



**ALÜMİNYUM SAC MALZEMELERDE SICAKLIĞIN GERİ ESNEMEYE
ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI**

Mehmet Yasin DEMİREL

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
İMALAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2018

Mehmet Yasin DEMİREL tarafından hazırlanan “ALÜMİNYUM SAC MALZEMELERDE SICAKLIĞIN GERİ ESNEMEYE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ ile Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Dr. Öğretim Üyesi İbrahim KARAAĞAÇ

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Başkan: Prof. Dr. İhsan KORKUT

İmalat Mühendisliği Anabilim Dalı, Gazi Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Üye: Doç. Dr. Mustafa GÜNAY

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Karabük Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Yüksek Lisans Tezi olduğunu onaylıyorum.

.....

Tez Savunma Tarihi: 03/05/2018

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Yüksek Lisans Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Prof. Dr. Sena YAŞYERLİ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

ETİK BEYAN

Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- Tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- Tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- Tez çalışmada yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi,
- Kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı,
- Bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu,

bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Mehmet Yasin DEMİREL

03/05/2018

ALÜMİNYUM SAC MALZEMELERDE SICAKLIĞIN GERİ ESNEMEYE ETKİSİNİN DENEYSEL ARAŞTIRILMASI

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Yasin DEMİREL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Mayıs 2018

ÖZET

Alüminyum alaşımları sahip oldukları üstün mekanik ve hafif ağırlık özelliklerinden dolayı uzay ve havacılık başta olmak üzere çeşitli sektörlerdeki uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlardan Al2024-T3 ve Al7075-T6 malzemelerinin şekillendirilebilirlikleri oda sıcaklıklarında sınırlıdır. Bu çalışmada, ısıtılabilir malzeme Al2024-T3 ve Al7075-T6 sac malzemelerinin tavlama ve işlem parametrelerine göre V bükme ile şekillendirilebilirlikleri ve geri esneme davranışları deneysel araştırılmıştır. Çalışma kapsamında; tavlama sıcaklığı, tavlama süresi, kalıp açısı ve ütüleme süresi deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Tavlama işlemi öncesi Al2024-T3 malzemesi oda sıcaklığında maksimum 45° açığa kadar V bükülerek şekillendirilebilirken tavlama sıcaklığının 300°C'nin üzerine çıkmasıyla 75° açığa kadar şekillendirilebildiği gözlenmiştir. Al7075-T6 malzemesi tavlama işlemi öncesi oda sıcaklığında maksimum 15° açığa kadar V bükülerek şekillendirilebilirken, tavlama sıcaklığının 200°C'nin üzerine çıkılmasıyla şekillendirilebilirliğin 75°'ye kadar arttığı gözlenmiştir. Tavlama işlemi öncesi çatlama ve kırılma özelliği gösteren her iki malzemenin de şekillendirilebilirliğinin tavlama sıcaklığı ve süresine göre arttığı tespit edilmiştir. Ancak tavlama mekanik özelliklerin azalmasına bağlı olarak V bükme işleminde gözlemlenen geri esneme davranışının ileri esneme davranışına dönüştüğü belirlenmiştir. Ütüleme süresinin artmasına bağlı olarak geri esneme açısının Al2024-T3 için ortalama 0,067°, Al7075-T6 için de ortalama 0,055° azaldığı gözlenmiştir.

Bilim Kodu : 91438

Anahtar Kelimeler : Geri esneme, İleri esneme, Tavlama, Al2024-T3, Al7075-T6

Sayfa Adedi : 105

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KARAAĞAÇ

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF TEMPERATURE EFFECTS ON SPRINGBACK IN ALUMINIUM MATERIALS

(M. Sc. Thesis)

Mehmet Yasin DEMİREL

GAZİ UNIVERSITY

GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES

May 2018

ABSTRACT

The aluminum alloys are commonly used in applications of various sectors, particularly space and aviation due to their superior mechanical and lightweight properties. Al2024-T3 and Al7075-T6 alloys have limited formability at room temperature due to having low formability properties. In this study, the formability and springback phenomenon of Al2024-T3 and Al7075-T6 sheet materials which can be heat treated, were investigated experimentally according to annealing and process parameters. Annealing temperature, annealing time, bending angle and holding time were determined as experimental parameters. Al2024-T3 can be shaped to 75° angle the annealing by exceeding the temperature above 300°C while the material can be shaped up to an angle of 45° at room temperature before the annealing process. The formability of Al7075-T6 is increased to 75° by raising the annealing temperature above 200°C while the material can be bent to a maximum angle of 15° at room temperature by V bending before the annealing process. Formability of both materials having the cracking and fracture properties before annealing is increased by the annealing temperature and time. On the contrary, it was determent that the springback behavior turned into springforward behavior in V bending because of the decrease of mechanical properties. Based on a 10 sec increase in the bending time, it was observed that, the springback angle for Al2024-T3 and Al7075-T6 sheet metals decreased 0,067° and 0,055° on average, respectively.

Science Code : 91438

Key Words : Springback, Springforward, Annealing, Al2024-T3, Al7075-T6

Page Number : 105

Supervisor : Dr. Instructor İbrahim KARAAĞAÇ

TEŞEKKÜR

Bu çalışma süresince değerli bilgilerini benimle paylaşan, kıymetli zamanını ayırıp samimiyetini ve bilgi birikimini esirgemedi her zaman elinden gelenin fazlasını sunan, değerli danışmanım Dr. Öğr. Üyesi İbrahim KARAAĞAÇ'a teşekkürü bir borç biliyor ve şükranlarımı sunuyorum.

Beni bu günlere ulaştıran ve benden hiçbir zaman desteğini esirgemeyen, hayattaki en büyük şanslarım olan anneme, babama, sevgili eşime ve biricik kızıma sonsuz teşekkürler.

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
TEŞEKKÜR.....	vi
İÇİNDEKİLER	vii
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	ix
ŞEKİLLERİN LİSTESİ.....	x
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	3
2.1. Al2024-T3 Malzemede Geri Esneme ve Tavlama Çalışmaları	4
2.2. Al7075-T6 Malzemede Geri Esneme ve Tavlama Çalışmaları.....	7
2.3. Alüminyum Malzemelerde Geri Esneme ve/veya Tavlama Çalışmaları.....	9
3. TEORİK KAVRAMLAR.....	15
3.1. Bükme İşlemi ve Geri Esneme	15
3.2. Alüminyum Malzemelerde Tavlama İşlemleri.....	19
3.2.1. Çökelme sertleşmesi	20
3.2.2. Rekristalizasyon	23
3.2.3. Gerilim giderme	24
3.2.4. Homojenlendirme	25
3.2.5. Sıcak şekillendirme tavlaması.....	25
4. MATERYAL VE METOT.....	27

	Sayfa
4.1. Deney Malzemelerinin Karakterizasyonu	27
4.1.1. Al2024-T3 alüminyumun karakterizasyonu	29
4.1.2. Al7075-T6 alüminyumun karakterizasyonu	35
4.2. Deneysel Çalışma Ortamı ve Deney Parametreleri	40
4.3. Deney Malzemelerinin Tavlanması	43
4.4. Deney Malzemelerinin Mikroyapı İncelemesi	45
4.5. Geri Esnemenin Ölçümü.....	45
5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI.....	49
5.1. Al2024-T3 Malzemesi İçin Deney Sonuçları.....	51
5.2. Al7075-T6 Malzemesi İçin Deney Sonuçları.....	61
6. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	71
KAYNAKLAR	73
EKLER.....	81
ÖZGEÇMİŞ	105

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 2.1. Al7075 alaşımına uygulanmış çok aşamalı ısıt işlemleri.....	8
Çizelge 4.1. Saf alüminyum malzemesine ait genel özellikler	27
Çizelge 4.2. Alüminyum alaşımlarının karakteristikleri ve uygulamaları	28
Çizelge 4.3. Al2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları	30
Çizelge 4.4. Tavlama parametrelerine göre Al2024-T3 için gerilme-gerinim değerleri	35
Çizelge 4.5. Al7075-T6 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları	36
Çizelge 4.6. Tavlama parametrelerine göre Al7075-T6 için gerilme-gerinim değerleri	39
Çizelge 4.7. Deney düzeneği teknik özellikleri	40
Çizelge 4.8. Tavlama prosesi programları ve deney parametreleri.....	43
Çizelge 5.1. Al2024-T3 alüminyum alaşımı Vickers sertlik değerleri	50
Çizelge 5.2. Al7075-T6 alüminyum alaşımı Vickers sertlik değerleri	51

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 2.1. Lazer yardımıyla lokal ısıtma deney düzeneği	5
Şekil 2.2. Kenar bükme deney numuneleri a) Al7075-O numuneler b) Al2024-O numuneler	6
Şekil 2.3. Deney düzeneği ve deney numunesi a) Soğutma kanallı düzenek b) Deney numunesi teknik resmi.....	6
Şekil 2.4. Şok ısıtma işlem prosesi	8
Şekil 2.5. Sıcak şekillendirme deney düzeneği, a) Genel görüntü b) Kalıp ve zımba....	9
Şekil 2.6. Tavlamanın geri esnemeye etkisi.....	10
Şekil 2.7. Sandviç malzemenin geri esneme grafikleri a) Alüminyum, polimer ve Al / PP / Al malzemelerinin geri esneme grafiği b) Farklı zımba radyuslarındaki bükümlerde malzeme kalınlığının geri esneme değerine etkisi	11
Şekil 3.1. V bükme işleminin genel görünüşü	16
Şekil 3.2. Bükme işlemi sonrası a) geri esneme, b) ileri esneme.....	17
Şekil 3.3. Bükme işleminde geri esneme	18
Şekil 3.4. Çökelme sertleşmesinin aşamaları.....	22
Şekil 3.5. Rekristalizasyon aşamaları a) Deformasyon durumu b) Toparlanma c) Parçalı rekristalizasyon d) Tamamlanmış rekristalizasyon e) Tanecik büyümesi f) Anormal tanecik büyümesi	24
Şekil 4.1. Çekme testi için numune ölçüleri	31
Şekil 4.2. Al2024-T3 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası	31
Şekil 4.3. Tavlamanmamış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları	32
Şekil 4.4. 100°C’de tavllanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları	32
Şekil 4.5. 200°C’de tavllanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları	33
Şekil 4.6. 300°C’de tavllanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları	33
Şekil 4.7. 400°C’de tavllanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları	34

Şekil	Sayfa
Şekil 4.8. Deneysel çalışma için hazırlanan deney numuneleri a) Al2024-T3 b) Al7075-T6.....	36
Şekil 4.9. Al7075-T6 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası	36
Şekil 4.10. Tavlanmamış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları	37
Şekil 4.11. 100°C’de tavlanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları	37
Şekil 4.12. 200°C’de tavlanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları	38
Şekil 4.13. 300°C’de tavlanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları	38
Şekil 4.14. 400°C’de tavlanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları	39
Şekil 4.15. Deneysel çalışma ortamı.....	40
Şekil 4.16. Zimba ve kalıp düzeneği.....	41
Şekil 4.17. Kontrol yazılımının ekran görüntüsü.....	42
Şekil 4.18. Deneysel çalışmalarda kullanılan işlem parametreleri	42
Şekil 4.19. Deney numuneleri için tavlama sürecinin şematik gösterimi.....	44
Şekil 4.20. Deney numunesi üzerindeki ölçüm noktaları	46
Şekil 5.1. Tavlama işlemi sonrasında deney numunelerindeki renk değişimi a) Al2024-T3 b) Al7075-T6.....	49
Şekil 5.2. Al2024-T3 alüminyum alaşımı sertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi.....	50
Şekil 5.3. Al7075-T6 alüminyum alaşımı sertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi.....	51
Şekil 5.4. Farklı ütüleme sürelerinde büküm açısı – esneme ilişkisi Al2024-T3, RT	52
Şekil 5.5. Al2024-T3 15° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	53
Şekil 5.6. Al2024-T3 15° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	53
Şekil 5.7. Al2024-T3 15° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	54
Şekil 5.8. Al2024-T3 30° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	54

Şekil	Sayfa
Şekil 5.9. Al2024-T3 30° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	55
Şekil 5.10. Al2024-T3 30° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	55
Şekil 5.11. Al2024-T3 45° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	56
Şekil 5.12. Al2024-T3 45° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	56
Şekil 5.13. Al2024-T3 45° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	57
Şekil 5.14. Al2024-T3 60° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	57
Şekil 5.15. Al2024-T3 60° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	58
Şekil 5.16. Al2024-T3 60° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	58
Şekil 5.17. Al2024-T3 75° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	59
Şekil 5.18. Al2024-T3 75° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	59
Şekil 5.19. Al2024-T3 75° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	60
Şekil 5.20. Al2024-T3 alüminyum alaşımının tavlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler a) RT b) 200°C 60 dk c) 300°C 60 dk d) 400°C 60 dk	61
Şekil 5.21. Farklı ütüleme sürelerinde büküm açısı – esneme ilişkisi Al7075-T6, RT ..	62
Şekil 5.22. Al7075-T6 15° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	62
Şekil 5.23. Al7075-T6 15° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	63
Şekil 5.24. Al7075-T6 15° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	63

Şekil	Sayfa
Şekil 5.25. Al7075-T6 30° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	64
Şekil 5.26. Al7075-T6 30° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	64
Şekil 5.27. Al7075-T6 30° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	65
Şekil 5.28. Al7075-T6 45° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	65
Şekil 5.29. Al7075-T6 45° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	66
Şekil 5.30. Al7075-T6 45° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	66
Şekil 5.31. Al7075-T6 60° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	67
Şekil 5.32. Al7075-T6 60° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	67
Şekil 5.33. Al7075-T6 60° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	68
Şekil 5.34. Al7075-T6 75° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	68
Şekil 5.35. Al7075-T6 75° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	69
Şekil 5.36. Al7075-T6 75° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi	69
Şekil 5.37. Al7075-T6 alüminyum alaşımının tavlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler a) RT b) 200°C 60 dk c) 300°C 60 dk d) 400°C 60 dk	70

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 4.1. Fırın içerisine yerleştirme düzeni	44
Resim 4.2. CMM ile geri esneme ölçümü çalışma ortamı	46
Resim 4.3. CMM ile geri esneme ölçümü	47

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
α	Alüminyum alaşımı malzemede faz ismi
β	Alüminyum alaşımı malzemede faz ismi
b	Sac malzeme genişliği (mm)
σ_m	Çekme mukavemeti (N/mm ²)
ϵ	Birim uzama
F_b	Bükme kuvveti (N)
K	Geri esneme oranı
l	Sac malzeme uzunluğu (mm)
t	Sac kalınlığı (mm)
w	Bükme kanalı genişliği (mm)
$^{\circ}\text{C}$	Santigrat derece

Kısaltmalar	Açıklamalar
ASTM	Amerikan Malzeme ve Test Derneği
CMM	Bilgisayarlı koordinat ölçme cihazı
dk	Dakika
HV	Vickers sertlik değeri
kN	Kilo Newton
MPa	Megapaskal
PID	Oransal-İntegral-Türevsel denetleyici
PP	Polipropilen
R	Zımba uç radyusu
RT	Oda sıcaklığı
SEM	Elektron tarama mikroskobu
SHT	Şok ısıtma işlemi
sn	Saniye
SS	Paslanmaz çelik

1. GİRİŞ

Alüminyum; sahip olduğu düşük özgül ağırlık, yüksek mukavemet ve yüksek korozyon direncinden dolayı gıda endüstrisinden otomotiv ve havacılık endüstrilerine kadar, çok sayıda sektörde farklı ürünlerin imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır.

Havacılık endüstrisinde kullanılan alüminyum alaşımlarının performansını arttırmak için yapılan uzun çalışmalar sonucu çok yüksek mukavemetli 7XXX serisi alaşımlar ve yüksek hasar toleransına sahip 2XXX ile 6XXX serisi alaşımlar geliştirilmiştir. Uçak parçalarının imalatında en çok kullanılan alüminyum alaşımları, yüksek mekanik özellikleri nedeniyle Al2024 ve Al7075 alaşımlarıdır. Ayrıca alüminyum alaşımları uçak ve uzay mekiği bileşenlerinde, füzelerin roket tahrik parçalarında, otomotiv ve denizcilik endüstrisinde sıklıkla kullanılmaktadır [1].

Alüminyum alaşımı malzemelerden imal edilen parçaların üretilmesinde talaşlı imalat, kesme, kaynak gibi yöntemlerin yanı sıra sac metal kalıplarıyla şekillendirme metodu da oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Birçok farklı yöntemi bulunan bükme işlemi, sac metal şekillendirme yöntemlerinin temel operasyonlarından biridir. Basit geometrilili parçalardan, araç şasesi gibi karmaşık geometrilili endüstriyel parçaların üretimine kadar çok sayıda uygulamada bükme işlemi kullanılmaktadır. Bükme işlemi sonrasında iş parçası üzerindeki bükme kuvvetinin kaldırılmasıyla şekillendirilmiş parçalarda ölçü hataları oluşabilmektedir. Bükme işlemi sonunda, bükülen malzemenin elastikiyet özellikleri sebebiyle, parça eski haline dönmek istemektedir. Bu durum şekillendirilen parçalarda parçanın boyutsal kalitesini etkileyen ve ardından gelen işlemlerde de çeşitli hatalara yol açabilen ve bir şekillendirme problemi olan geri esnemeye sebep olmaktadır. Geri esneme hatalarından dolayı boyutsal olarak uygun olmayan parçalar, çeşitli montaj problemlerine, işçilik ve zaman kayıplarına neden olmaktadır.

Parçaların bükülerek şekillendirilmesi sürecinde geri esneme hatalarının işlem esnasında çeşitli yöntemlerle azaltılması veya kalıp tasarımı sürecinde çözümlenmesi kayıpların önlenmesi açısından oldukça önemli bir aşamadır. Deneysel çalışmalar ile oluşturulmuş geri esneme grafikleri dikkate alınarak geri esnemenin daha kalıp tasarımı aşamasında göz önünde bulundurularak telafi edilmesi, bu tür olumsuz sonuçları önemli miktarda

engelleyebilmektedir.

Al2024-T3 ve Al7075-T6 alüminyum alaşımları oda sıcaklığında düşük süneklik değerlerine sahiptirler. Bu özelliklerinden dolayı da oda sıcaklığındaki şekillendirilebilme kabiliyetleri oldukça düşüktür. Bu durum malzemelere genellikle şekillendirilme işlemi öncesi ısıtılma işlemi gerekli kılmaktadır. Bu tür alüminyum alaşımlarının geleneksel ısıtılma işlem süreci, alaşımın tavlama sıcaklığının ardından çözeltiye almak ve daha sonra yapay yaşlandırma işlemi uygulamaktır [2-3].

Bu çalışmanın temel amacı; havacılık ve uzay endüstrileri başta olmak üzere çeşitli sektörlerde sıklıkla kullanılan Al2024-T3 ve Al7075-T6 alüminyum alaşımlarının V bükme ile şekillendirilebilirliğine ve V bükme işlemi sonucunda oluşan geri esneme davranışına tavlama sıcaklıklarının, tavlama sürelerinin ve işlem parametrelerinin etkisini incelemektir.

Tez çalışması kapsamında; 2,5 mm kalınlığında Al2024-T3 ve 3 mm kalınlığında Al7075-T6 alüminyum sac malzemeler kullanılmıştır. 20 mm x 40 mm boyutlarında kesilerek hazırlanan bu deney malzemelerine değişen sıcaklıklarda (100, 200, 300, 400°C) ve değişen tavlama sürelerinde (6, 30, 60 dk) gerilim giderme tavlama uygulanmıştır. Zımba radyusu (R0), şekillendirme hızı (10 mm/sn), ve zımba kuvveti sabit tutularak 15-30-45-60-75° açılı kalıplarda, 0-10-20 sn ütüleme süreleri uygulanarak V bükme işlemi gerçekleştirilmiştir. Bükülerek şekillendirilen deney numunelerinin geri esneme açıları koordinat ölçüm cihazında (CMM) ölçülerek belirlenmiştir. Ayrıca deney numunelerinin tavlama sıcaklıkları ve tavlama sürelerine göre şekillendirilebilirlikleri de değerlendirilmiştir.

2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Sac haline getirilmiş metalik malzemeler çok sayıda endüstri dalının en önemli girdisini oluşturmaktadır. Sac malzemelerin, universal veya bilgisayar kontrollü tezgahlar ile plastik sınırlar içerisinde şekillendirme süreçleri, karmaşık şekilli parçaların üretimine imkan tanımaktadır. Bükme işlemleri, sac metal şekillendirmenin temelini oluşturan işlemlerdendir. Bununla birlikte, bükme süreci sonucu bir problem olarak ortaya çıkan geri esnemenin giderilmesi amacıyla yapılan deneysel çalışmalara literatürde çok sayıda rastlanılmaktadır. Ayrıca, literatürde sonlu elemanlar yöntemiyle geri esneme miktarının belirlenmesine yönelik çalışmaların yapıldığı tespit edilmiştir.

Geri esneme, zımba kuvveti parça üzerinden kaldırıldıktan sonra oluşan elastik gerilmelerin sebep olduğu bir şekillendirme kusurudur. Geri esnemedi kaynaklanan parça geometrisindeki değişimden dolayı montaj gibi sonraki işlemler sırasında problemlerle karşılaşmaktadır. Sac levhaların bükülerek şekillendirilmesi sürecinde karşılaşılan geri esneme probleminin giderilmesine yönelik deneysel çalışmalar literatürde oldukça fazladır. Şekillendirilmiş parçalarda istenmeyen bu geri esneme davranışını önlemek için; bükme açısının, geri esnemeye bağlı olarak artırılması, bükme bölgesinin geri esnemeyecek şekilde ezilmesi, parçanın gerdirilerek bükme işleminin yapılması, malzeme üzerindeki kuvvetin bekleme süresinin artırılması gibi yöntemler, yaygın olarak kullanılanlar arasındadır. Ayrıca; geri esnemeyi etkileyen parametrelerin başında malzemenin kimyasal bileşimi, malzemenin üretim yönteminden gelen metalürjik özellikleri, şekillendirme elemanları ve kalıp tasarımı, sac kalınlığı, büküm yarıçapı ve malzeme sıcaklığı gelmektedir. Geri esnemenin önlenmesinde bu parametreler üzerinden değişikliğe gidilmektedir ve geri esneme miktarı minimize edilebilmektedir. Literatürde bükme sürecini ve geri esneme miktarını analiz etmek için analitik, yarı analitik ve sonlu elemanlar yöntemi gibi farklı yöntemler sıklıkla uygulanmıştır. Bu metodların kullanıldığı çalışmalarda, sürecin simülasyonu ile şekillendirme kusurları önceden gerçeğe yakın tahmin edilebilmektedir. Sonlu eleman yönteminde fiziksel olarak iş parçası ve büküm kalıpları olmadığından, kolaylıkla tasarım ve işlem parametrelerinin değişiklikleri bilgisayar ortamında yapılabilmekte ve sonuçları gözlenebilmektedir [4-8].

