).
98. Durmuş, H. K., Okur, A. ve Meriç, C., “AA 2024 ve AA 2024 Alüminyum alaşımlarında soğutma koşullarının sertliğe etkisinin incelenmesi”, **Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi**, 9 (1): 9-13 (2003).
99. Fujda, M., Mısıcko, R., Rusnakova, L., and Sojko, M., “Effect of solution annealing temperature on structure and mechanical properties of EN AW 2024 aluminium alloy”, **Journal of Metals, Materials and Minerals**, 17 (1): 35-40 (2007).
100. Çetin, M. H., Korkmaz, Ş., Çetin, M. E. ve Belrzaeg, M. A. E., “AA7075-T6 Alaşımının farklı sıcaklıklardaki çekme davranışının deneysel ve numerik yöntemler ile incelenmesi”, **Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi**, 6: 902-915 (2018).
101. Zhang, X., Ma, F., Zhang, W. and Li, X., “Kinetics of dynamic recrystallization AA2024 aluminum alloy”, **Modern Applied Science**, 8 (6): 47-52 (2014).
102. Fan, X., Suo, T., Sun, Q. and Wang, T., “Dynamic mechanical behavior of 6061 Al at elevated temperatures and different strain rates”, **Acta Mechanica Solida Sinica**, 26 (2): 111-120 (2013).
103. Deng, L., Zhao, T., Jin, J. and Wang, X., “Flow behavior of 2024 aluminium alloy sheet during hot tensile and compressive processes”, **Procedia Engineering**, 81: 1049-1054 (2014).
104. Ebrahmi, G. R., Hazaki, A. Z., Haghshenas, M. and Arabshani, H., “The effect of heat treatment on hot deformation behaviour of Al 2024”, **Journal of Materials Processing Technology**, 206: 25-29 (2008).
105. Zhang, B. and Baker, T. N., “Effect of the heat treatment on the hot deformation behaviour of AA6082 alloy”, **Journal of Materials Processing Technology**, 153-154: 881-885 (2004).

106. Fan, X., He, Z., Yuan, S. and Lin, P., "Investigation on strengthening of 6A02 aluminum alloy sheet in hot forming-quenching integrated process with warm forming dies", *Mater. Sci. Eng. A*, 587: 221-227 (2013).
107. Anjabin, N., Taheri, A. K. and Kim, H. S., "Simulation and experimental analyses of dynamic strain aging of a supersaturated age hardenable aluminum alloy", *Mater. Sci. Eng. A*, 585: 165-173 (2013).
108. Benallal, A., Berstad, T., Borvik, T., Clausen, A. H. and Hopperstad, O. S., "Dynamic strain aging and related instabilities: experimental, theoretical and numerical aspects", *European Journal of Mechanics A/Solids*, 25: 397-424 (2006).
109. Chatterjee, A., Sarkar, A., Barat, P., Mukherjee, P. and Gayathri, N., "Character of the deformation bands in the (A plus B) regime of the Portevin-Le Chatelier effect in Al-2,5%Mg alloy", *Mater. Sci. Eng. A*, 508: 156-160 (2009).
110. Choi, Y., Lee, J., Panicker, S. S., Jin, H. K., Panda, S. K. and Lee, M. G., "Mechanical properties, springback, and formability of W-temper and peak aged 7075 aluminum alloy sheets: experiments and modeling", *International Journal of Mechanical Sciences*, 170 : 1-15 (2020).
111. Liang, S., Chuan, Z. Q. and Tao, C. P., "Influence of solute cloud and precipitates on spatiotemporal characteristics of Portevin-Le Chatelier effect in A2024 aluminum alloys", *Chinese Physics B*, 18 (8): 3500-3508 (2009).
112. Karlsen, W., Ivanchenko, M., Ehrnsten, U., Yagodzinskyy, Y., and Hanninen H., "Microstructural manifestation of dynamic strain ageing in AISI 316 stainless steel", *J. of Nuclear Mater.*, 395: 165-161 (2009).
113. Rodriguez, P., "Serrated plastic flow", *Bulletin of Mater. Sci.*, 6: 653-663 (1984).
114. Beukel, V. D. A., "Theory of the effect of dynamic strain ageing on mechanical properties", *Physica Status Solidi A*, 30: 197-206 (1975).
115. Gündüz, S., "Dynamic strain ageing effects in niobium microalloyed steel", *Ironmaking and Steelmaking*, 29 (5): 341-346 (2002).
116. Hu, Q., Zhang, Q., Cao, P. and Fu, S., "Thermal analyses and simulations of the type A and type B Portevin-Le Chatelier effects in an Al-Mg alloy", *Acta Materialia*, 60: 1647-1657 (2012).
117. Zhang, Q., Jiang, Z., Jiang, H., Chen, Z. and Wu, X., "On the propagation and pulsation of Portevin-Le Chatelier deformation bands: an experimental study with digital speckle pattern metrology", *Inter. J. Plasticity*, 21: 2150-2173 (2005).