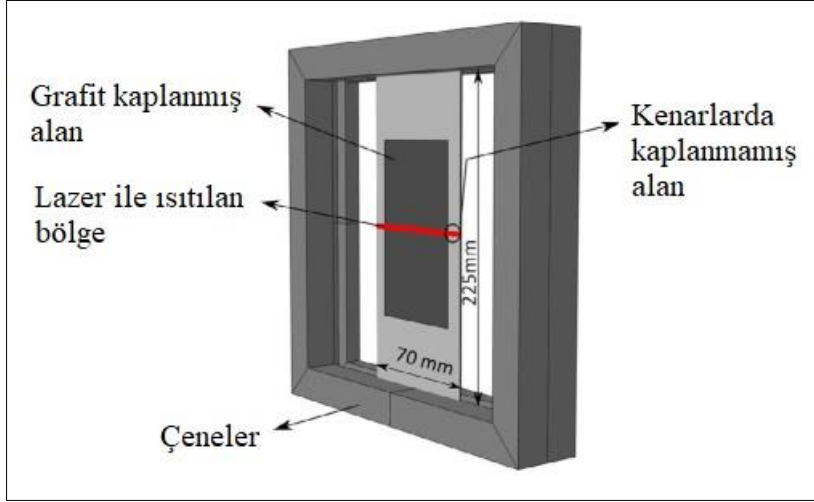
Literatür araştırması Al2024-T3 ve Al7075-T6 malzemelerinde geri esneme çalışmaları ve diğer alüminyum malzemelerde tavlama ile geri esneme çalışmaları olmak üzere üç ana başlıkta incelenmiştir.

2.1. Al2024-T3 Malzemede Geri Esneme ve Tavlama Çalışmaları

Bakır esaslı alüminyum alaşımları arasında ticari olarak yaygın kullanılan Al2024 alüminyum alaşımı yüksek mukavemet gerektiren uygulamalarda, uzay ve havacılık endüstrilerinde kullanılmaktadır.

Tiryakioğlu çalışmasında, havacılık sektöründe kullanılan Al2024 ve otomotiv sektöründe kullanılan Al5754 alüminyum alaşımları ile V bükme deneyleri yapmıştır. Bu deney numunelerinin; 1 mm, 2 mm ve 4 mm üç farklı kalınlıkta, R1, R2 ve R3 üç farklı uç kavisli zımbayla ve 60°, 90° ve 120°'lik üç farklı açıda bükülmesiyle ortaya çıkan geri esneme değerlerini belirlemiş ve geri esneme grafiklerini oluşturmuştur. 60° ve 90°'lik bükümlerde 1 mm ve 2 mm uç kavis değeri Al2024 alüminyum alaşımı numunelerin bükme kenarlarından çatladığını belirlemiştir. Ayrıca, zımba uç kavisinin artmasının geri esnemeyi azalttığı belirtilmiştir [9].

Mohammadi vd. lazer yardımıyla lokal olarak bükme bölgesini ısıtarak, V bükme sürecinde lokal yumuşamanın gerilimi azaltmaya etkisini deneysel incelemişlerdir. Bu çalışma için, oda sıcaklığında düşük süneklik ve yüksek geri esneme özellikleri nedeniyle Al2024-T3 alaşımını deney malzemesi olarak belirlemişlerdir. Deney numuneleri, iki karşılıklı çeneye sıkıca tutturulmuş ve lazer enerjisinin iyi emilmesi için malzeme grafit 33 ile kaplanmıştır. Isı birikimi nedeniyle kenarlara yakın malzemenin lokal olarak erimesini önlemek için, grafit kaplama kenarlardan 5 mm genişliğinde çıkarılmıştır. Şekil 2.1'de yapılan çalışmada kullanılan deney düzeneği verilmiştir.



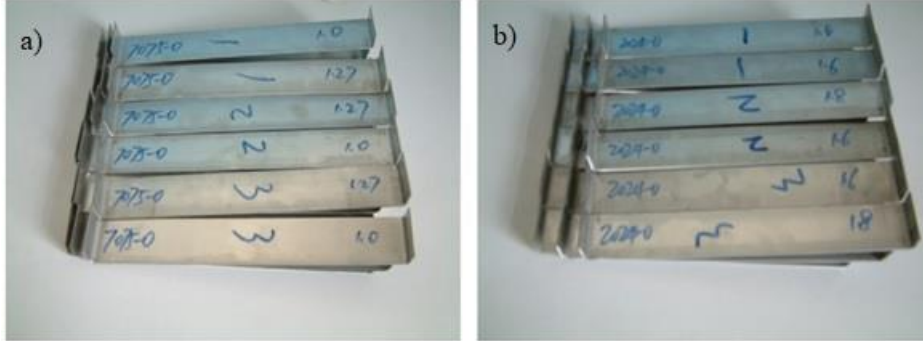
Şekil 2.1. Lazer yardımıyla lokal ısıtma deney düzeneği

Lazer yardımıyla bölgesel yumuşatma sonrasında, Al2024-T3 alüminyum alaşımının şekillendirilebilirlik özellikleri incelenmiş ve ısıtılmadan bükülmüş numuneyle lokal ısıtılan numunelerin sonuçları karşılaştırılmıştır. Lazer yardımıyla ısıtarak yumuşatma için işlem parametreleri sonlu elemanlar modellemesine dayalı olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, maksimum gerilimin gerçekleştiği büküm bölgelerinin lazer yardımıyla lokal olarak ısıtılarak yumuşatıldığında geri esneme değerinin % 43 oranında azaltılabildiğini ortaya koymuştur [10].

Nguyen vd. çalışmalarında, Barlat vd.'nin oluşturmuş olduğu YLD96 fonksiyonunun düzenlenmiş formundaki fonksiyonunu kullanmışlardır. Analiz çalışmasından elde ettikleri geri esneme değerlerini, Al2024-O ve Al7075-O alaşımlarının 45° ve 90° hadde yönündeki gerdirmeli bükme işlemi sonunda elde ettikleri geri esneme değerleri ile karşılaştırmışlardır. Düzenlenmiş fonksiyon kullanılarak bulunan sayısal sonuçların deneysel sonuçlarla çok iyi bir şekilde uyum gösterdiğini ve geri esneme tahmininde kullanılabileceğini belirtmişlerdir [11].

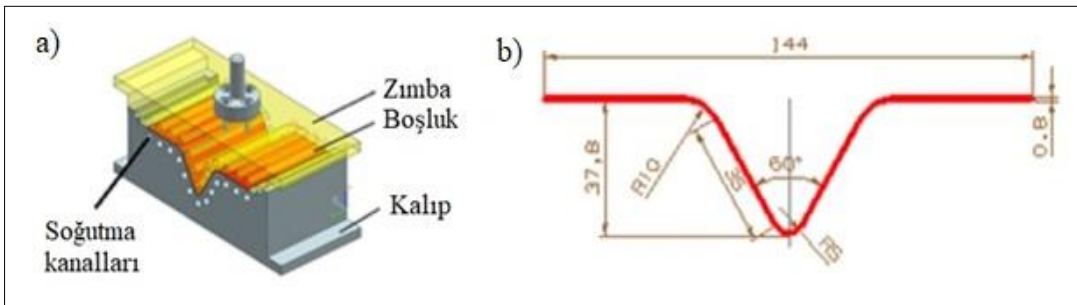
Chen vd. araştırmalarında, havacılık endüstrisinde çok yaygın olarak kullanılan kauçuk şekillendirme ile kenar bükme sürecini ele almışlardır. 1; 1,27; 1,6; 1,8 ve 2 mm olmak üzere beş farklı kalınlık ve 2; 2,5; 3; 3,5; 4,5; 5; 5,5; 6 mm olmak üzere sekiz farklı kalıp yarıçapı ile kauçuk şekillendirmeli kenar bükme deneyinde, Al2024-O ve Al7075-O alaşımlarının geri esneme davranışlarını incelemiştir. Geri esnemenin, bükme oranı ile ($R/t < 2$) ortadan kaldırılabilirdiği gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, kauçuk şekillendirmede şekillendirme

basıncının ve ütüleme süresinin artmasının, geri esnemeye çok az etki ettiği belirtilmiştir [12].



Şekil 2.2. Kenar bükme deney numuneleri a) Al7075-O numuneler b) Al2024-O numuneler

Chen vd. çalışmalarında yenilikçi bir yaklaşım olan ve ısıtma işlemi uygulanabilen, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımlarının şekillendirilebilmesi için senkron soğutmalı sıcak şekillendirme işlemini uygulamışlardır. Bu yöntemde ilk olarak, deney numunesi çözelti sıcaklığına ısıtılmakta ve bir süre bu sıcaklıkta tutulmaktadır. İkinci aşamada, numune pres ile şekillendirilmekte ve kalıpta bulunan soğutma kanalları ile soğutulmaktadır. Bu aşamada, malzemede bir süper doymamış katı çözelti yapısı meydana gelmekte ve kesin bir şekli olan yarı ürün ortaya çıkmaktadır. Çalışmalarının son aşamasında da elde edilen yarı ürün tam mukavemeti elde etmek için yaşlandırılmaktadır. Bu süreç geleneksel şekillendirme yöntemleri ile karşılaştırıldığında, etkin mekanik özelliklere sahip parçaların elde edilebilmesinin yanı sıra ihmal edilebilir bir geri esneme değerleri ve kısa işlem süresi gibi avantajlara sahip olduğu belirtilmiştir. Şekil 2.3'te deney düzeneği ve deney numunesinin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 2.3. Deney düzeneği ve deney numunesi a) Soğutma kanallı düzenek b) Deney numunesi teknik resmi

Ayrıca çalışmalarında, bu yeni yöntemin mikro yapıya ve mekanik özelliklere etkilerini araştırmak için, 0,8 mm kalınlığında Al2024 alüminyum alaşımı deney malzemesi olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalarında, geleneksel şekillendirme yöntemini ve senkron soğutmalı sıcak bükme yöntemini kullanarak karşılaştırmalı deneyler yapmışlardır. Senkron soğutmalı sıcak şekillendirme yönteminin, geri esnemeye sebep olan gerilimleri önemli ölçüde azalttığını ve nihai ürünlerin boyutsal doğruluğunu geliştirdiğini gözlemlemişlerdir [13].

2.2. Al7075-T6 Malzemede Geri Esneme ve Tavlama Çalışmaları

Al7075 alüminyum alaşımı, birincil alaşım elementi olarak çinko içeren bir alüminyum alaşımıdır. Al7075 alaşımı; yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk gerektiren havacılık, otomotiv ve denizcilik endüstrilerinde ve savunma sanayinde silah parçalarının üretiminde sıklıkla kullanılmaktadır.

Gisario vd. araştırmalarında, harici bir lazer yardımıyla bükme bölgesinin bölgesel olarak ısıtılması ile grade 2 ticari saf titanyum ve Al7075-T6 alüminyum levha numunelerin bükme ile şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. 140°'ye kadar yüksek bükme açılarında ve keskin zımba uç yarıçapları için geri esneme değerlerini deneysel araştırmışlardır. Lazer yöntemiyle bükme bölgesinin ısıtılmasının, yüksek açılarda bükme işlemi sırasında her iki tür malzeme için de çatlak riskini azalttığını tespit etmişlerdir. Aynı zamanda, geri esneme miktarının geleneksel bükme yöntemlerine göre titanyumda 10 kat, alüminyum alaşımında ise 30 kat daha fazla sınırlandığı ve bükme bölgesinin görsel görünümünün önemli ölçüde etkilemediği belirlenmiştir [14].

Leacock vd., havacılık endüstrisinde sac metal bileşenlerin şekillendirilmesinde yaygın olarak kullanılmakta olan flexform sürecini incelemişlerdir. Çalışmada, AutoForm'u kullanan uygun bir süreç modelleme yöntemi ile, Al7075-W alüminyum alaşımından üretilen bir uçak bileşenin imalatını kapsayan endüstriyel çalışma birlikte sunulmuştur. İmal edilen numunenin iç yüzeyi incelendiğinde bükülmüş kenar ve iç yüzey arasında kalınlık sıkışması tespit edilmiş, bu durumun geri esnemeyi etkileyebileceği belirlenmiştir. Kalınlık gerilmeleri faktörünün analiz çalışmalarına ilavesiyle sonuçların genel doğruluğunun artığı gözlemlenmiştir. Deneysel çalışma sonuçları, bileşenin bükülmüş kenarının geri esnemelerini öngörürken çapraz basınç gerilmelerinin de analizlere dahil edilmesi

gerektiğini göstermiştir [15].

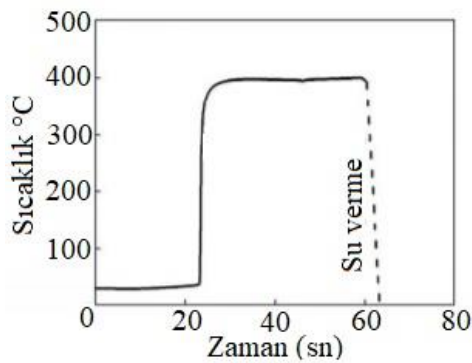
Jeshvaghani vd., 3 mm kalınlığında 400 mm x 100 mm boyutlarındaki Al7075 alüminyum alaşımına mukavemet özelliklerinde azalma olmaksızın geri esneme miktarını ve korozyon duyarlılığını azaltmak için çok aşamalı ısıtma işlemi uygulamışlardır. Uygulanan ısıtma işlem süreci Çizelge 2.1’de verilmiştir.

Çizelge 2.1. Al7075 alaşımına uygulanmış çok aşamalı ısıtma işlemi

Numuneler	Birinci aşama	İkinci aşama	Üçüncü aşama
Örnek A	150°C / 24 saat	—	—
Örnek B	150°C / 24 saat	190°C / 6 saat	—
Örnek C	150°C / 24 saat	190°C / 20 dk	120°C / 24 saat
Örnek D	150°C / 24 saat	190°C / 40 dk	120°C / 24 saat
Örnek E	150°C / 24 saat	190°C / 90 dk	120°C / 24 saat

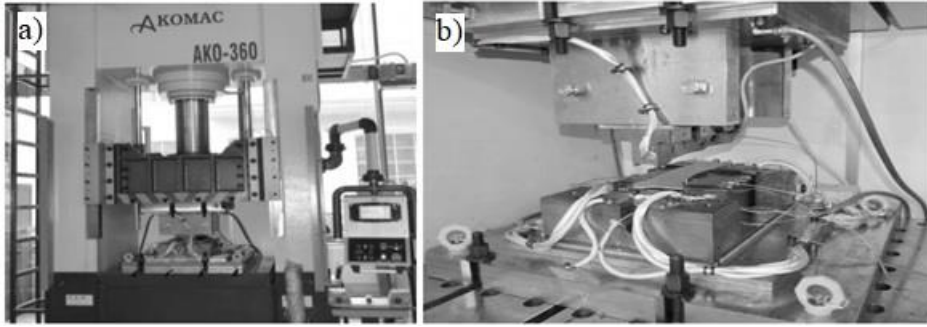
Deneyisel çalışmada, ekseninde 65 mm derinliğe ve 310 mm eğrilik yarıçapına sahip silindirik formda bir bükme kalıbı kullanılmıştır. Deney sonuçları, Al7075 malzemelerde çok adımlı ısıtma işlemi; düşük geri esneme miktarı, yüksek korozyon direnci ve çekme mukavemeti kombinasyonunu sağladığını tespit etmişlerdir [16].

Kumar, çalışmasında 2 mm kalınlığındaki Al7075-T6 alüminyum alaşımını sac malzemeye 200-480°C sıcaklık aralığında bir dizi şok ısıtma işlemi (SHT) uygulamıştır. SHT sürecinde sıcaklık-zaman ilişkisi Şekil 2.4’te verilmiştir. SHT’den sonra numunelerin şekillendirilebilirliği oda sıcaklığında derin çekme testleri ile araştırılmıştır. Çalışmasında şekillenebilirliğin, 300°C’den itibaren iyileşmeye başladığını tespit etmiştir [17].



Şekil 2.4. Şok ısıtma işlem süreci

Polak vd., çalışmalarında 3 mm kalınlığında 500 mm x 500 mm ölçülerinde Al7075-T6 alüminyum alaşımı sac malzemeden yapılmış bir otomotiv parçasının sıcak şekillendirme sürecini analiz etmişlerdir. Şekil 2.5'te sıcak şekillendirme deney düzeneğinin görüntüsü verilmiştir. Kalıp ve zımba 200°C ve 250°C sıcaklıklara rezistans ile ısıtılarak, 5, 15 ve 30 dk bekleme sürelerinde testler yapılmıştır. Çalışmanın sonraki aşamasında parçalar şekillendirildikten sonra kalıptan çıkarılarak oda sıcaklığında soğutulmuştur.



Şekil 2.5. Sıcak şekillendirme deney düzeneği, a) Genel görüntü b) Kalıp ve zımba

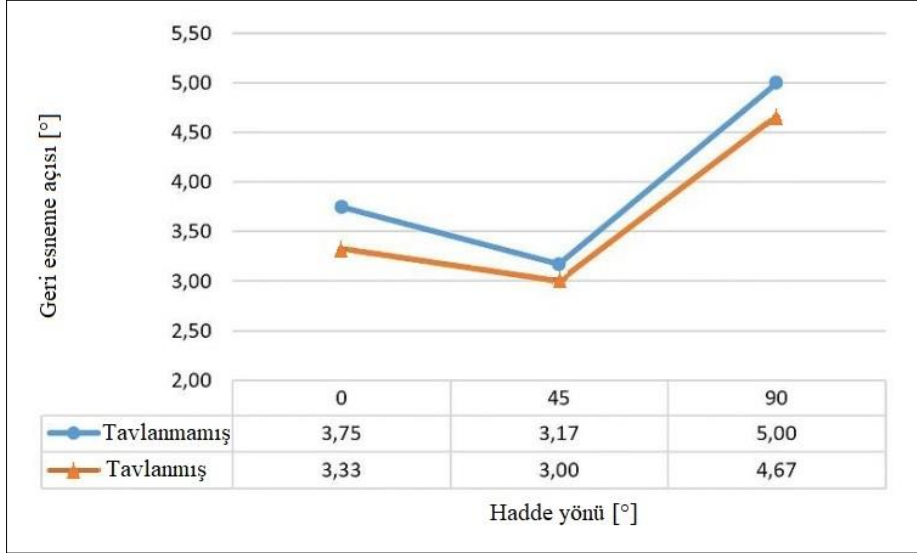
Deney sonuçlarından, parçanın sıcak şekillendirilmesinde (kalıbın ve zımbanın sıcaklığı 240°C' ye eşit iken) herhangi bir çatlak ve kusur olmaksızın istenilen şeklin tam olarak sağlanabildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, yüksek sıcaklıklarda şekillendirilen parçanın mukavemetinin düştüğü de gözlemlenmiştir. Ekonomik açıdan değerlendirildiğinde, harcanan zaman ve enerji tüketiminden ötürü, malzemeye ilave olarak çözündürme veya suni yaşlandırma işlemlerini uygulamanın kârlı olmayacağı belirlenmiştir [18].

2.3. Alüminyum Malzemelerde Geri Esneme ve / veya Tavlama Çalışmaları

Literatürde çok sayıda farklı tür alüminyum malzemelerde farklı deney parametreleri ile geri esnemenin tespiti için yapılan çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Yapılan çalışmalar bu bölümde verilmiştir.

Erdin vd., çalışmalarında 120°C'de 20 dk tavllanmış Al1050-H14 alüminyum alaşımından, 0°, 45° ve 90°'lik hadde yönünde hazırlanmış numuneleri 60°'lik V kalıpta bükerek, zımba kuvvetinin geri esneme davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Sertleşme etkisinin geri esneme değerlerindeki etkisini araştırmak için bükme işlemlerinin sonunda çeşitli ütüleme kuvvetleri (2.25 kN, 5 kN, 10 kN ve 15 kN) uygulamışlardır. Şekil 2.6'da yapılan

çalışmadan elde edilen tavlamanın geri esnemeye etkisi verilmiştir. Test sonuçları; tavlamanın, tüm hadde yönlerinde alüminyum malzemelerin geri esneme değerlerini düşürdüğünü göstermiştir [19].



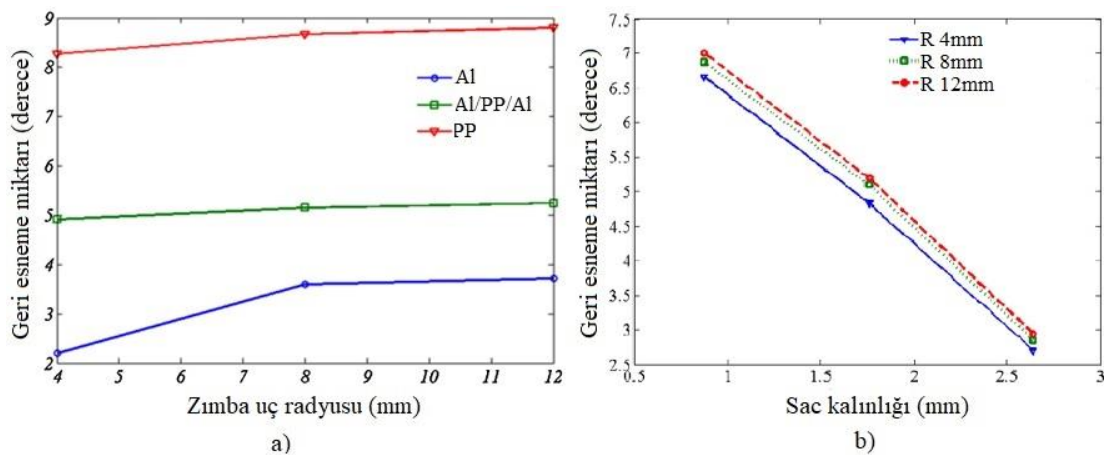
Şekil 2.6. Tavlamanın geri esnemeye etkisi

Farklı tür alüminyum malzemelerde deneysel olarak yapılan çalışmaların yanı sıra, analiz ve modelleme yöntemleri de kullanılarak geri esneme davranışları üzerine çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, deneysel çalışma sonuçları ile karşılaştırılmış ve bu sonuçların kabul edilebilir olduğu belirtilmiştir.

Yılamu vd. 0,51 mm 430SS paslanmaz çelik ile bir diğer yüzü 1,05 mm Al1100 alüminyum ile kaplı iş parçasını 90° kalıpla bükerek kalınlık değişimi ve geri esneme açısı gibi parametreleri incelemişlerdir. Bükme deneyleri, hem Al_{in} / SS_{out} (alüminyum tabaka, bükülmüş numunenin iç kısmında) durumları için ve SS_{in} / Al_{out} (paslanmaz çelik tabaka, bükülmüş numunenin iç kısmında) durumları için gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışma sonuçlarından, malzeme durumunun (Al_{in} / SS_{out} veya SS_{in} / Al_{out}) büküm işlemi üzerinde büyük bir etkisi olduğu gözlemlenmiştir. Büküm ve geri esneme özelliklerini deneysel ve sonlu elemanlar yöntemiyle de araştırmışlardır. Sonlu elemanlar yöntemiyle yapılan

analizler sonucu elde edilen geri esneme değerlerinin, deneysel çalışma sonuçlarına yakın olduğu gözlemlenmiştir [20].

Parsa vd. çalışmalarında, günümüzde otomotiv, havacılık, iklimlendirme, ev ve spor aletleri gibi çeşitli endüstri dallarında sıklıkla kullanılan metal / katı polimer / metal lamine malzemelerin V bükme sürecinde zımba uç radiusunun geri esneme miktarı üzerindeki etkilerini sonlu elemanlar yöntemi ile ve deneysel olarak incelemişlerdir. Al3105 / polipropilen (PP) / Al3105 lamine deney malzemesi sıcak presleme yöntemiyle üretilmiştir. Sandviç tabakasının hazırlanması için 0,5 mm kalınlığında Al3105 alüminyum alaşımı ve 0,76 mm kalınlığında polipropilen kullanılmıştır. Toplam 1,76 mm kalınlığında sandviç malzeme 120 mm x 30 mm ölçülerinde deney numuneleri olarak hazırlanmıştır. Deneysel çalışmada üç farklı uç radiusüne (4, 8 ve 12 mm) sahip zımbalar ile 90°'lik kalıp kullanılmıştır. Yapılan deneysel çalışma sonunda, zımba uç radiusunun artması ile geri esneme değerinin de arttığını gözlemlenmiştir. Polimerik katmanın geri esneme değeri üzerindeki etkisini araştırmak için yapılan sayısal analiz sonucunda, belirli bir kalınlıktaki sandviç levhanın geri esneme değeri, aynı kalınlığa sahip olan polimerik ve metalik tek katmanlı malzemelerin geri esneme değerlerinin arasında yer aldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, sandviç levha kalınlığındaki artışın, geri esneme değerini azalttığı belirtilmiştir. Şekil 2.7'de aynı kalınlıktaki farklı malzemelerin ve malzeme kalınlığının geri esneme değerine etkisi verilmiştir [21].



Şekil 2.7. Sandviç malzemenin geri esneme grafikleri a) Alüminyum, polimer veya Al / PP / Al malzemelerinin geri esneme grafiği b) Farklı zımba radiuslarındaki bükümlerde malzeme kalınlığının geri esneme değerine etkisi

Ötü vd. çalışmalarında, Al5754-O alüminyum alaşım sac malzemesinin deneysel yöntem ve sonlu elemanlar yöntemi ile farklı V bükme yöntemleri kullanılarak şekillendirilebilirliğini incelemişlerdir. Çalışmada zımba uç yarıçapları 2 mm, 4 mm ve 6 mm olan 60°, 90° ve 120°'lik V şeklinde kalıplar tercih edilmiş, hadde yönü 0°, 45° ve 90° olan 1 mm ve 2 mm kalınlığındaki saclar bükülerek elde edilen sonuçlar bilgisayar ortamında değerlendirilerek geri esneme grafikleri hazırlanmıştır. Deneylerden elde edilen veriler incelendiğinde, sac malzeme kalınlığının artmasının ve zımbanın kalıp üzerinde ütüleme süresinin geri esnemeyi azalttığını tespit etmişlerdir. Ayrıca, sac malzemenin hadde yönünün geri esneme davranışında etkili olduğunu, zımba uç yarıçapının artmasıyla geri esnemenin azaldığını, deneysel ve sonlu elemanlar yöntemleriyle gözlemlenmiş ve sonuçların birbiri ile uyumlu olduğunu da tespit etmişlerdir [22].

Geri esnemeyi telafi etmek için uygulanan yöntemlerden bir diğerinin de iş parçasının veya kalıbın çeşitli ısıtma yöntemleri ile ısıtılmasıdır. Ayrıca, bazı çalışmalarda da deney numunelerine ısıtma işlemi uygulanarak geri esnemenin telafi edilmeye çalışıldığı tespit edilmiştir.

Sarikaya çalışmasında; ısıtma işleminin alüminyum malzemelerin geri esneme değerlerine olan etkisini sonlu elemanlar analiz yöntemi kullanarak nümerik ve deneysel çalışma olarak incelemiştir. 1,6 mm, 2 mm ve 2,5 mm kalınlıklarındaki Al2014 ve Al6061 alüminyum alaşımlarını deney numunesi olarak belirlemiş ve bu alaşımlara yaşlandırma ısıtma işlemi uygulayarak numunelerin O, T4 ve T6 temper durumlarını oluşturmuştur. 50 mm x 100 mm boyutlarındaki numuneler ile 60°, 90° ve 120°'lik kalıplarda V bükme işlemi yapmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, ısıtma işlemi sonrasında aynı alaşımın farklı temper durumlarının mekanik özelliklerindeki değişimlerden dolayı, bükme işlemlerinden sonra ölçülen geri esneme miktarlarında farklılıklar olduğu belirtilmiştir. O koşulundan T6 koşuluna kadar akma mukavemeti değerindeki artış nedeniyle, T6 koşulunda daha yüksek geri esneme değerlerinin elde edildiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, malzeme kalınlığının artışıyla, geri esneme miktarının azaldığı belirtilmiştir. Elde edilen sonlu elemanlar analiz değerleri ile deneysel çalışma sonuçlarının yakın olduğu gözlemlenmiştir [23].

Moon vd. çalışmalarında 0,8 mm kalınlığındaki Al1050 alüminyum alaşımının “U” bükülmesinde, sıcaklığın geri esneme miktarına etkisini araştırmışlardır. Deneysel çalışma parametreleri, zımba sıcaklığı (-10°C ve 25°C), kalıp sıcaklığı (25°C, 100°C ve 200°C) ve

bükme hızı (1, 2, 4, 6, 8 ve 10 mm/sn) olarak belirlenmiştir. Deney sonuçları, zımba yükünün numune üzerinden kaldırılması sonrasında meydana gelen elastik geri kazanımın azalmasına sebep olduğu için, zımba ve kalıbın sıcaklığının kontrolünün geri esneme miktarını azaltmada çok etkili bir yol olduğunu ortaya koymuştur. Sıcak kalıp ve soğuk zımba kombinasyonun, oda sıcaklığındaki zımba ve kalıp kombinasyonu ile yapılmış bükme testine kıyasla % 20'ye kadar geri esneme miktarını azalttığı gözlemlenmiştir [24].

Choudhury vd. V bükme işleminde geri esnemeye etki eden değişkenleri en aza indirgeyebilmek için toplam 11 işlem parametresinin geri esnemeye olan etkilerini incelemişlerdir. Bükme açısı (60° ve 90°), sac kalınlığı (2 mm ve 3mm), malzeme tipi (Al1100 ve Al6061), hadde yönü (0° ve 90°), zımba hızı (100 mm/dk ve 500 mm/dk), ütüleme süresi (0 ve 60 sn), sac genişliği (45 mm ve 90 mm), zımba uç yarıçapı (4 mm ve 6 mm), yağlama, sıcak çalışma (25°C ve 265°C) ve tekrar büküm parametrelerini dikkate alarak bu parametrelerin geri esneme miktarına etkilerini deneysel araştırmışlardır. Numune kalınlığının ve zımba uç yarıçapının geri esneme üzerindeki etkilerinin önemsiz olduğunu, ancak radyus/kalınlık (R/t) oranının geri esnemede önemli rol oynadığını gözlemlemişlerdir. Geri esneme miktarını azaltmak için daha yüksek büküm açıları önerilmiştir. Malzeme türünün geri esneme miktarı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Aynı zamanda, malzemenin bükülme sürecinde atomların yeniden düzenlenebilmesi açısından yeterli zamana sahip olabilmesi için işlem esnasında düşük zımba hızları önerilmiştir. Ütüleme süresinin uzun tutulması durumunda ve daha küçük bükme alanı uygulamalarında geri esneme değerinin azaldığı belirlenmiştir. Sıcak bükmenin geri esnemeyi en aza indirmeye yardımcı olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca, tekrar eden bükme işleminin geri esnemeyi azaltmadığını, diğer taraftan geri esnemenin yağlamayla birlikte arttığını tespit etmişlerdir [25].

Öztürk vd. çalışmalarında ılık sıcaklıkların ve ön gerilmenin geri esnemeye olan etkilerini incelemişlerdir. Al5083-H111 alüminyum alaşımı malzeme 200 mm x 35 mm ölçülerinde hadde yönünde kesilerek deney numuneleri olarak hazırlanmıştır. Bu numunelere çekme cihazının çenelerine bağlandıktan sonra % 2, 4, 6, 8 ve 10 gerdirmeye uygulanarak ön gerilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sıcaklıkları da; oda sıcaklığı, 200°C ve 300°C seçilmiştir. Bu sıcaklıkların seçilme sebebi de oda sıcaklığında düşük şekillendirme kabiliyetine sahip olan alüminyum alaşımlarının ılık sıcaklıklarda ($200 - 350^\circ\text{C}$) oldukça iyi şekillendirilebilirliklerinin olması olarak açıklanmıştır. Sac parçalar 60° 'lik V kalıpta

şekillendirilmiştir. Deneysel çalışma sonucunda, oda sıcaklığındaki şekillendirmelerde artan ön gerilme ile birlikte geri esneme değerlerinde artış gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, 200°C sıcaklıkta ise herhangi bir etki görülmemiştir. Çalışmada, 300°C’de ise artan ön gerilme ile birlikte geri esneme değerleri önemli ölçüde azalmış, % 4 ön gerilmeden sonra negatif geri esneme değerleri gözlemlenmiştir [26].

Al2024-T3 ve Al7075-T6 alüminyum alaşımları sert malzemeler olduğu için oda şartlarındaki şekillendirilebilirlikleri çok sınırlı olmaktadır. Bu sebepten dolayı malzemeler ilk başlangıçta O-temper olarak kullanıcı tarafından temin edilmekte ve daha sonra farklı ısıtma işlem yöntemleriyle değişik özellikler sac malzemeye kazandırılmaktadır. Ancak, bu ısıtma işlem süreçleri çok sayıda metalürjik prosesi gerektirmektedir. Literatür araştırmalarında, sıklıkla bu tür alüminyum alaşımlarının suni yaşlandırma işleminin uygulanması sonrası şekillendirildiği ve şekillendirme sonucu geri esneme değerlerinin analiz edildiği belirlenmiştir. Şekillendirme öncesi uygulanan ısıtma işleminin literatürde; lazer, indüksiyon ve kalıp-zımba grubunun ısıtılmasıyla olmak üzere farklı uygulamalarının olduğu belirlenmiştir. Bu tür ısıtma uygulamaları için ilk kurulum maliyetleri yüksek olup ayrıca proses esnasında yüksek enerji tüketimi de gerektirmektedir. Bu çalışmada, endüstriden hazır olarak temin edilen Al7075-T6 ve Al2024-T3 sac malzemelerinin fırınla RT’den 400°C’ye kadar değişken sıcaklıklarda ve sürelerde tavlama sonrası şekillendirilebilirliklerinin ve geri esneme davranışlarının belirlenmesi amaçlanmıştır.

3. TEORİK KAVRAMLAR

Bu bölümde, bükme işlemi ve geri esnemenin davranışının tanımı ile alüminyum malzemelere uygulanan ısıtma işlem çeşitleri açıklanmıştır.

3.1. Bükme İşlemi ve Geri Esneme

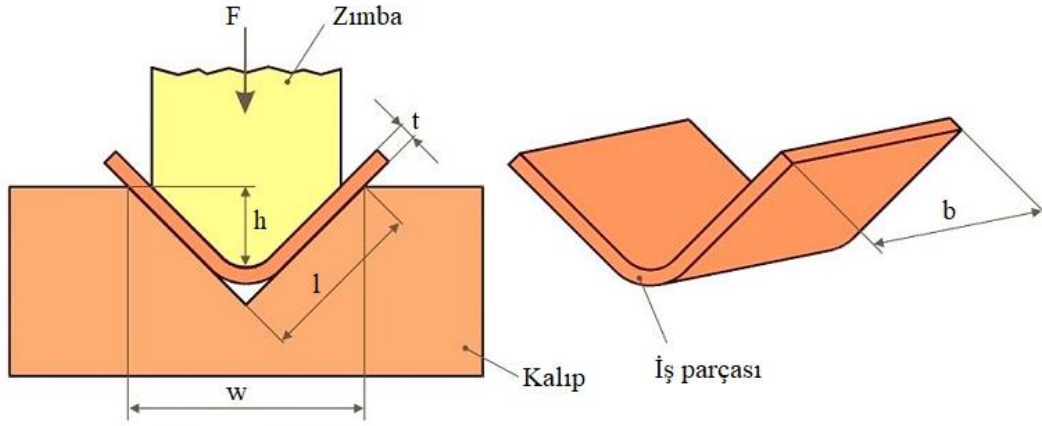
Bükme işlemi, düz bir sacın kalıp üzerine yerleştirilmesi ve zımbanın kalıp içerisine girerken sacın zımba ucu etrafında kıvrılması prosesi olarak açıklanmaktadır. Bükme işlemi ile düzlemler arasında bir açı oluşturulabileceği gibi, belirli çaplarda eğri şeklinde bükme işlemleri de yapılmaktadır [27-28].

Bükme işleminde büküm bölgesindeki malzemenin dış yüzeyinde germe (çekme) ve iç yüzeyinde sıkıştırma (basma) meydana gelmektedir. Belirli bir malzeme kalınlığı için, bükme yarıçapı azaldıkça, dış yüzeydeki birim şekil değişimi artmaktadır. Bükme esnasında dış yüzeydeki uzama, hacim sabitliğinden dolayı kalınlığın azalmasına yol açmaktadır. Bu durum bükme yarıçapı küçüldükçe malzeme kalınlığının daha fazla incelmeye sebep olmaktadır. Dış yüzeydeki uzama miktarı, malzemenin çekme deneyindeki homojen (boyun vermenin olduğu deformasyon oranı) uzama miktarını aşmamalıdır. Aksi halde bölgesel boyun verme neticesinde şekillendirilen malzemede aşırı incelme ve çatlamlar gözlemlenmektedir [29].

Endüstriyel uygulamalarda birçok bükme metodu kullanılmaktadır. V bükme metodu kullanım yerinden dolayı çok sayıda endüstriyel uygulamada yaygın olarak kullanılmaktadır.

V bükme işlemi; çeşitli endüstri dallarında, basit konstrüksiyonu, ucuz kalıp maliyeti ve değişik büküm şekilleri için birden fazla büküm kalıbına sahip olması nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. V bükme işlemi, zımbanın kalıp üzerindeki desteksiz metal levha ile temas etmesi ve zımbanın aşağıya doğru ilerlemesiyle, malzemeyi kalıp boyunca V şeklindeki kalıbın sonuna gelene kadar ilerlemeye zorlaması olarak da tanımlanmaktadır. Bükme işlemi ilerledikçe, bükülen sacın kenarları, kalıbın her iki destek köşesi civarında kalıp kenarlarına teğet hale geldiği bir aşamaya ulaşmaktadır. Bu anda, zımba sac malzemeyi

ezmeye başlamaktadır. Bu aşama, sac malzemeyi zımba-kalıp sisteminin geometrisine uymaya zorlamaktadır [30-31]. V bükme işleminin genel bir görüntüsü Şekil 3.1’de verilmiştir.



Şekil 3.1. V bükme işleminin genel görünüşü

V bükme işleminde, şekillendirme için gerekli olan bükme kuvveti F_b (N), bükme momentini belirlediği için kalıp genişliğine w (mm) bağlı olmaktadır. Bunun aksine, bükme yarıçapının büyüklüğü, ilgili kalıp genişliğinin doğru seçilmesi kaydıyla küçük bir rol oynamaktadır. Genel olarak, kalıbın l (mm) boyu ile sac metal kalınlığı t (mm) arasındaki bağlantı Eş.3.1’de verilmiştir [32].

$$l = 6 \cdot t \quad (3.1)$$

$w/t \geq 10$ koşulu için F_b zımba kuvveti Eş. 3.2 ile hesaplanmaktadır. Bu eşitlikte b_s (mm) sac malzeme genişliğini, σ_m (N/mm²) malzemenin çekme mukavemetini ifade etmektedir.

$$F_b = \frac{b_s \cdot t^2 \cdot \sigma_m}{w} \quad (3.2)$$

$w/t < 10$ koşulunda ise F_b zımba kuvveti Eş. 3.3 ile hesaplanmaktadır.

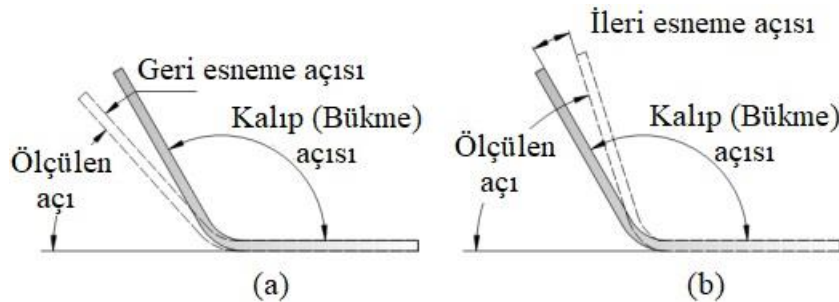
$$F_b = \left(1 + \frac{4 \cdot t}{w}\right) \cdot \frac{b_s \cdot t^2 \cdot \sigma_m}{w} \quad (3.3)$$

Bükme işlemi sonucunda bir problem olarak ortaya çıkan geri esneme davranışı, bükerek şekillendirilmiş parçanın boyutsal olarak doğruluğunu etkileyen ve istenmeyen bir şekillendirme kusurudur.

Bükme işlemlerinde malzemelerin elastikiyet sınırı aşılmakta, ancak maksimum çekme gerilmeleri aşılamamaktadır. Bu sebepten dolayı, malzeme orijinal esnekliğinin bir kısmını hala muhafaza etmektedir. Malzeme üzerinden yük geri alındığı zaman malzeme eski halini almaya çalışmakta ve bükülen malzeme bir miktar esneyerek geriye doğru açılmaktadır. Malzemenin sergilemiş olduğu bu davranış geri esneme olarak tanımlanmaktadır [33].

Değişken çekme gerilimi, bükülen parçanın bir miktar geri esnemesine sebep olmaktadır. En büyük çekme gerilimi değeri, bükülen parçanın dış yüzeyinde meydana gelmektedir ve tarafsız eksene doğru yaklaştıkça azalmaktadır. Tarafsız eksen üzerinde her iki çekme ve basma gerilmeleri sıfırdır. Tarafsız eksen civarındaki elastik bant, geri esneme kuvvetini meydana getirmektedir ve bu kuvvet, bükülen parçanın geri esnemesine sebep olmaktadır [34].

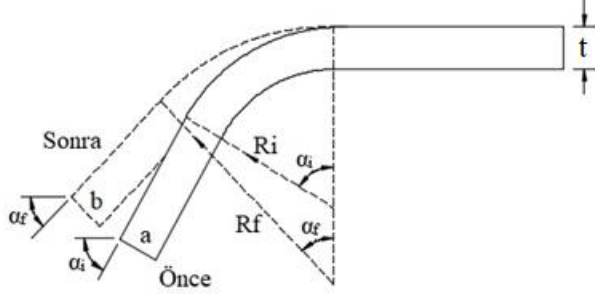
Sac malzemenin istenilen açıdan daha büyük bir açıda elde edilmesi ise, ileri esneme olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir deyişle, şekillendirilmiş malzemede açılmanın aksine kapanma eğiliminin görülmesidir. Şekil 3.2’de geri ve ileri esneme şematik olarak gösterilmiştir [35].



Şekil 3.2. Bükme işlemi sonrası a) geri esneme, b) ileri esneme

Geri esnemenin şematik görünümü Şekil 3.3’te verilmiştir. Ayrıca, geri esneme oranı olarak ifade edilen K faktörünün değeri de Eş. 3.4 ile verilmiştir. Eş. 3.4’ten $K = 1$ olması

durumunda geri esnemenin ($\alpha_i = \alpha_f$) olmadığı ve $K = 0$ durumunda ise eğilmiş malzemenin elastik geri kazanımının gerçekleştiği gözlemlenmektedir ($\alpha_f = 0$) [36].