118. Tian, N., Wang, G., Zhou, Y., Liu, K., Zhao, G. and Zuo, L., “Study of the Portevin-Le Chatelier (PLC) Characteristics of a 5083 aluminum alloy sheet in two heat treatment states”, *Materials*, 11 (1533): 1-16 (2018).
119. Zhou, P., Song, Y., Hua, L., Lu, J., Zhang, J. and Wang, F., “Mechanical behavior and deformation mechanism of 7075 aluminum alloy under solution induced dynamic strain aging”, *Mater. Sci. Eng. A*, 759: 498-505 (2019).
120. Delaunois, F., Denil, E., Marchal, Y. and Vity, V., “Contribution to the study of Portevin-Le Chatelier effect in aluminum alloy 2024”, *Materials Science and Technol.*, Portland, 1069-1076 (2019).
121. Hartel, M., Illgen, C., Frint, P. and Wagner, M. F. X., “On the PLC effect in a particle reinforced AA2017 alloy”, *Metals*, 8 (88): 1-13 (2018).
122. Kovarik, L. and Mills, M. J., “Ab initio analysis of Guinier-Preston-Bagaryatsky zone nucleation in Al-Cu-Mg alloys”, *Acta Materialia*, 60: 3861-3872 (2012).
123. Ringer, S. P., Hono, K., Polmear, I. J. and Sakurai, T., “Nucleation of precipitates in aged Al-Cu-Mg-(Ag) alloys with high Cu:Mg ratios”, *Acta Mater.*, 44 (5): 1883-1898 (1996).
124. Ringer, S. P., Caraher, S. K. and Polmear, I. J., “Response to comments on cluster hardening in an aged Al-Cu-Mg alloy”, *Scripta Materialia*, 39 (11): 1559-1567 (1998).
125. Styles, M. J., Hutchinson, C. R., Chen, Y., Deschamps, A. and Bastow, T. J., “The coexistence of two S (Al₂CuMg) phases in Al-Cu-Mg alloys”, *Acta Mater.*, 60: 6940-6951 (2012).
126. Birol, Y., “Effect cooling rate on precipitation during homogenization cooling in an excess silicon AlMgSi alloy”, *Mater. Charac.*, 73: 37-42 (2012).
127. Halim, H., Wilkinson, D. S. and Niewczas, M., “The Portevin-Le Chatelier (PLC) effect and shear band formation in an AA5754 alloy”, *Acta Mater.*, 55: 4151-4160 (2007).
128. Yang, H., Tian, S., Gao, T., Nie, J., You, Z., Liu, G., Wang, H. and Liu, X., “High-temperature mechanical properties of 2024 Al matrix nanocomposite reinforced by TiC network architecture”, *Mater. Sci. Eng. A*, 763: 1-11 (2019).
129. Cheng, S., Zhao, Y. H., Zhu, Y. T. and Ma, E., “Optimizing the strength and ductility of the fine structured 2024 Al alloy by nano-precipitation”, *Acta Mater.*, 55: 5822-5832 (2007).
130. Wang, S. C. and Starink, M. J., “Precipitates and intermetallic phases in precipitation hardening Al-Cu-Mg-(Li) based alloys”, *Int. Mater. Rev.*, 50: 193-215 (2005).

131. Gündüz, S. and Kaçar, R., “Strengthening of 6063 aluminium alloy strain ageing”, ***Kovove Mater.***, 46: 345-350 (2008).
132. Erdoğan, M., Güneş İ, ve Erçetin, A., “AA 2024 Alüminyum alaşıımının doğal yaşlandırma yöntemi ile mekaniksel özelliklerin incelenmesi”, ***15th International Materials Symposium (IMSP’2014)***, Denizli, 451-459 (2014).



ÖZGEÇMİŞ

Atacan COŞKUN 1994 yılında Karabük'te doğdu; ilk, orta ve lise öğrenimini tamamladıktan sonra 2013 yılında Karabük Üniversitesi İmalat Mühendisliği lisans programında eğitim almaya hak kazandı. 2017 yılında mezun oldu. Aynı yıl Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İmalat Mühendisliği anabilim dalında eğitim görmeye hak kazandı ve halen devam etmektedir.

ADRES BİLGİLERİ

Adres : Kayabaşı Mah. Barbaros Cad. 46/2

Merkez/KARABÜK

Tel : (534) 063 3176

E-posta : atacancoskun_94@hotmail.com