Şekil 3.3. Bükme işleminde geri esneme

$$K = \frac{\alpha_f}{\alpha_i} \quad (3.4)$$

α_f – Parça üzerine uygulanan yük kalktıktan sonraki bükme açısı

α_i – Kalıp kapalıyken bükme açısı

Geri esnemeye aşağıda belirtilen işlem parametrelerinin karmaşık bir şekilde etki etmektedir. Bu parametreler üç başlık altında sınıflandırılmıştır [37-40];

Malzeme parametreleri

- Malzeme türü
- Sac kalınlığı (t)
- Hadde yönü (Anizotropi)
- Elastisite modülü (E)
- Akma gerilmesi
- Pekleşme özelliği
- Poisson katsayısı (ν)
- Malzemenin plastik bölgedeki yapısal davranışı
- Malzeme sıcaklığı

Proses parametreleri

- Uygulanan kuvvet (F)
- Ütüleme süresi
- Bükme sıcaklığı
- Sürtünme koşulları

Kalıp parametreleri

- Zimba ve kalıbın açıları
- Zimba uç yarıçapı (R)
- Kalıp kavisi
- Kapalı haldeki kalıp boşluğu
- Kalıp açıklığı (w)

Geri esnemenin telafisi ayrıca aşırı eğme ve ilgili yüzeyi ezme veya aşırı yük uygulamak ile de yapılabilmektedir. Aşırı eğme işleminde zimba açısı ve yarıçapı istenen açıdan biraz daha küçük imal edilmektedir. Bu işlem ile beraber geri esnemediği sonra sac istenen boyuta gelmektedir. Aşırı yük uygulayarak yapılan telafi işleminde ise her bir işlemin bitiminde parça sıkıştırılmakta veya preslenmektedir. Böylece sıkıştırılan bölgede kalıcı plastik deformasyonun meydana gelmesi sağlanmaktadır [41].

3.2. Alüminyum Malzemelerde Tavlama İşlemleri

Isıl işlem, metal veya alaşımlara istenilen özellikleri kazandırmak amacıyla uygulanan kontrollü ısıtma ve soğutma işlemleri olarak tanımlanmaktadır. Diğer bir tanıma göre ise ısıtma işlemi; katı haldeki metal veya alaşımlara belirli özellikler kazandırmak amacıyla bir veya daha çok sayıda, yerine göre birbiri peşine zamanlanarak uygulanan ısıtma ve soğutma işlemleri olarak açıklanmaktadır [42].

Isıl işlem deyimi çoğunlukla çelik malzemeler için kullanılıyor olsa da, demir esaslı olmayan bazı metal ve alaşımlara da belli ısıtma işlemleri ile istenilen özellikler kazandırılmaktadır. Ancak, genel olarak çeliklerde kullanılan ısıtma işlem yöntemlerinde gerekli olan ısı, yüksek mukavemetli alüminyum alaşımların yapay yaşlandırılması için kullanılan ısıdan daha yüksek olduğundan, bu alaşımlar için kullanılamamaktadır. Alüminyum malzemelerinin ısıtma

işlemleri, ortam sıcaklığından ergitme sıcaklığına kadar geniş bir bölgede cereyan etmektedir ve bu nedenle, yüksek sıcaklıklarda sıcaklığın çok dikkatli kontrol edilmesi gerekmektedir. Alüminyum ve alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıt işlemler aşağıda verilmiştir [43-45].

- Çökelme sertleşmesi ve yaşlandırma
- Rekristalizasyon
- Gerilme giderme
- Homojenlendirme
- Sıcak biçimlendirme tavlama

Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarında; bazı ısıt işlemle çökelme sertleşmesi elde edilmektedir. Bahsedilen ısıt işlem, alüminyum alaşımlarda istenilen dayanımı elde etmek için uygulanan bir prosestir. Isıl işlem uygulanabilir alüminyum alaşımlarının 2XXX, 6XXX ve 7XXX serileri olmak üzere üç ana grup altında toplanmaktadır. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımları ise çökelmeyle sertleştirilemez, dayanımlarının artırılabilmesi sadece soğuk işlemeyle mümkündür. Isıl işlem uygulanamayan alüminyum alaşımlarının ise 1XXX, 3XXX ve 5XXX serileriyle üç ana grubu bulunmaktadır [46].

3.2.1. Çökelme sertleşmesi

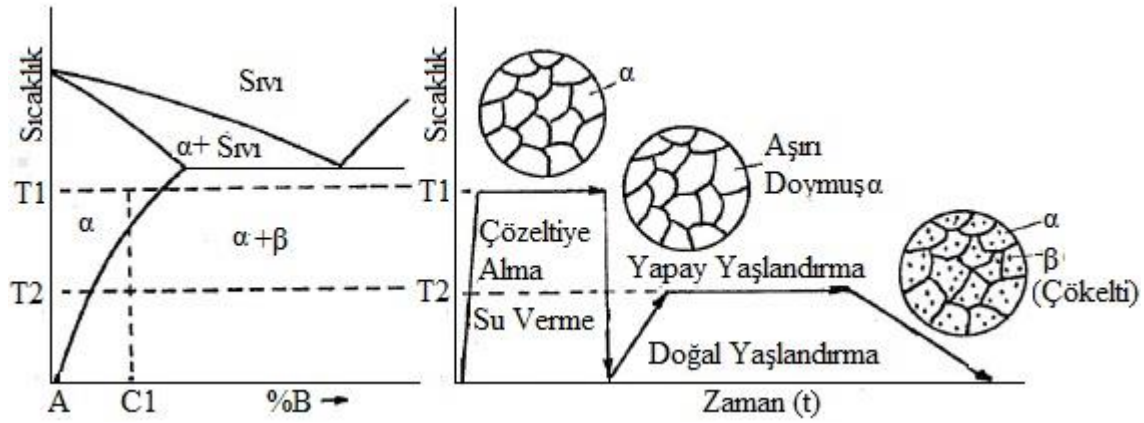
Çökelmeye karşı duyarlı olan alaşımlar, aşırı doymuş katı çözelti oluşturan alaşımlar olarak tanımlanabilmektedirler. Aşırı doymuş katı fazdan zaman ve sıcaklık etkisi ile yeni bir fazın çökmesi sonucunda malzemenin sertlik ve mukavemeti artmaktadır. Katı bir fazdan solvüs çizgisinin geçilmesi sırasında başka bir katı fazın ayrışması kolayca engellenebilmektedir. Böylece kristal kafesi gerilerek malzemenin dayanımı artmaktadır. Bu olay, özellikle bazı demir dışı alaşımlar için büyük önem taşıyan çökelme sertleşmesinin temelini oluşturmaktadır [47].

Çökelme sertleştirme işlemi genel olarak kullanım sıcaklığında, termodinamik denge halinde en az iki fazlı yapıdayken, hızlı soğutmak sureti ile denge yapısı fazlarının oluşumuna fırsat verilmeyecek, tek fazlı metastabil yapıya dönüştürülebilen alaşımlara uygulanabilmektedir. Teknik kullanımda bu işlemin anlam kazanabilmesi için, söz konusu alaşımların metastabil yapısından (aşırı doymuş katı eriyik) çökeltebilecek ikincil fazların

yüksek sertlik ve mukavemette olması gerekmektedir. Teknik kullanımda uygulama alanı bulan böyle çökeltiler, genellikle belirtilen özelliklere sahip intermetalik faz partikülleridir ve Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Zn-Mg-Cu alaşımları belirtilen nitelikte ayrışma fazlarının elde edilmesinde uygunluk göstermektedirler [48].

Alüminyum alaşımları için ısıtma işlemi genellikle, çökelme sertleşmesi gösterebilen işlenmiş veya döküm alaşımların mukavemetini ve sertliğini arttırmak için uygulanan işlemlerle sınırlı olmaktadır. Alüminyum alaşımlarının mukavemetinin artırılması amacıyla yapılan ısıtma işlemleri; çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma olmak üzere üç basamaktan oluşmaktadır [49].

Çözeltiye alma işlemi, alaşımın ötektik sıcaklığının altında tek fazlı bölgede gerçekleşen ısıtma işlemidir. Alaşım, tek fazlı bir yapı (α) elde etmek amacıyla T1 sıcaklığına kadar ısıtılmaktadır. Isıtma hızının yavaş olması durumunda eriyebilen elementin atomlarının difüzyonu fazla olmaktadır. Aynı zamanda, büyük tanelerin oluşmasına neden olmaktadır. Malzeme soğuk şekil değiştirmeye tabi tutulduğunda ise tane büyümesine engellemek için ısıtma hızı yeterli derecede olmalıdır. T1 sıcaklığında malzeme, alaşımdaki bütün fazların tek faz içerisinde çözünerek homojen bir yapı elde edilene kadar bekletilmektedir. Bekletme süresi, malzemenin çıkarıldığı sıcaklığa, tavlama şekline, malzemenin cinsine ve buna benzer faktörlere bağlı olarak değişmektedir. Uzun bir süre bekletme tane büyümesine ve difüzyonun artmasına neden olmaktadır. Bekletme süresi alaşımın cinsine bağlı olarak, ince parçalarda 10 dakika, kalın parçalarda 12 saate kadar çıkabilmektedir. Bekletme süresi bütün eriyebilen atomların katı eriyik içerisinde yayılmasını sağlayacak kadar yeterli olmalıdır. Kısa bekleme süresi yeterli difüzyonu sağlayamadığı gibi fazla bekletme süresi de oksit oluşumuna neden olmaktadır. Genellikle ısıtma malzeme yapısında düzenli dağılım, toparlanma, yeniden kristalleşme ve tane büyümesi sağlamaktadır. Bu işlem, çözündürme veya çözeltiye alma işlemi olarak tanımlanmaktadır. Çökelme sertleşmesi işleminin ikili faz üzerinde temsili gösterimi ve işlem aşamaları Şekil 3.4'te gösterilmiştir [50-52].



Şekil 3.4. Çökelme sertleşmesinin aşamaları

Çözeltiye alma işleminden sonra atomların potansiyel çekirdeklenme yerlerine nüfuz etmesi için yeterli zamanı bulmasını engelleyerek istenmeyen ikinci fazın oluşmasını önlemek ve çözeltiyi aşırı doymuş katı solüsyon haline getirmek için, malzeme fırından çıkarıldıktan sonra çok geçmeden hızla daha düşük bir sıcaklığa soğutulur. Bu sayede yapıda fazlaca ikinci faz içeren aşırı doymuş ve dengeli olmayan α katı solüsyonu oluşturulur. Malzemeyi su vermeden soğumaya terk etmek, katı eriyiklerin tane sınırlarında ve kayma düzlemlerinde çökmesine ve dolayısıyla şekil değiştirme kabiliyetinin azalmasına sebep olmaktadır [53].

Su verme işleminde genellikle su kullanılmaktadır. Ancak suyun yanı sıra, su verme ortamı olarak glikol – su karışımları, suda çözülebilen polimerik yağlar veya madeni yağlar da kullanılmaktadır. Alüminyum alaşımlarının ısı iletkenliğinin yüksek olması sebebiyle, aynı parça ince ve kalın kısımlarda soğuma karakteristikleri farklı olduğu için deformasyonlar görülebilmektedir. Dolayısıyla, bu tür deformasyonları önleyebilmek için, su verme ortamı, bu ortamın sıcaklığı dikkatle seçilmeli gerekli durumlarda ya su verme ortamı karıştırılmalı ya da parça ortam içerisinde hareket ettirilmelidir [54].

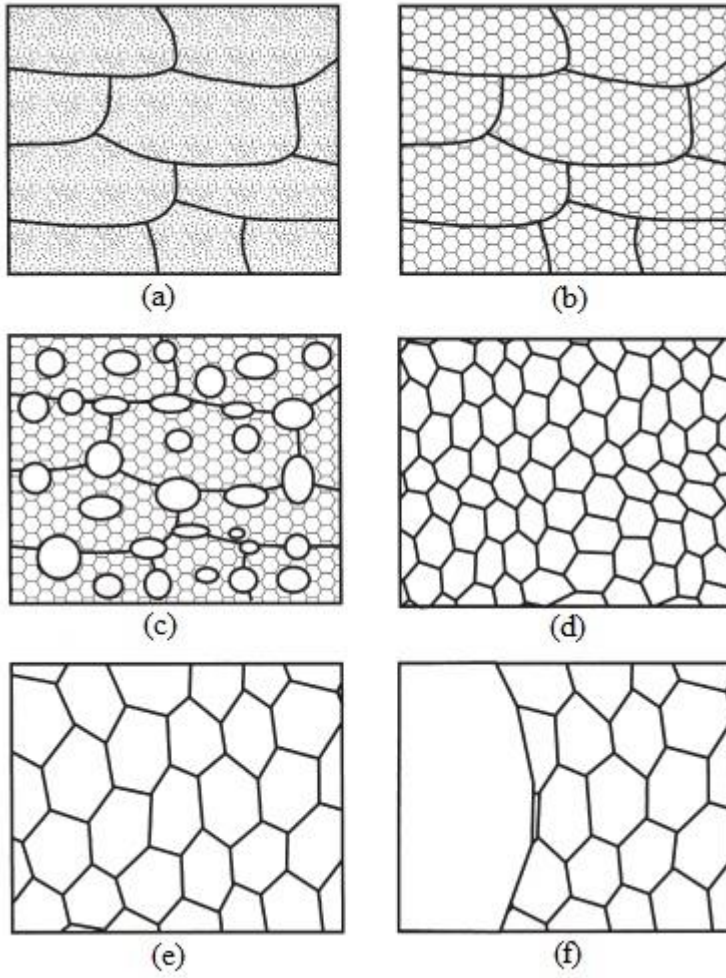
Alaşım hızla soğutulması aşırı doymuş α çözeltisi oluşturmaktadır. Fakat aşırı doymuşluk kararsız bir durumdur. Aşırı doymuş katı çözeltinin kararlı hale gelebilmesi için yaşlanma işlemi uygulanmaktadır. Yaşlanma işlemi oda sıcaklığında veya oda sıcaklığı ile solvüs çizgisi arasındaki bir sıcaklıkta gerçekleştirilmektedir. Bu sıcaklık Şekil 3.4'te T2 sıcaklığı olarak belirtilmiştir. Alaşımın yaşlandırma sıcaklığı olarak isimlendirilen bu sıcaklıkta, gerekli miktar ve türdeki çökelmeyi oluşturması için bir süre bekletilmesi sonucu istenilen mukavemete ulaşılmaktadır. Yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında doğal yaşlanma veya 115-

190°C sıcaklık arasında 5–48 saat süre ile yapay yaşlanma olarak gerçekleştirilmektedir [55-57].

3.2.2. Rekristalizasyon

Rekristalizasyon veya yeniden kristalleşme, plastik şekil değiştirme sonucu kristal ve tane yapısı bozulmuş, iç gerilmeler meydana gelmiş bir metal malzemede, yeni tanelerin oluşmasını ve bu arada gerilmelerin giderilmesini sağlayan dönüşüm sıcaklığının altında, herhangi bir dönüşüm meydana gelmeksizin yapılan ısı işlemi olarak tanımlanmaktadır. Yeniden kristalleşme tavlama sonucunda malzeme, deformasyon öncesi özelliklerini geri kazandığı gibi daha ince taneli bir yapıya sahip olur. Plastik şekil değişimi sonucunda, malzemenin enerji içeriği önemli ölçüde artar ve yapının durumu artan dengesizlik yönünde değişir. Depolanan enerji esas olarak, şekil değişimi sırasında yoğunlukları oldukça yükselmiş olan dislokasyonların elastik gerilim enerjisi olup bu enerji yeniden kristalleşme için itici gücü oluşturmaktadır. Bu durumda, yeterli bir aktivasyon yani sıcaklık artışı sağlanırsa; önce kristal kusurların düzenlenmesi ve kısmen yok olması ile enerjide bir düşme (toparlanma), ve daha sonra enerji bakımından zengin dislokasyonların yoğunluğunun şekil değişimi öncesindeki değerine düşmesi ile yeni tane oluşumu (yeniden kristalleşme) gözlenmektedir. Söz konusu olaylar için atomların küçük yer değiştirmeleri yeterli olabilmektedir [58].

Yeniden kristalleşme tavlama dislokasyonları kaldırmasına rağmen, malzeme hala termodinamik bakımdan dengesiz olan tane sınırları içermektedir. Tavlama süresini veya sıcaklığını artırmak, daha küçük tanelerin elimine edilmesine ve geniş tanelerin büyümesine yol açmaktadır. Bu durum tanecik büyümesi olarak adlandırılır. Bazı durumlarda, bu normal tane büyümesi, birkaç büyük taneciğin büyümesine yol açabilmekte, bu işlem anormal tane büyümesi olarak bilinmektedir. Şekil 3.5'te rekristalizasyon ısı işleminin aşamaları şematik olarak gösterilmektedir [59].



Şekil 3.5. Rekristalizasyon aşamaları a) Deformasyon durumu b) Toparlanma c) Parçalı rekristalizasyon d) Tamamlanmış rekristalizasyon e) Tanecik büyümesi f) Anormal tanecik büyümesi

3.2.3. Gerilim giderme

Gerilim giderme tavı; döküm, kaynak ve soğuk şekil verme işlemlerinden kaynaklanan iç gerilmeleri azaltmak amacıyla, metalik malzemeleri dönüşüm sıcaklıklarının altındaki uygun bir sıcaklığa kadar ısıtma ve sonra yavaş soğutma işlemi olarak tanımlanmaktadır [42].

Bu içsel gerilmeler sertliği bölgesel olarak arttırdığı gibi sürekli işlemeyi giderek daha da güçleştirmektedir ve beklenen değerlerin altında kırılmaya yol açmaktadır. Ayrıca malzemenin daha sonraki ısı işlemler sırasında eğilmesine yol açılabilmektedir, bu yüzden söz konusu gerilmelerin gerilim giderme tavı ile azaltılması veya yok edilmesi gerekmektedir [60].

Soğuk çekilmiş alüminyum alaşımların 200°C sıcaklığa kadar tavllanması sırasında içyapıda bir değişiklik olmamaktadır. Bununla beraber, iç gerilmeler azalacağından, malzeme özelliklerine önemli derecede etki yapabilmektedir. Ancak, alüminyum alaşımları uzun süre bu sıcaklıkta tutulduğunda, malzeme özelliklerinde değişme gözlenmektedir. Soğuk çekilmiş alüminyumun 100, 125, 150 ve 175°C sıcaklıklarda tavlandıktan sonraki çekme mukavemetlerinin değerlerinde azalma görülmektedir. Sıcaklığın yaklaşık olarak 200°C'yi geçmesi halinde ise çekme mukavemeti oldukça düşmektedir [43].

Gerilim giderme tavlamasının başarılı sonuç verebilmesi için soğuma işleminin yavaş yapılması gerekmektedir. Aksi takdirde, soğuma farkı nedeniyle malzeme içinde tekrar iç gerilmeler oluşabilmektedir [61].

3.2.4. Homojenlendirme

Homojenlendirme işlemindeki amaç, dendritik yapıdaki konsantrasyon farklılıklarının giderilmesi, katılaşma sırasında oluşan kararsız fazların çözülmesi ve alaşım ekstrüzyon parametrelerini olumlu yönde etkileyen çökelti partiküllerinin oluşturulmasını sağlamaktır. Karmaşık alaşım sistemlerinde kararsız fazların yanında malzemenin sünekliliğini azaltan çözünmez kararlı fazlar da bulunmaktadır. Homojenleştirme işlemi ile bu fazların yuvarlaklaşması sağlanarak sünekliliğin artırılması sağlanmaktadır [62].

İçyapı, kimyasal kompozisyon, uygulanan mekanik ve ısı işlemler alüminyum ingotların kütsel şekil değiştirme yeteneğini etkileyen önemli parametrelerdir. İçyapı ve tane boyutu üzerinde önemli etkiye sahip olan homojenlendirme; ilk sıvılaşma sıcaklığının altında ve solvüs eğrisinin üzerindeki herhangi bir sıcaklıkta yapılan bir çeşit yüksek sıcaklık ısı işlemi olarak tanımlanmaktadır. Homojenlendirme sıcaklığı ve süresi, ikinci fazın parçalanarak α katı eriyiği içerisinde maksimum eriyiklik gösterdiği sıcaklık olarak seçilmelidir. Ayrıca homojenlendirme sıcaklığı ve süresi katkı elementleri ve işlem koşulları ile değişeceğinden her alaşım için yeniden belirlenmelidir [63].

3.2.5. Sıcak şekillendirme tavlaması

Sac metallerin şekillendirilmesinde; şekillendirme esnasında oluşan yırtılma, kırılma, buruşma, şekillendirildikten sonra ise çarpılma ve geri esneme gibi problemler ile

karşılaşılmaktadır. Bu problemlerin çözülmesinde en etkili fakat zor ve pahalı olan çözüm yöntemi ise sıcak şekillendirmedir. Konvansiyonel yöntemler ile oda sıcaklığında şekillendirilen parçalarda oluşan problemler proses parametrelerinin (yağlama, baskı plakası kuvveti, gerdirme, vs.) değiştirilmesiyle çözülemediği zaman, başvurulması gereken yöntem genellikle sıcak şekillendirme olmaktadır. Sıcak şekillendirme sonucunda, soğuk şekillendirmede oluşan kalıntı gerilmeleri oluşmamakta ve soğuyan parça olması gereken geometrisini koruyabilmektedir. Ayrıca, soğuk şekillendirmede elde edilemeyen karmaşık geometriler sıcak şekillendirme yöntemleri ile elde edilebilmektedir ki bu durum da daha farklı geometrilere sahip parça tasarımlarına imkan sağlamaktadır [64].

Sıcak şekillendirme, metallerin yeniden kristalleşme sıcaklığının üstünde deforme olduğu şekillendirme işlemini ifade etmektedir. Verilen metal için rekristalizasyon sıcaklığı, mutlak ölçekte ölçülen ergime sıcaklığının (T_m) yaklaşık yarısı kadar olmaktadır. Bu sıcak biçimlendirme için sıcaklık (T) aralığı Eş. 3.5 ile verilmiştir [65].

$$0,6T_m \leq T \leq 0,75T_m \quad (3.5)$$

Alüminyum alaşımlarında bu amaçla yapılacak tavlama için 400-500°C sıcaklık aralığı ya da katılaşma eğrisinin 50-80°C altındaki bir sıcaklık uygun olmaktadır. Biçimlendirme sırasında izin verilebilen en düşük sıcaklık 330-400°C sıcaklık aralığındadır [45].

4. MATERYAL VE METOT

Tez çalışması kapsamında deneysel araştırmalar, Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarlarında bulunan elektronik kontrollü tavlama fırını ve bilgisayar kontrollü deney düzeneği kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçlarından geri esneme açısının ölçülmesinde CMM tezgahı kullanılmıştır.

4.1. Deney Malzemelerinin Karakterizasyonu

Alüminyum doğada çok bulunan, işlenebilirliği kolay, hafif, korozyon direnci ve takviye edilebilirlik gibi önemli özellikleri olan bir malzemedir. Alüminyum alaşımları ise hafif, birçok üretim yöntemi ile ekonomik olarak üretilebilirliğinin yanı sıra, yüksek dayanım ve korozyon direncine sahip olduğu için tercih edilmektedir. Çizelge 4.1’de saf alüminyum malzemesine ait genel özellikler verilmiştir [66].

Çizelge 4.1. Saf alüminyum malzemesine ait genel özellikler

	Yoğunluk g/cm ³	Young modülü GPa	Max. çekme gerilmesi, MPa	Akma gerilmesi, MPa	Isıl iletkenlik, W/m°C	Isıl genleşme katsayısı (x10 ⁻⁶ °C ⁻¹) (25-100°C)
Saf Alüminyum	2,7	68,9	290	30	221	23,6

Alüminyum alaşımlarının tanımlanmasında dört basamaklı bir sayı kullanılmaktadır. İlk basamak temel alaşım elementlerini belirtmektedir. Çizelge 4.2’de alüminyum alaşımlarının serilerine göre özellikleri ve mevcut uygulamaları verilmiştir [67].

Alaşımlı alüminyum saclar alaşımın metalürjik durumuna göre isimlendirilmektedirler. 3XXX, 4XXX ve 5XXX serileri şekil değişimi ile sertleşebilirken, 2XXX, 4XXX, 6XXX, 7XXX serileri ısıtılma işlemi ile sertlik kazanabilmektedirler. Her bir seri mukavemet ve şekillendirilebilirlik açısından farklı avantaj ve dezavantajlara sahiptir [68].

Çizelge 4.2. Alüminyum alaşımlarının karakteristikleri ve uygulamaları

	Alaşım elementleri	Ana karakteristikleri	Endüstriyel uygulama örnekleri
1000	Saf alüminyum min. %99.0	Pekleşebilme Yüksek şekillendirilebilirlik, korozyon direnci ve elektrik iletkenliği Maksimum çekme dayanımı 70 - 185 Mpa Kaynak ve lehimleme ile kolaylıkla bir araya gelme	• Kimyasal boru hatları (1060) • Besin maddeleri için alüminyum folyo (1175) • Elektrik kablosu (1350) • Uzay aynası
2000	Bakır	Isıl işlemden geçirilebilir, çökelmeyle sertleştirilebilir Oda ve yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet Maksimum çekme dayanımı 190 - 430 MPa Genellikle mekanik olarak birleştirilir, ancak bazı alaşımlar kaynaklanabilir	• Dış gövde panelleri (2008) • Araç kaputu, güverte kapakları (2036) • Uçak kanat iskeleti (2024) • Uçak motoru parçaları (2618)
3000	Mangan	Yüksek şekillendirilebilirlik ve korozyon direnci ile orta mukavemetli Maksimum çekme dayanımı 110 - 285 MPa Tüm ticari prosesler için kolaylıkla birleştirilebilir	• Klima boruları ve ısı eşanjörü (3003) • Konserve kutuları (3004) • Bina kaplamaları (3005-3105)
4000	Silikon	Isıl işlem uygulanabilir Orta mukavemetli Maksimum çekme dayanımı 175 - 380 MPa Özellikle lehimleme ile kolaylıkla birleşir	• Uçak pistonları • Kaynak dolgu alaşımı (4043)
5000	Magnezyum	Pekleşebilme Orta mukavemet ve mükemmel korozyon direnci Tokluk ve kaynaklanabilirlik Maksimum çekme dayanımı 125 - 350 MPa	• Otomobil iç panelleri (5083) • Otomobil gövde ve çerçeve (5182-5754) • Kamyon römork gövdeleri (5456) • Açık deniz santral tankları (5083)
6000	Magnezyum - Silikon	Isıl işlem uygulanabilir Orta direnç, yüksek korozyon direnci ve mükemmel ekstrüzyon edilebilirlik Maksimum çekme dayanımı 125 - 400 MPa Gazaltı ark kaynağı (GMAW-GTAW) ile birleştirilebilir	• Araç dış gövdesi (6111) • Otomobil kapı kirişleri (6061- 6063) • Kamyon kirişleri (6070)
7000	Çinko	Isıl işlem uygulanabilir Çok yüksek mukavemet ve yüksek tokluk Maksimum çekme dayanımı 220 - 610 Mpa Mekanik olarak birleştirilebilir	• Uçak kanat iskeleti (7050) • Otomobil tamponları (7029- 7129) • Uçak kanadı ve gövde kaplaması (7050-7475)
8000	Lityum ve diğer elementler	Isıl işlem uygulanabilir Yüksek mukavemet, iletkenlik ve sertlik Maksimum çekme dayanımı 120 – 240 MPa	• Uzay endüstrisi

Metallerin sahip oldukları mikro yapı ve mekanik özellikleri farklı ısıl işlemlerin uygulanması ile değiştirilebilmektedir. Alüminyum alaşımlarının sertlik ve dayanımları ise

yaşlandırma işlemi ile artırılabilir. Yaşlandırma işlemi, alüminyum malzemelerin sınıflandırılmasında T harfini takip eden 1-10 arası bir rakam ile temsil edilmektedir [69-70].

T 1: Yüksek sıcaklıktaki şekillendirmeden sonra soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış.

T 2: Yüksek sıcaklıkta şekillendirildikten sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.

T 3: Çözündürülmüş, soğuk şekillendirilmiş ve doğal yaşlandırılmış.

T 4: Çözündürülmüş ve doğal yaşlandırılmış.

T 5: Yüksek sıcaklık şekillendirmesinden (döküm, ekstrüzyon) sonra soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış.

T 6: Çözündürülmüş ve yapay yaşlandırılmış.

T 7: Çözündürülmüş ve aşırı yaşlandırma ile dengelenmiş.

T 8: Çözündürülmüş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.

T 9: Çözündürülmüş, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekillendirilmiş.

T 10: Yüksek sıcaklıkta şekil vermeden sonra soğutulmuş, soğuk şekillendirilmiş ve yapay yaşlandırılmış.

4.1.1. Al2024-T3 alüminyumun karakterizasyonu

Al2024 alüminyum alaşımı, birincil alaşım elementi olarak bakır içeren bir alüminyum alaşımdır. Bakır esaslı alüminyum alaşımları, kolay şekil verilebilme ve yüksek mukavemet özelliklerinden dolayı endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Duralümin olarak da bilinen Al2024 alüminyum alaşımı, alüminyum alaşımları arasında en sert, elastisite modülü ve mukavemet değerleri en yüksek olanlarından birisidir. Spesifik mukavemet (akma gerilmesi/yoğunluk) ve spesifik elastisite modülünün (elastisite modülü/yoğunluk) önemli olduğu yerlerde, otomotiv sanayinde, vagon yapımında, mühimmat sanayinde, uçak gövde ve kanatlarında, ortopedik taban, perçin ve çekici tekerlekleri yapımında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımların mekanik

özelliklerinin iyileştirilmesine yönelik işlemler arasında çökelme (yaşlanma) sertleştirilmesi önemli bir yer tutmaktadır [46, 71].

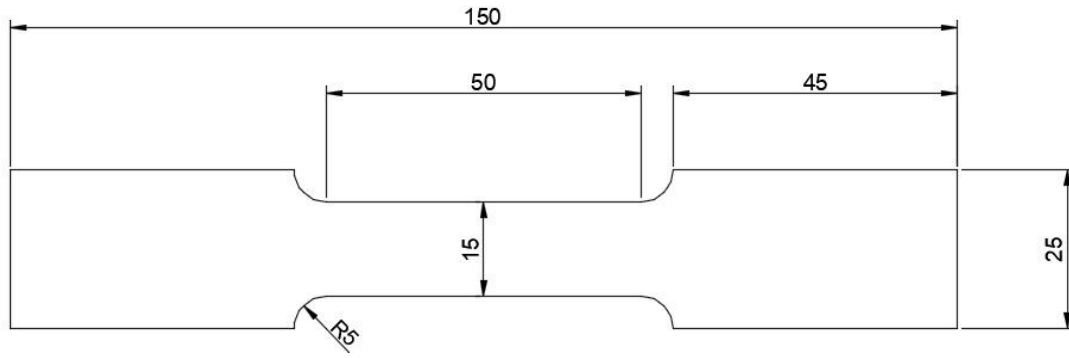
Alüminyum – bakır – magnezyum alaşımları, ilk olarak çökelme sertleştirilmesi yapılabilen alaşımlardandır. Çökelme sertleştirilmesi yapılan ilk alaşım Al2017 alaşımıdır. Bu alaşımların yapı içerisinde özellikle % 4 Cu, % 0,6 Mg ve % 0,7 Mn bulunmaktadır. Yapı içerisinde ağırlıkça bulunan % 4,4 Cu, % 0,5 Mg, % 0,8 Mn ve % 0,8 Si içeren Al2014 alaşımı yapay yaşlandırmaya Al2017 alaşımından daha fazla tepki vermesi için daha sonra geliştirilmiştir. Günümüzde Al2024 alaşımı en çok kullanılan Al-Cu-Mg alaşımlarından birisidir. Bu alaşımda yüksek dayanım, Mg içeriğini % 0,5’ten % 1,5’e çıkarmakla elde edilmiştir. Magnezyumun, alüminyum - bakır alaşımlarına ilavesi alüminyum bakır alaşımlarında çökelti sertleşmesini oldukça hızlandırmakta ve yoğunlaştırmaktadır [72].

Deneyisel çalışmalarda farklı endüstrilerde yaygın olarak kullanılan Al2024-T3 alaşımı kullanılmıştır. Deney numuneleri 2,5 mm kalınlığında ve 20 mm x 40 mm ölçülerinde giyotin makasta mikroskop ile bakılarak tespit edilen 0° hadde yönünde kesilerek hazırlanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan Al2024-T3 alüminyum alaşımının TÜBİTAK-SAGE bünyesinde yapılan kimyasal analiz test sonuçları Çizelge 4.3’te verilmiştir.

Çizelge 4.3. Al2024-T3 alüminyum alaşımının kimyasal analiz sonuçları

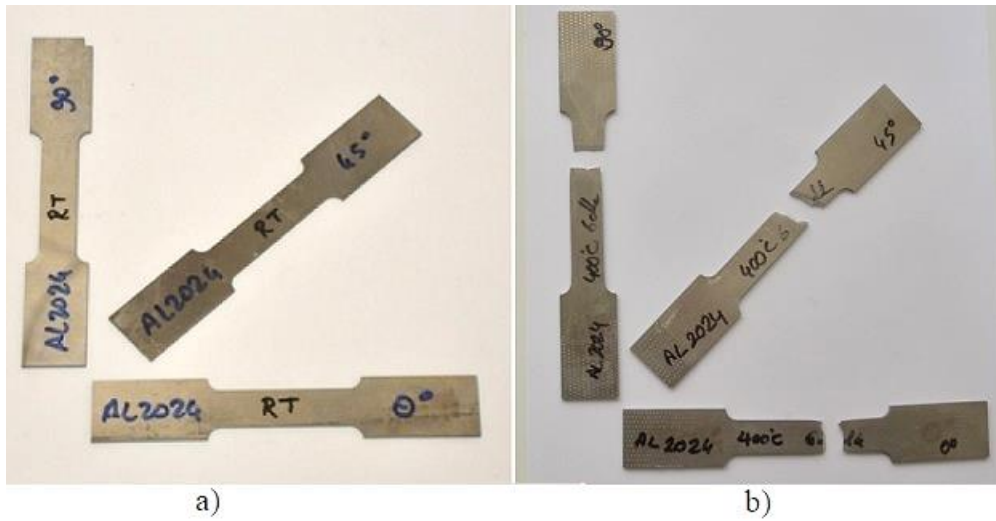
Malzeme	% Al	% Cu	% Mn	% Zn	% Fe	% Ni	% Zr	% Pb
Al2024-T3	94,810	4,376	0,427	0,140	0,101	0,009	0,006	0,002

Çekme testi numuneleri sac malzemenin hadde yönü ile 0°, 45° ve 90° oluşturacak şekilde tel erozyon tezgahında ASTM-E8M standardına uygun olarak kesilerek hazırlanmıştır. Çekme testi için hazırlanan 2,5 mm kalınlığında çekme numunesinin şematik gösterimi Şekil 4.1’de verilmiştir.



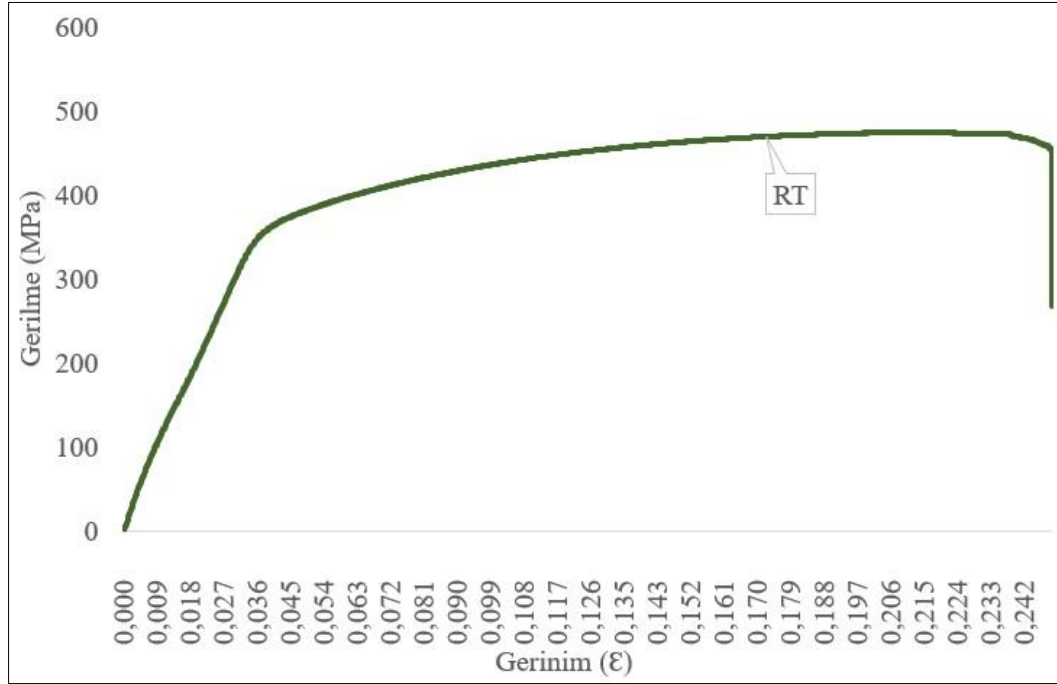
Şekil 4.1. Çekme testi için numune ölçüleri

Kesilerek hazırlanan çekme numuneleri, bükülerek şekillendirilecek numuneler ile birlikte deney parametrelerine göre değişen sıcaklık ve sürelerde (100, 200, 300, 400 °C ve 6, 30, 60 dk) tavllanmışlardır. Çekme testi öncesi ve test sonrası görüntüler Şekil 4.2’de verilmiştir.

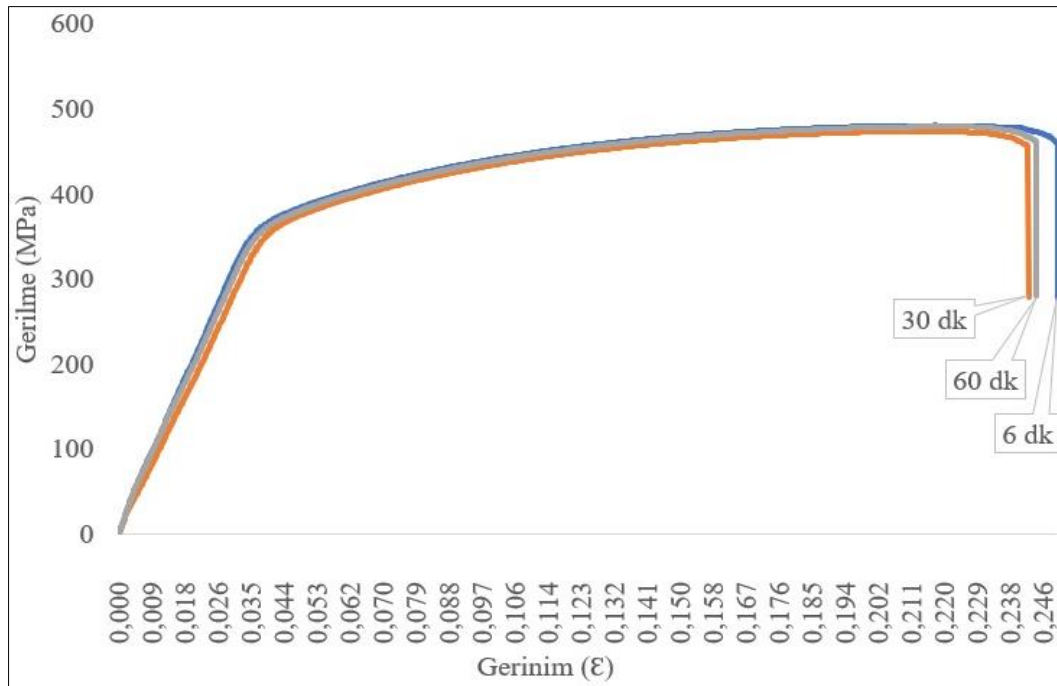


Şekil 4.2. Al2024-T3 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası

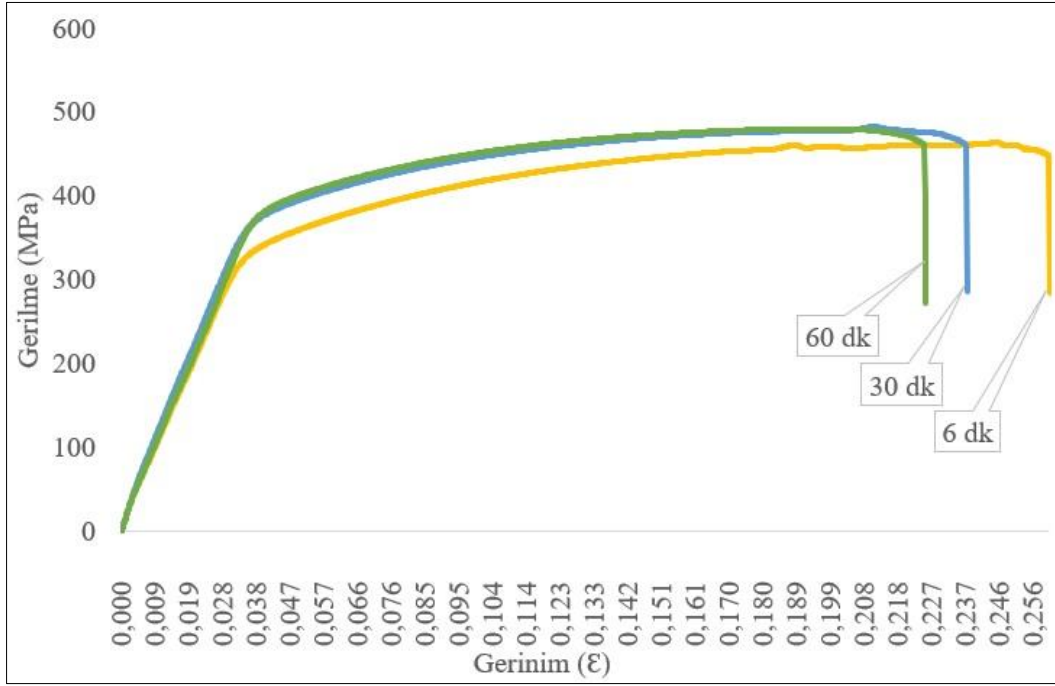
Tavlama sıcaklıklarına göre çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.3-4.7’de verilmiştir.



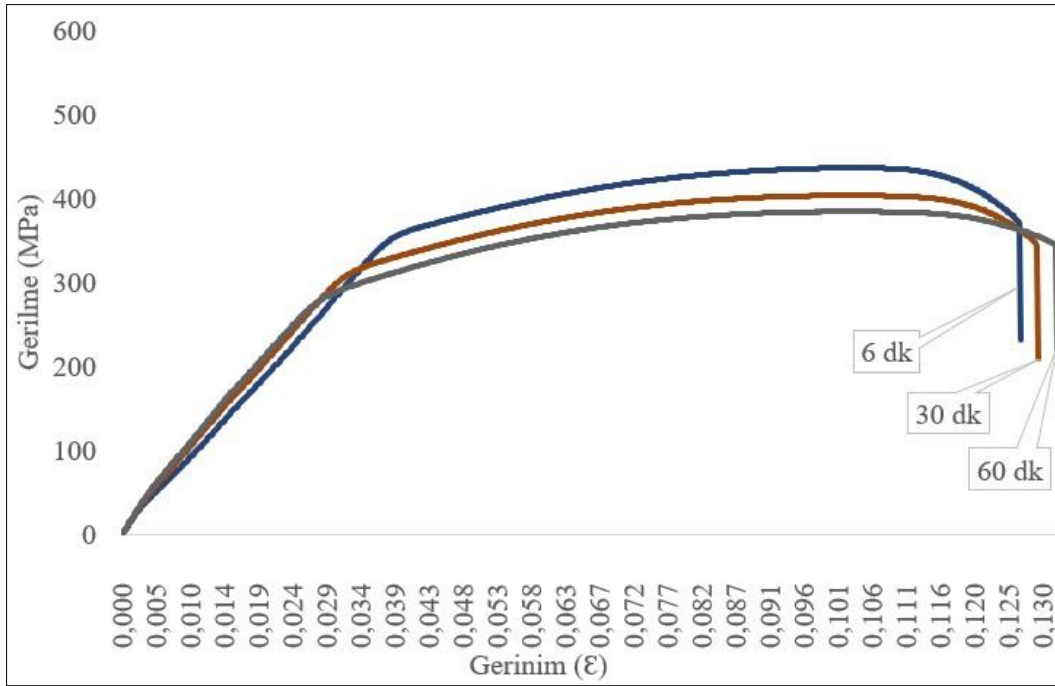
Şekil 4.3. Tavlanmamış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları



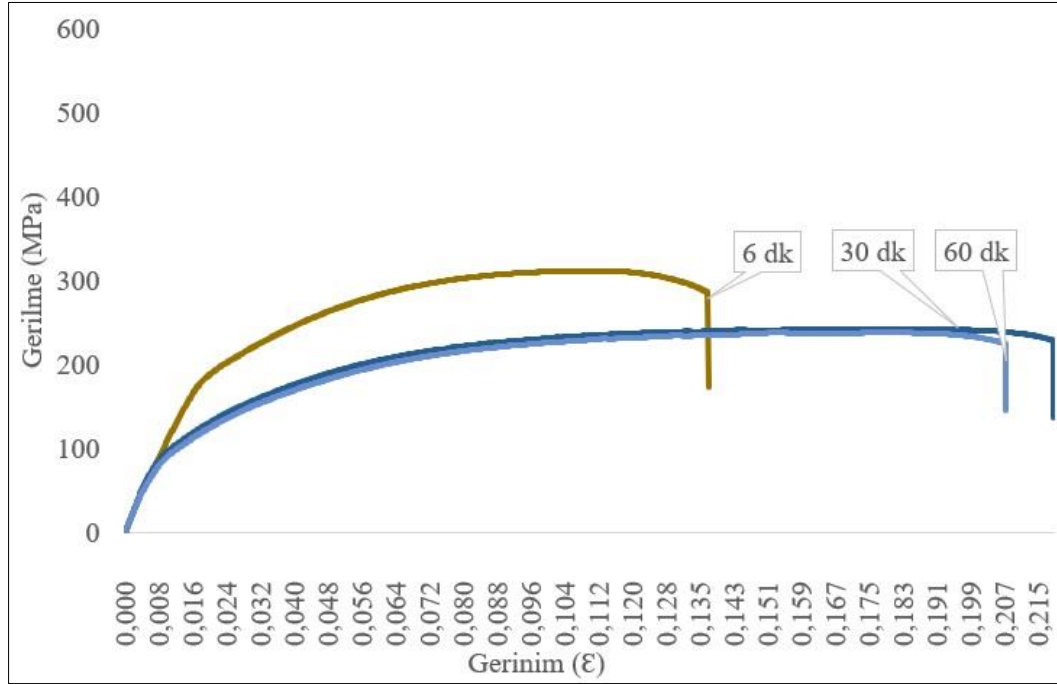
Şekil 4.4. 100°C’de tavlanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları



Şekil 4.5. 200°C’de tavllanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları



Şekil 4.6. 300°C’de tavllanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları



Şekil 4.7. 400°C’de tavllanmış Al2024-T3 alaşımının çekme testi sonuçları

Deneysel çalışma kapsamında yapılan çekme testlerinde Al2024-T3 malzemesinin belirli bir akma dayanımı elde edemediği gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında bu malzemenin akma dayanımı, elastik bölgedeki eğimin % 0,2 oranında ötelenmesi ile elde edilen çizginin deformasyon eğrisini kestiği yer akma dayanımı olarak belirlenmiştir. Elde edilen değerler sıcaklık ve tavlama parametrelerine göre Al2024-T3 için Çizelge 4.4’te verilmiştir.

Çizelge 4.4. Tavlama parametrelerine göre Al2024-T3 için gerilme-gerinim değerleri

Malzeme Al2024-T3	Akma gerilmesi (MPa)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Maksimum çekmedeki çekme gerinimi (%)	Kopmadaki çekme gerinimi (%)
RT	350,112	474,497	0,212	0,250
100°C - 6 dk	363,259	480,392	0,212	0,250
100°C - 30 dk	355,548	473,828	0,214	0,242
100°C - 60 dk	361,687	479,419	0,222	0,244
200°C - 6 dk	348,695	463,418	0,244	0,260
200°C - 30 dk	382,157	482,950	0,210	0,237
200°C - 60 dk	381,225	480,102	0,194	0,225
300°C - 6 dk	348,395	436,760	0,103	0,126
300°C - 30 dk	309,856	403,878	0,102	0,129
300°C - 60 dk	291,348	384,724	0,103	0,131
400°C - 6 dk	198,621	311,857	0,110	0,137
400°C - 30 dk	130,115	241,611	0,173	0,218
400°C - 60 dk	100,586	237,437	0,168	0,207

4.1.2. Al7075-T6 alüminyumun karakterizasyonu

Birincil alaşım elementi çinko olan Al7075 alüminyum alaşımı, yapısal uygulamalardan uzay ve havacılık endüstrilerine kadar yüksek mukavemet gerektiren birçok endüstriyel uygulamada sıkça kullanılmaktadır.

Alüminyum alaşımlarından 7XXX serisi; genellikle düşük yoğunluk, yüksek dayanım, süneklik, tokluk ve yorulmaya karşı oldukça dirençlidir. 7XXX serisi alüminyum alaşımları % 4-8 Zn ve % 1-3 Mg içerdiğinden dolayı diğer alüminyum alaşımlarına oranla daha yüksek sertlik ve dayanıma sahiptirler. Bu serinin en önemli alaşım elementi çinkodur. Bu elementlerden çinko ve magnezyum alüminyum içerisinde yüksek oranda çözünebildiğinden çökelti mukavemetinin artırılması sağlanmaktadır. Bu alaşımlara ek olarak ilave edilen bakır ise dayanım değerlerinin bir miktar daha artırılmasını sağlamaktadır. 7XXX serisi, alüminyum – çinko – magnezyum alaşımları (Al7005) alüminyum – çinko – magnezyum – bakır alaşımları (Al7075 ve Al7178) olmak üzere iki alt gruba ayrılmaktadır. Minimum çekme dayanımı 580 MPa olan Al7178 alaşımı, uçak yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır [69, 72-73].

Deneyisel çalışmalarda uzay ve havacılık endüstrilerinde kullanılan Al7075-T6 alaşımı ısıtıl işlem yapılabilir olduğundan dolayı kullanılmıştır. Deney numuneleri 3 mm kalınlığında ve 20 mm x 40 mm ölçülerinde giyotin makasta mikroskop ile bakılarak tespit edilen 0° hadde yönünde kesilerek hazırlanmıştır. Kesilerek hazırlanan deney numuneleri Şekil 4.8’ de verilmiştir.



Şekil 4.8. Deneyisel çalışma için hazırlanan deney numuneleri a) Al2024-T3 b) Al7075-T6

Çalışma kapsamında kullanılan Al7075-T6 alüminyum alaşımının TÜBİTAK-SAGE bünyesinde yapılan kimyasal analiz test sonuçları Çizelge 4.5’te verilmiştir.

Çizelge 4.5. Al7075-T6 alüminyum alaşıımının kimyasal analiz sonuçları

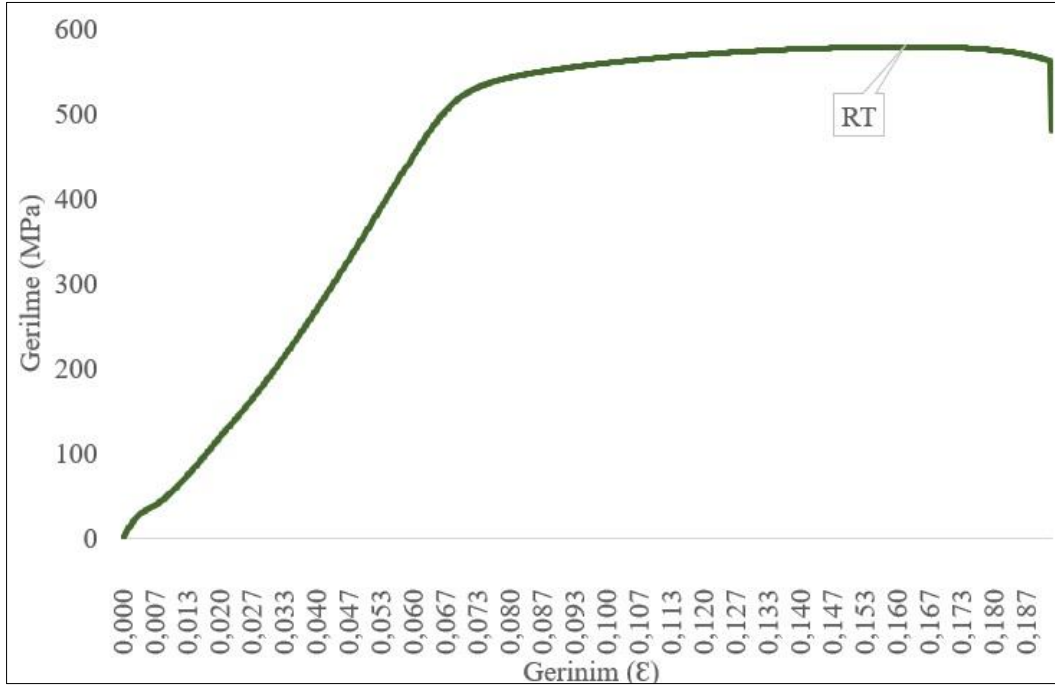
Malzeme	% Al	% Zn	% Cu	% Cr	% Ti	% Fe	% Mn	% Zr	% Ni
Al7075-T6	92,432	5,481	1,534	0,169	0,144	0,112	0,037	0,035	0,016

Sac malzemenin hadde yönü ile 0°, 45° ve 90° oluşturacak şekilde tel erozyon tezgahında ASTM-E8M standardına uygun olarak kesilerek hazırlanan çekme numuneleri, deney parametrelerine göre tavllanmışlardır. Çekme testi öncesi ve test sonrası görüntüler Şekil 4.9'da verilmiştir.

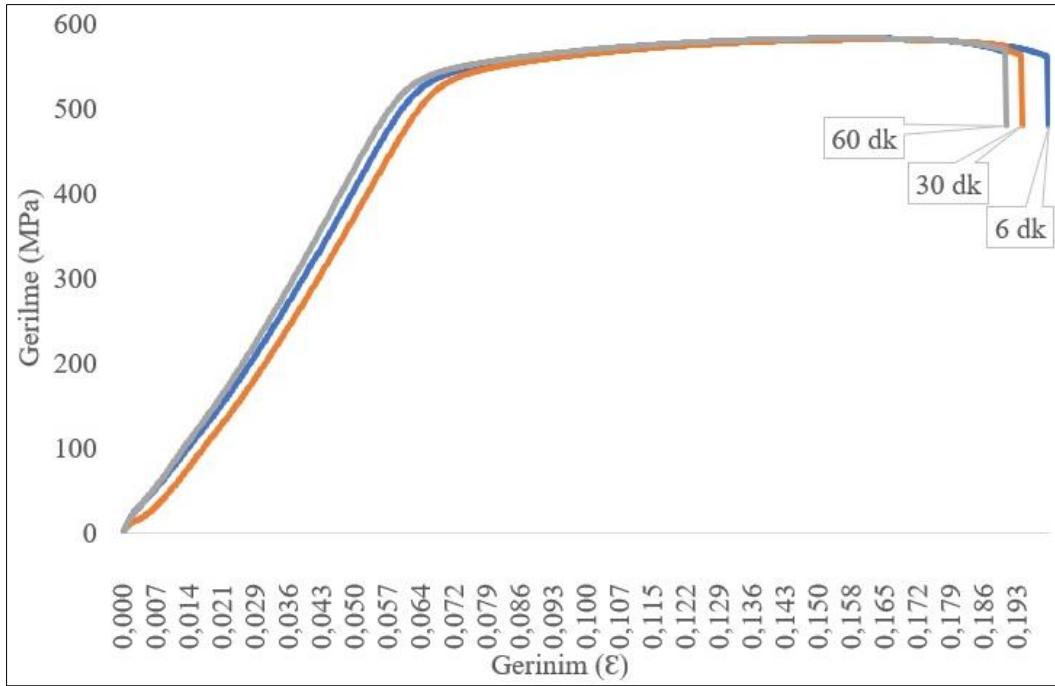


Şekil 4.9. Al7075-T6 çekme testi numuneleri a) Test öncesi b) Test sonrası

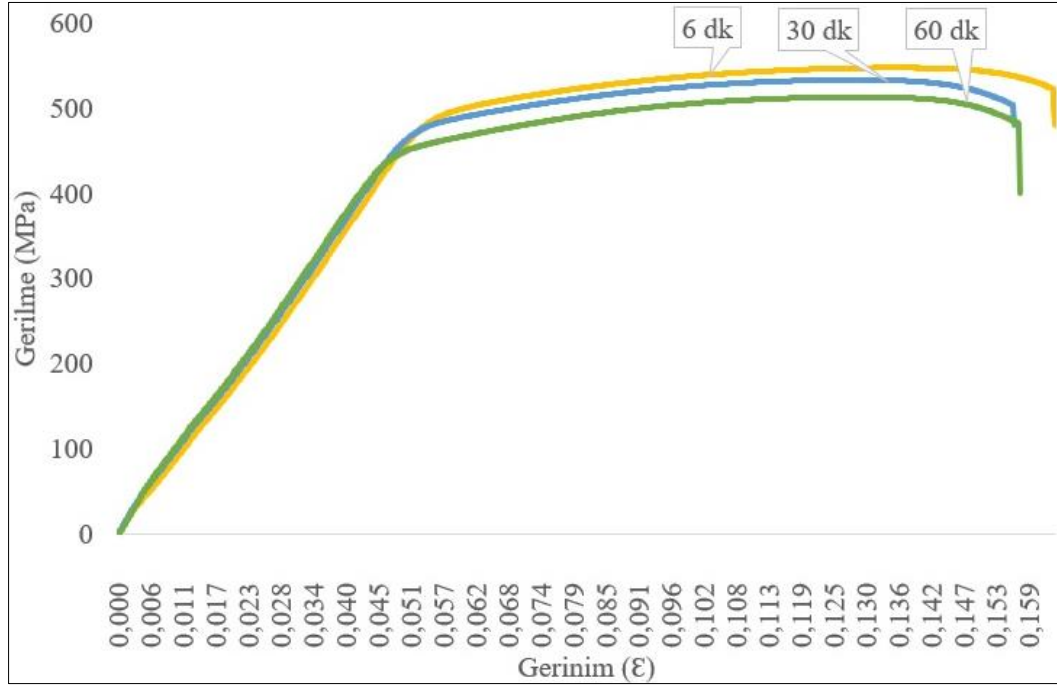
Tavlama sıcaklıklarına göre çekme testi sonuçlarının grafiksel gösterimi Şekil 4.10-4.14'-te verilmiştir.



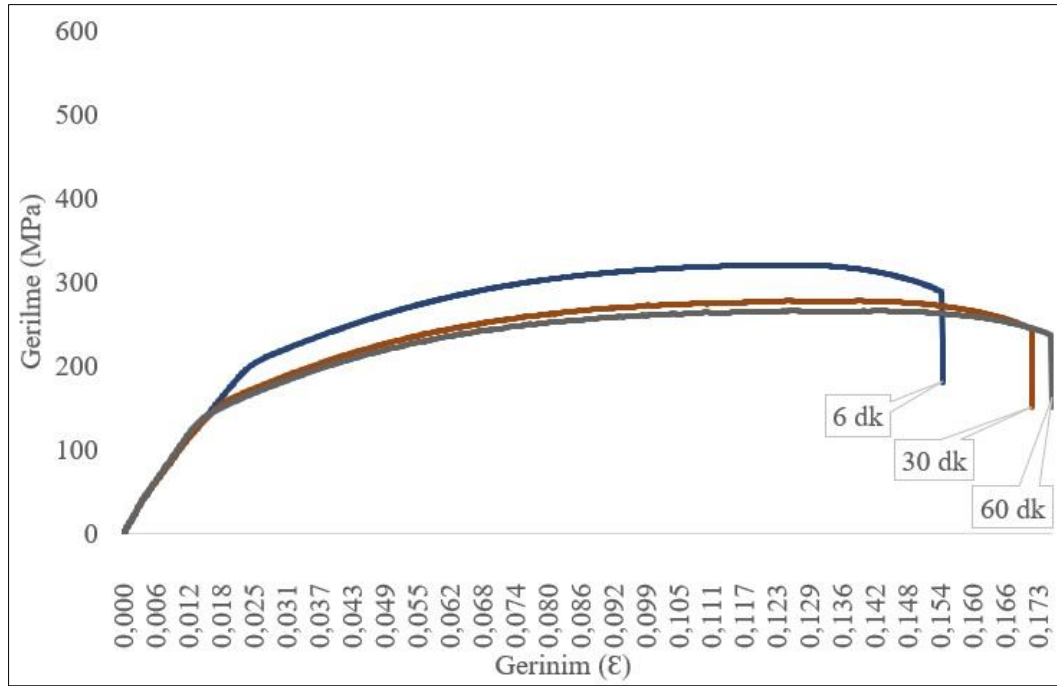
Şekil 4.10. Tavlanmamış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları



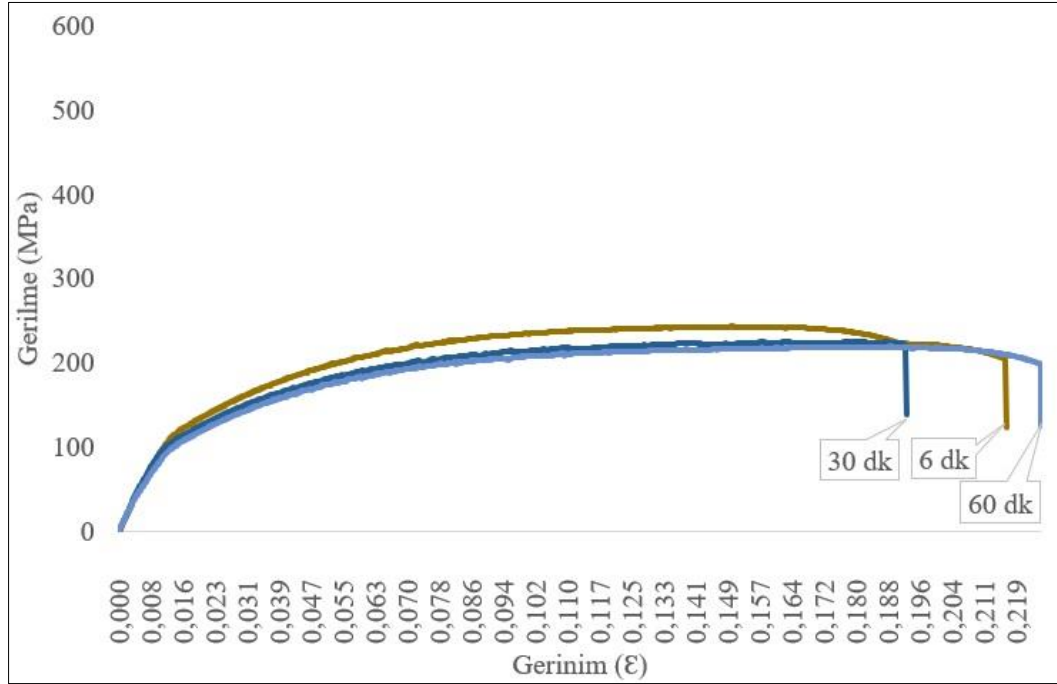
Şekil 4.11. 100°C’de tavlanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları



Şekil 4.12. 200°C’de tavllanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları



Şekil 4.13. 300°C’de tavllanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları



Şekil 4.14. 400°C’de tavllanmış Al7075-T6 alaşımının çekme testi sonuçları

Gerilme-gerinim grafikleri kullanılarak malzemenin akma ve çekme gerilme değerleri elde edilmiş ve Çizelge 4.6’da verilmiştir. Sac malzemelerin çekme testinde belirgin bir akma noktasının olmadığı gözlemlenmiştir. Akma noktası, elastik bölgedeki eğriye % 0,2 oranında paralel ötelenmiş çizgi baz alınarak deformasyon eğrisini kestiği yer ölçülerek elde edilmiştir.

Çizelge 4.6. Tavlama parametrelerine göre Al7075-T6 için gerilme-gerinim değerleri

Malzeme Al7075-T6	Akma gerilmesi (MPa)	Maksimum çekme gerilmesi (MPa)	Maksimum çekmedeki çekme gerinimi (%)	Kopmadaki çekme gerinimi (%)
RT	542,253	579,336	0,163	0,191
100°C - 6 dk	539,156	583,438	0,159	0,191
100°C - 30 dk	538,755	581,581	0,159	0,200
100°C - 60 dk	538,688	583,365	0,153	0,194
200°C - 6 dk	493,425	548,164	0,136	0,162
200°C - 30 dk	482,021	533,840	0,127	0,155
200°C - 60 dk	451,467	513,534	0,128	0,156
300°C - 6 dk	221,437	319,663	0,116	0,154
300°C - 30 dk	172,125	277,109	0,127	0,171
300°C - 60 dk	148,134	265,356	0,130	0,175
400°C - 6 dk	123,105	241,977	0,146	0,192
400°C - 30 dk	113,081	223,914	0,168	0,216
400°C - 60 dk	108,317	218,203	0,177	0,225

4.2. Deney Çalışma Ortamı ve Deney Parametreleri

Bükme ile şekil verme işlemi Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarındaki bilgisayar kontrollü deney düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneğinin bölümleri Şekil 4.15'te, teknik özelliklerde Çizelge 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.15. Deney çalışması ortamı

Çizelge 4.7. Deney düzeneği teknik özellikleri [74]

Hidrolik Sistem	En yüksek sistem basıncı	25 MPa
	En düşük sistem basıncı	1 MPa
	Motor gücü	15 Kw
	Pompa debisi	32 lt/dk
	Şekillendirme hız aralığı	0-18 mm/sn
Şekillendirme Grubu	Silindir çapı	200 mm
	Kurs boyu	200 mm
	Silindir adedi	1
	Koordinat okuyucu cetvel	300 mm

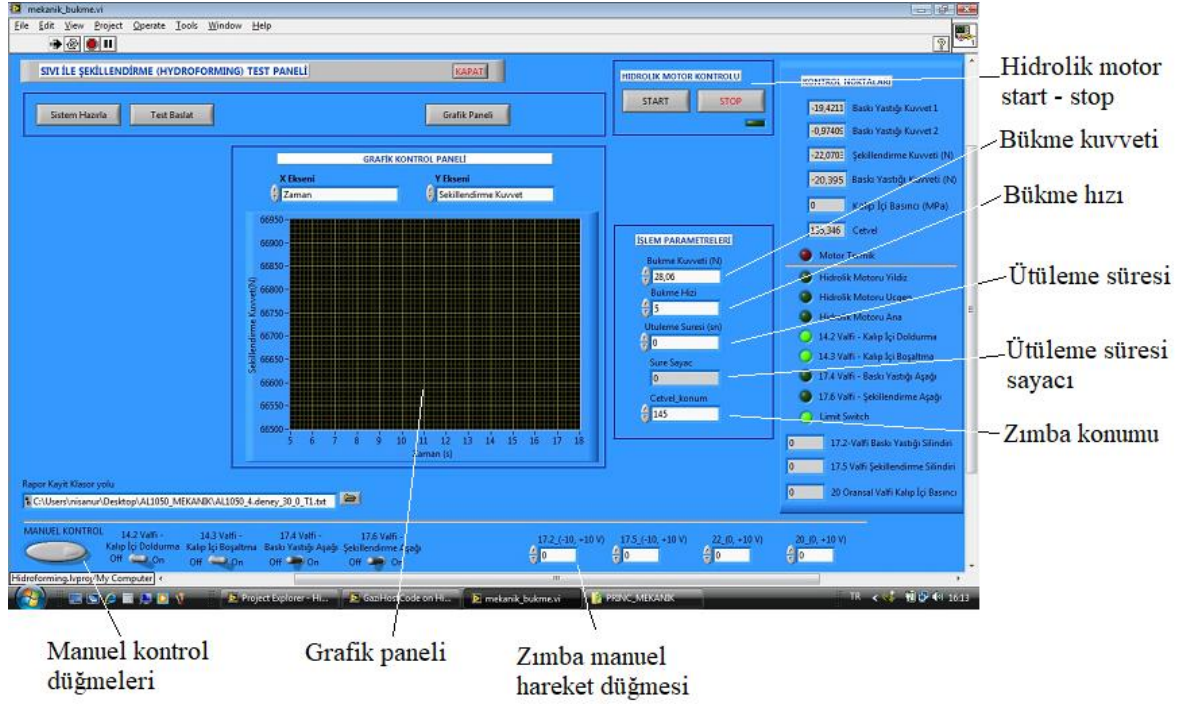
Zımba uç radyusu 0 mm olan 15°-30°-45°-60°-75° açılarında V bükme kalıpları deneysel çalışmalarda kullanılmıştır. Dişi ve erkek kalıpların hidrolik prese kolayca bağlanabilmeleri için üst ve alt tablada aparatlar tasarlanmış ve üretilmiştir. Çalışma esnasında rijit bir bağlama ve kolay kalıp değiştirme sağlanmaktadır. Zımba ve kalıp düzeneğinin bölümleri Şekil 4.16'da gösterilmiştir.



Şekil 4.16. Zimba ve kalıp düzeneği

Alt kalıpta bulunan yuva sayesinde 20 mm genişliğindeki deney numuneleri dönüklük olmadan ve ortalı olarak kalıp üzerine konumlanmakta ve şekillendirme işlemi gerçekleştirilmektedir.

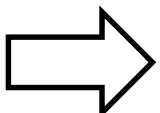
Deneysel çalışma esnasında; zimba üzerinde bulunan yük hücresi vasıtasıyla, uygulanan zimba kuvveti ve zamana bağlı veriler alınarak deneysel çalışma grafik ekranında da eş zamanlı gözlemlenmiştir. Tasarlanan bilgisayar yazılımı ile her bir deney parametresi için veriler yazı dosyası olarak oluşturulup kaydedilmiştir. Şekil 4.17’de deney cihazı kontrol yazılımının ekran görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.17. Kontrol yazılımının ekran görüntüsü

Deney parametresi olan ütüleme süresi ve şekillendirme hızı parametreleri programa veri olarak girilmektedir. Çalışma kapsamında ütüleme süresi parametreleri 0, 10 ve 20 sn olarak şekillendirme hızı da 10 mm/sn olarak belirlenmiştir.

Tez çalışmasında deneysel işlem parametreleri, girdi parametreleri ve çıktı parametreleri olmak üzere iki grupta sınıflandırılmıştır. Bu parametreler Şekil 4.18’de verilmiştir.

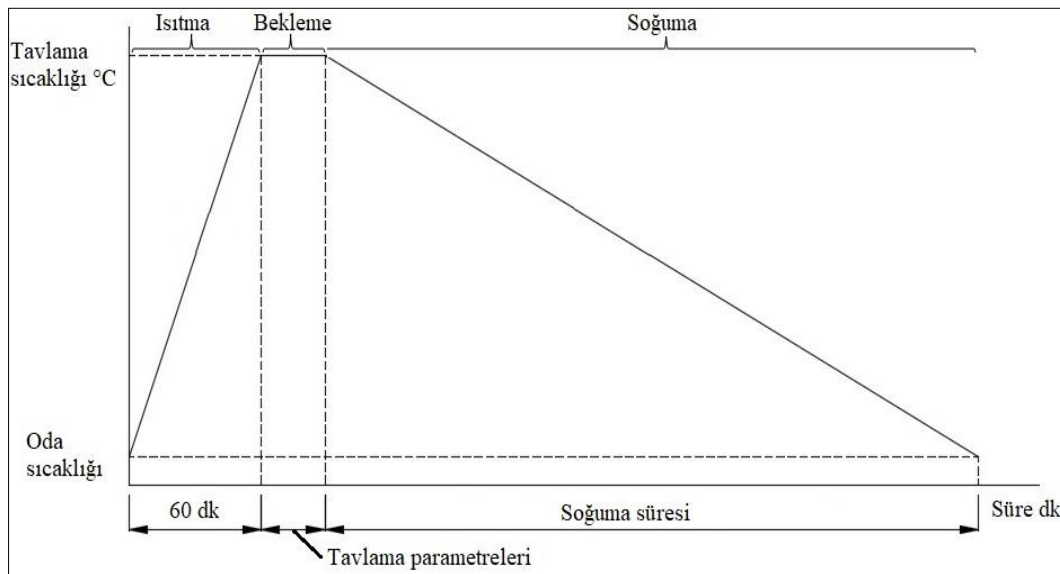
Girdi parametreleri		Çıktı parametreleri
- Malzeme cinsi (Al2024-T3, Al7075-T6) - Malzeme kalınlığı (2,5 mm, 3 mm) - Ütüleme süresi (0, 10 sn, 20 sn) - Kalıp açısı (15°, 30°, 45°, 60°, 75°) - Tavlama sıcaklıkları (RT, 100°C, 200°C, 300°C, 400°C) - Tavlama süreleri (6 dk, 30 dk, 60 dk)	 Deneyisel çalışma	- Geri esneme miktarları - Şekillendirilebilirlik kusurları

Şekil 4.18. Deneysel çalışmalarda kullanılan işlem parametreleri

Tavlama işleminde sepete dizilen çekme numuneleri ve deney malzemeleri seramik raflara yerleştirilerek fırının kapağı kapatılmıştır. Fırının içerisine yerleştirme düzeni Resim 3.1’de verilmiştir. Fırının kontrol ünitesinden tavlama prosesinin program numarası seçilerek tavlama işlemine başlanmıştır. 60 dk’da istenilen tavlama sıcaklığına ulaşan fırın, bu sıcaklıkta belirlenen tavlama süresince bekletilmiştir. Tavlama sıcaklığında bekleme süresi bittikten sonra, sirkülasyon fanı çalışır halde fırının kapağı kapalı olarak oda sıcaklığına varana dek beklenmiştir. Tavlama sürecinin şematik gösterimi Şekil 4.19’da verilmiştir.



Resim 4.1. Fırın içerisine yerleştirme düzeni



Şekil 4.19. Deney numuneleri için tavlama sürecinin şematik gösterimi

Oda sıcaklığına gelen fırının kapağı açılarak numuneler çıkarılmış ve deneysel çalışma için ayrı ayrı numune kaplarına konulmuştur.

4.4. Deney Malzemelerinin Mikroyapı İncelemesi

Tavlama sıcaklıklarının ve tavlama sıcaklığında bekletme sürelerinin deney malzemelerinin mikro yapısına etkilerinin incelemek amacı ile tez çalışması kapsamında deney malzemelerinin mikro yapılarının incelemesi taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla gerçekleştirilmiştir.

Mikro yapı incelemesi öncesinde deney numuneleri bir takım ön işlemlerden geçirilerek hazırlanmıştır. Bu hazırlığın ilk aşamasında zımparalama ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma işleminin temel amacı, yüzey pürüzlülüğünün azaltılması olup bu sayede, ışığı iyi yansıtan bir yüzey elde edilmiştir. Bu işlemler için öncelikle numunelerin yüzeyi 800, 1200 ve 1500 numaralı zımparalar ile sırasıyla zımparalanmıştır. Zımparalama işleminin ardından parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatma, numunenin zımparalanmış yüzeyine döner bir disk üzerindeki parlatma keçeleri üzerine uygulanan aşındırıcı partiküller vasıtası ile yapılmaktadır. Parlatma işleminde aşındırıcı partikül olarak sırasıyla 3 mikronluk ve 1 mikronluk alümina solüsyon kullanılmıştır. Ardından numuneler ultrasonik banyoda 25°C sıcaklıkta 10 dk boyunca temizlenmişlerdir. Temizlenen numunelerin parlatılarak hazırlanan yüzeyi, mikroskop ışığı altında kontrast oluşturması amacıyla kimyasal çözeltiler ile dağlanmıştır. Deney numunelerinin dağlanmasında Keller ayracı kullanılarak yaklaşık 30 sn boyunca dağlama işlemi devam etmiştir.

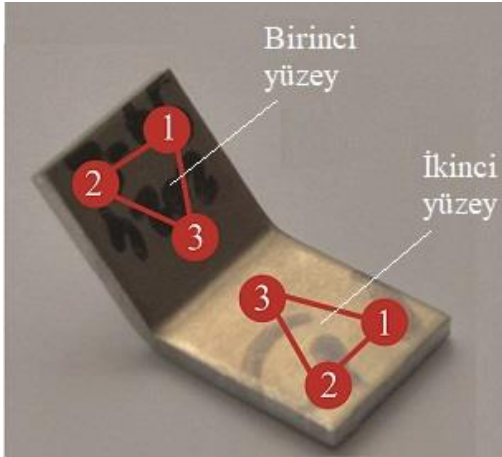
4.5. Geri Esnemenin Ölçümü

Yapılan deneysel çalışma sonunda bükülerek şekillendirilmiş deney numunelerinin geri esneme açılarının ölçümü, Gazi Üniversitesi İmalat Mühendisliği laboratuvarında bulunan Hexagon Performance marka koordinat ölçüm cihazı (CMM) kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



Resim 4.2. CMM ile geri esneme ölçümü çalışma ortamı

Ölçme işlemi öncesi, şekillendirilmiş sac numuneler büyük bir plaka üzerine yapıştırılmıştır. Ölçme işleminde, ölçüm probu büküm yüzeylerinin her birinde bir düzlem oluşturacak şekilde 3 farklı noktaya değdirilmiş, oluşan iki düzlem arasındaki açı ölçülmüştür. Şekil 4.20’de bükülerek şekillendirilmiş deney numunesi üzerindeki ölçüm noktaları gösterilmiştir.



Şekil 4.20. Deney numunesi üzerindeki ölçüm noktaları

Bükülerek şekillendirilmiş deney numunesinden yazılım ile ölçülen açılardan büküm açıları çıkarılarak esneme açıları elde edilmiştir. Resim 4.3’te CMM ile esneme ölçümü yapılışı verilmiştir.



Resim 4.3. CMM ile alüminyum sac malzemelerde geri esnemenin ölçümü

5. DENEYSEL ÇALIŞMA SONUÇLARI

Deneysel çalışmalar Şekil 4.18’de verilen girdi parametrelerine göre gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonuçları, deney malzemelerinin türüne göre sınıflandırılarak yorumlanmıştır.

Tavlama işlemi sonrasında şekillendirilecek numunelerde sıcaklık ve süreye bağlı olarak renk değişmesi meydana gelmiştir. Tavlama sıcaklığı ve bekleme süresindeki artış ile çözünebilen elementlerin difüzyonunun arttığı ve renk dönüşümüne sebep olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum Şekil 5.1’de verilmiştir.



Şekil 5.1. Tavlama işlemi sonrasında deney numunelerindeki renk değişimi a) Al2024-T3
b) Al7075-T6

Tavlama işlemi sonrasında numunelerin ayrıca sertlik değerleri de ölçülmüştür. Ölçüm aşamasında her numunenin üç farklı bölgesinden değerler alınarak ortalama sertlik değeri elde edilmiştir.

Ölçülen Vickers sertlik değerleri Al2024-T3 alüminyum alaşımı için Çizelge 4.9’da, Al7075-T6 alüminyum alaşımı için Çizelge 3.10’da verilmiştir. Ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi Al2024-T3 alüminyum alaşımı için Şekil 3.25’te, Al7075-T6 alüminyum alaşımı içinde Şekil 3.26’da verilmiştir.

Çizelge 5.1. Al2024-T3 alüminyum alaşımı Vickers sertlik değerleri

Numune	Malzeme Al2024-T3	Ölçüm Değerleri (HV)			
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
1	RT	145	137	141	141,00
2	100°C - 6 dk	137	141	143	140,33
3	100°C - 30 dk	141	143	139	141,00
4	100°C - 60 dk	143	139	141	141,00
5	200°C - 6 dk	137	137	141	138,33
6	200°C - 30 dk	137	137	137	137,00
7	200°C - 60 dk	145	137	143	141,67
8	300°C - 6 dk	122	124	127	124,33
9	300°C - 30 dk	106	114	115	111,67
10	300°C - 60 dk	111	111	105	109,00
11	400°C - 6 dk	86	88,1	86	86,70
12	400°C - 30 dk	66,5	66,6	64,5	65,87
13	400°C - 60 dk	61,4	63,3	60,8	61,83



Şekil 5.2. Al2024-T3 alüminyum alaşımı sertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterimi

Çizelge 5.2. Al7075-T6 alüminyum alaşımı Vickers sertlik değerleri

Numune	Malzeme Al7075-T6	Ölçüm Değerleri (HV)			
		1. Ölçüm	2. Ölçüm	3. Ölçüm	Ortalama
1	RT	203	203	196	200,67
2	100°C - 6 dk	179	176	179	178,00
3	100°C - 30 dk	176	168	174	172,67
4	100°C - 60 dk	162	165	162	163,00
5	200°C - 6 dk	162	155	157	158,00
6	200°C - 30 dk	155	148	150	151,00
7	200°C - 60 dk	148	145	145	146,00
8	300°C - 6 dk	90,2	89,2	83,1	87,50
9	300°C - 30 dk	82,1	81,1	82,1	81,77
10	300°C - 60 dk	79,3	79,3	78,4	79,00
11	400°C - 6 dk	69,5	71,8	69,5	70,27
12	400°C - 30 dk	64	64	66,5	64,83
13	400°C - 60 dk	63,3	60,8	64,6	62,90

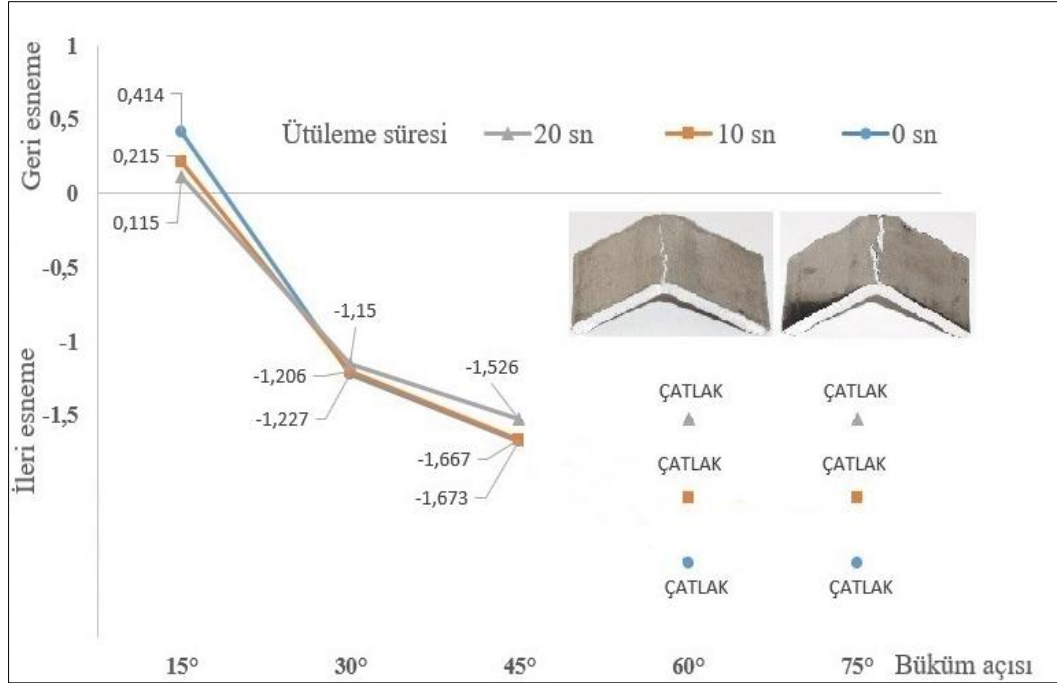


Şekil 5.3. Al7075-T6 alüminyum alaşımı sertlik ölçüm sonuçlarının grafiksel gösterim

5.1. Al2024-T3 Malzemesi İçin Deney Sonuçları

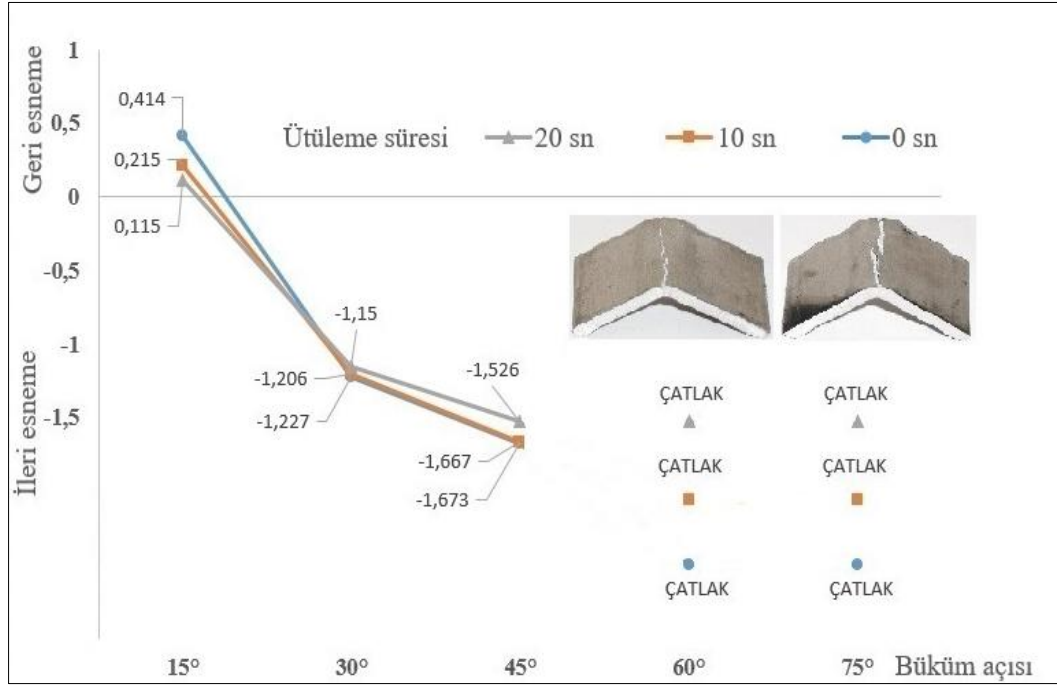
Bükülerek şekillendirilen Al2024-T3 alüminyum alaşımı numunelerin ölçülen esneme miktarları tavlama parametreleri, kalıp açıları ve ütüleme sürelerine göre verilerek açıklanmıştır.

Kalıp açısındaki artışın Al2024-T3 malzeme için RT’de geri esneme açısını azalttığı ileri esneme açısını arttırdığı tespit edilmiştir. A2024-T3 malzemesi RT’de en fazla 45°’de şekillendirilebildiği, bu açıdan sonra çatlak oluşumu başladığı ve kusursuz şekillendirmenin yapılamadığı tespit edilmiştir.

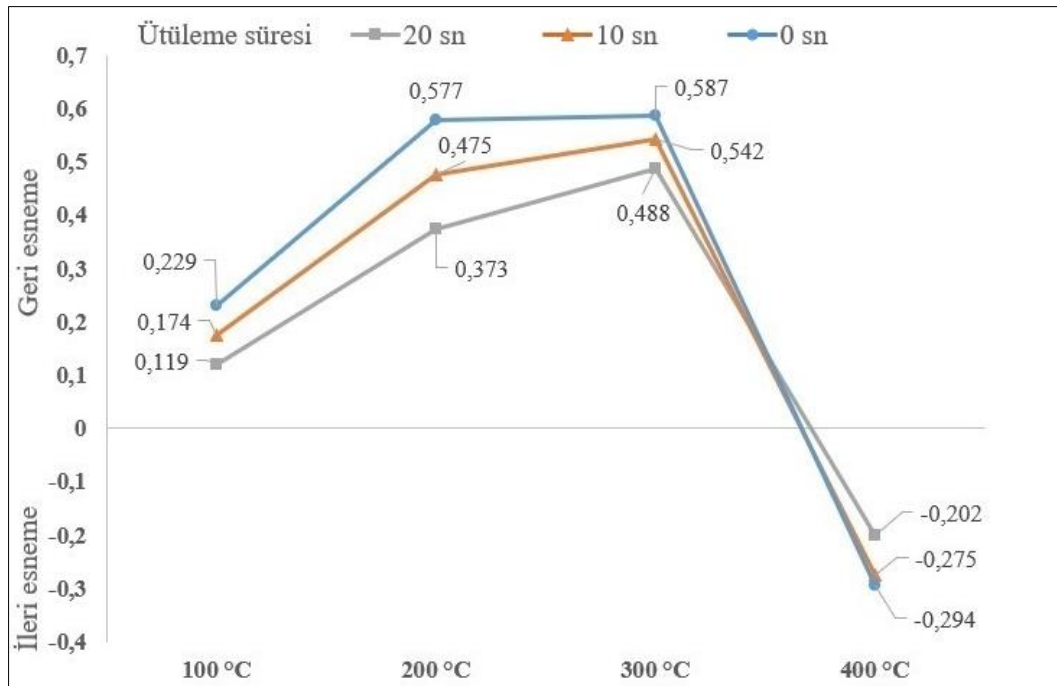


Şekil 5.4. Farklı ütüleme sürelerinde büküm açısı – esneme ilişkisi Al2024-T3, RT

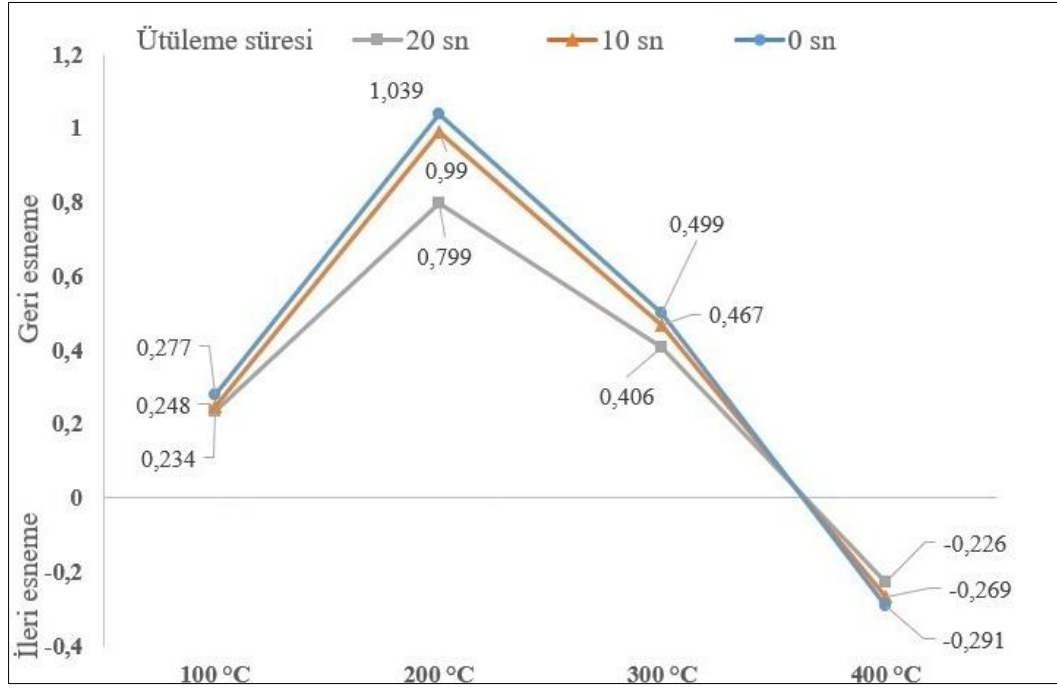
Her bir kalıp açısında sıcaklığın sac malzemede şekillendirilebilirliği ve geri esnemeyi ne kadar etkilediği Şekil 5.2 – 5.16 arasında verilmiştir. Tavlama sıcaklığındaki artışa bağlı olarak malzemedeki sertliğin azaldığı bunun sonucunda da geri esnemenin azaldığı gözlemlenmiştir. Al2024-T3 malzemede 200°C sıcaklığa kadar malzeme sertliğinde ciddi bir değişim olmadığı bunun sonucu olarak da geri esneme açısının anlamlı bir yapıda değişim göstermediği tespit edilmiştir.



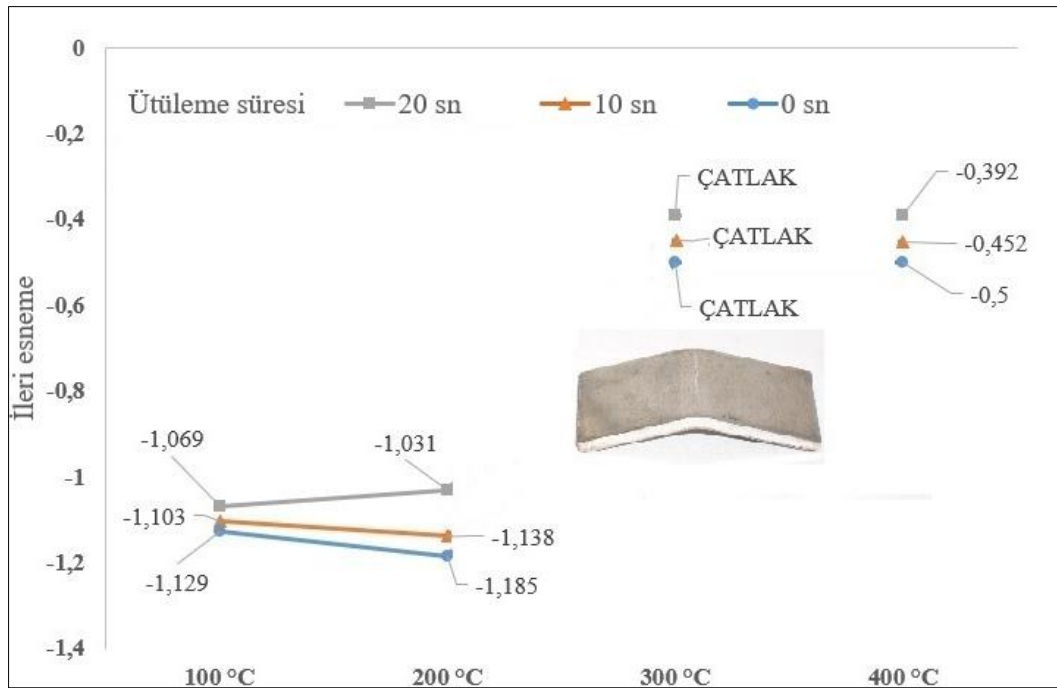
Şekil 5.5. Al2024-T3 15° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



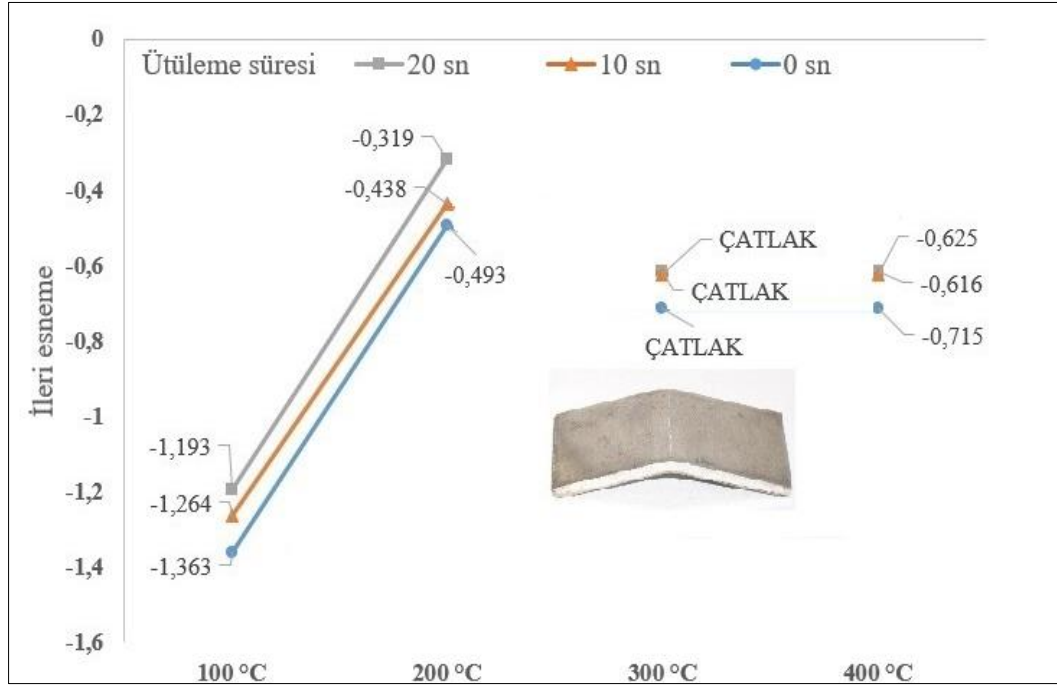
Şekil 5.6. Al2024-T3 15° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



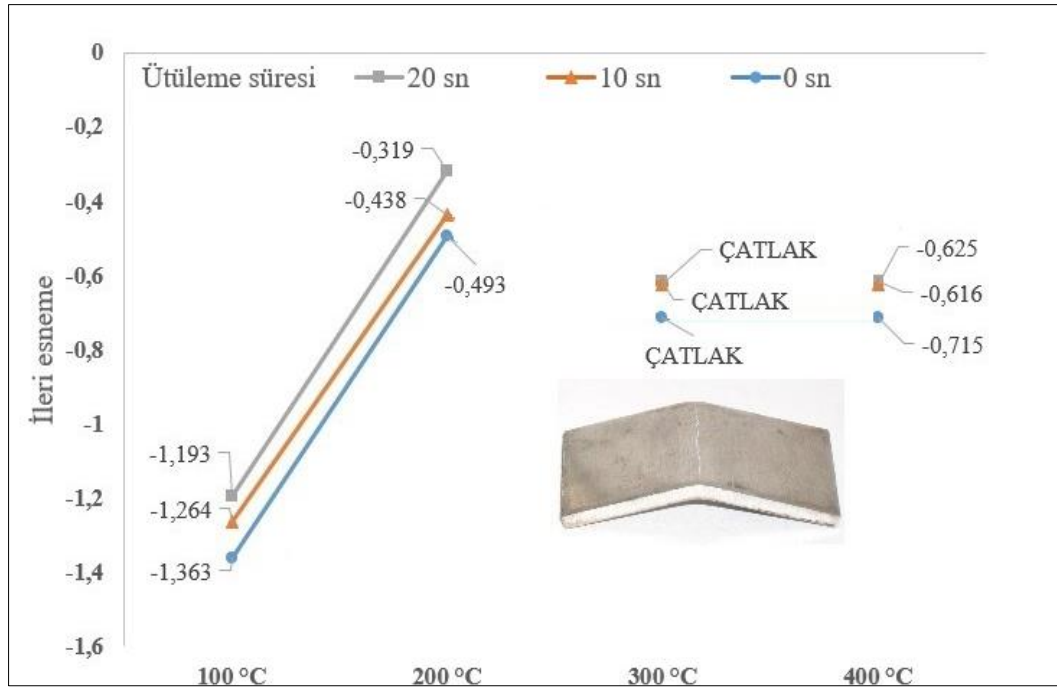
Şekil 5.7. Al2024-T3 15° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



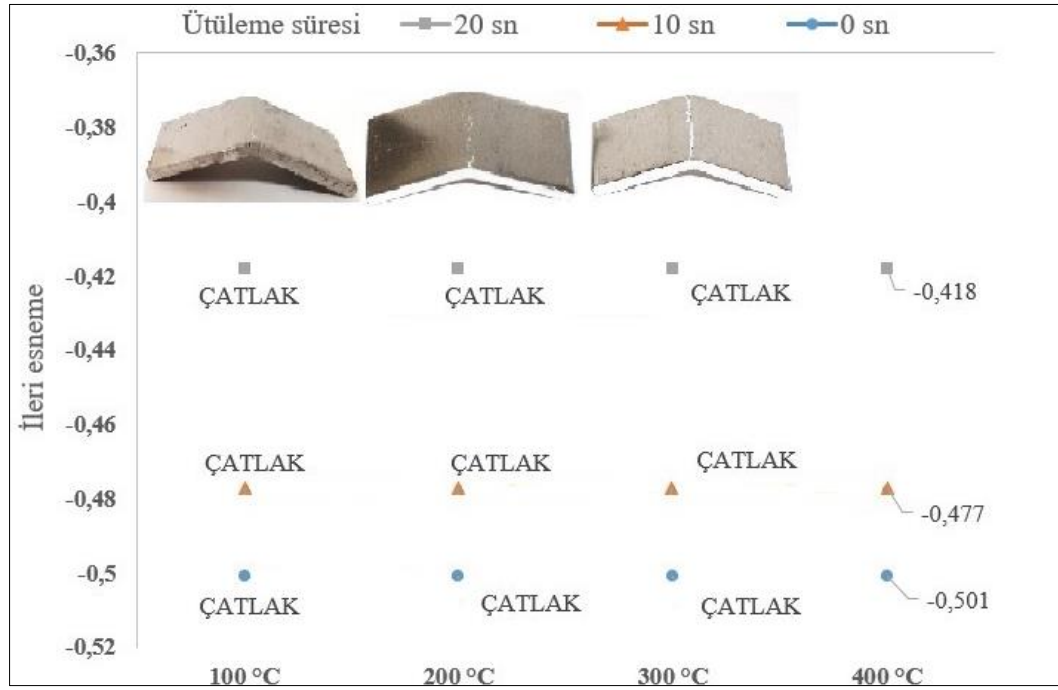
Şekil 5.8. Al2024-T3 30° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



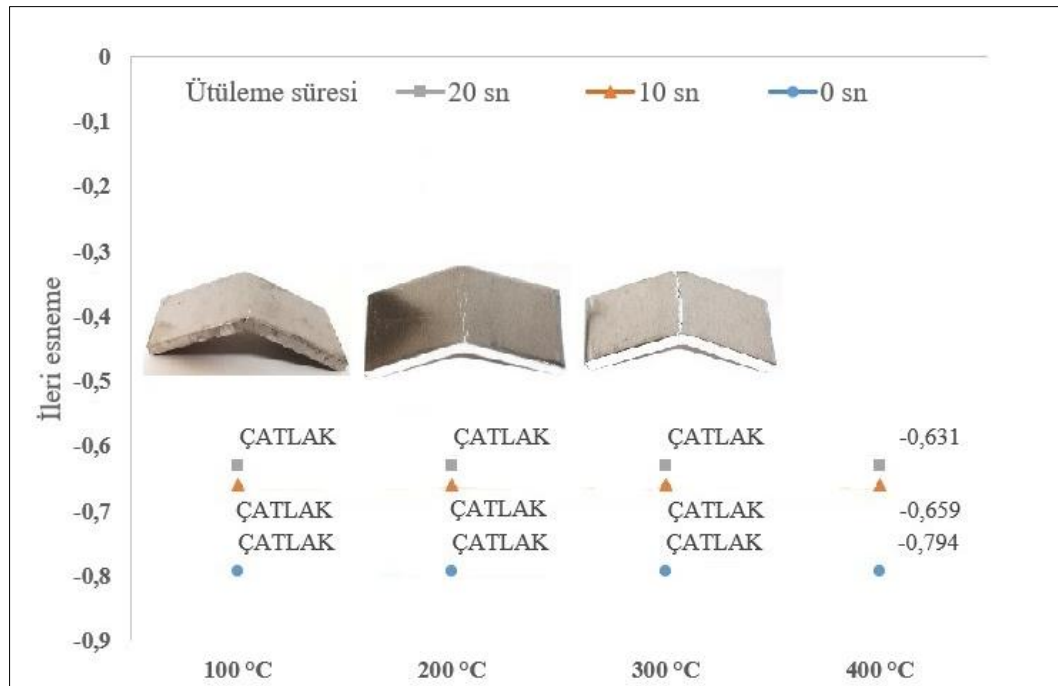
Şekil 5.9. Al2024-T3 30° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



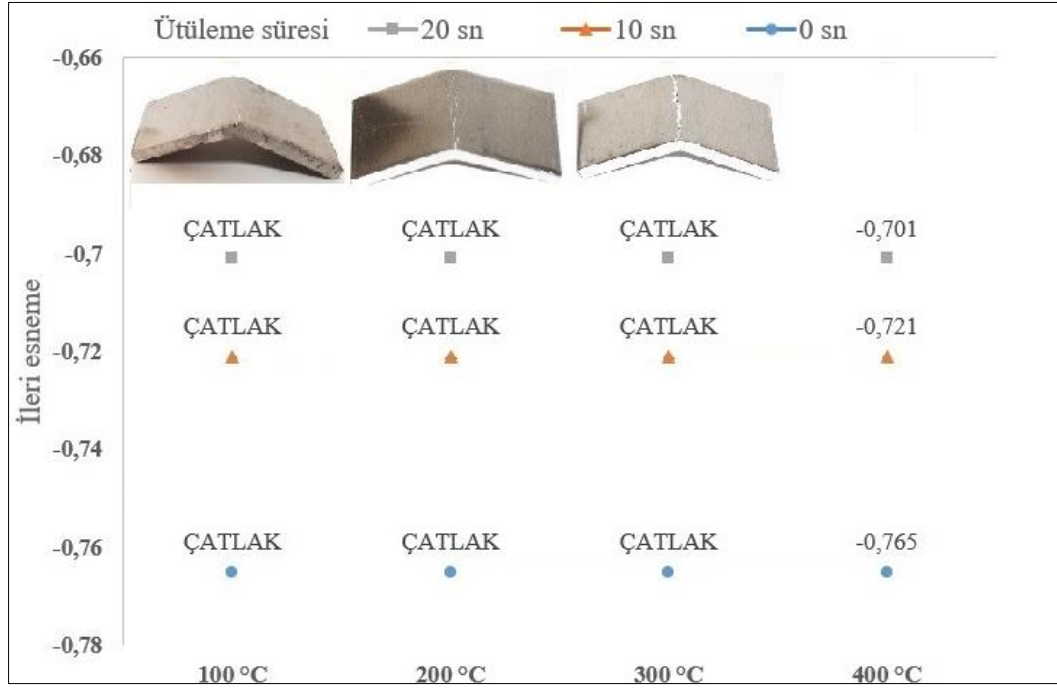
Şekil 5.10. Al2024-T3 30° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



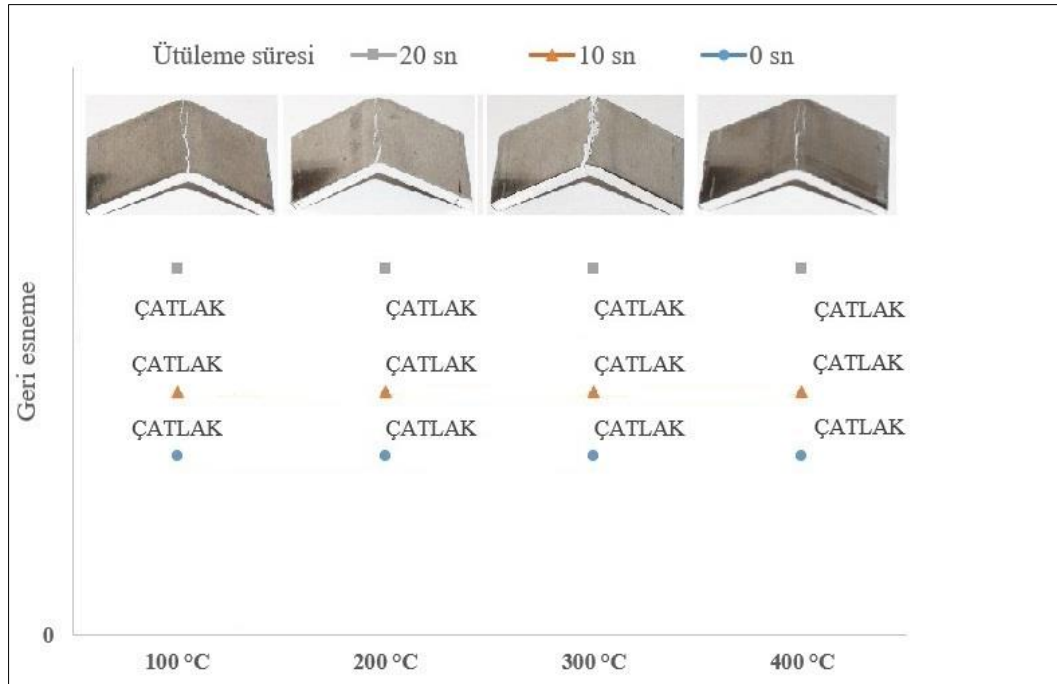
Şekil 5.11. Al2024-T3 45° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



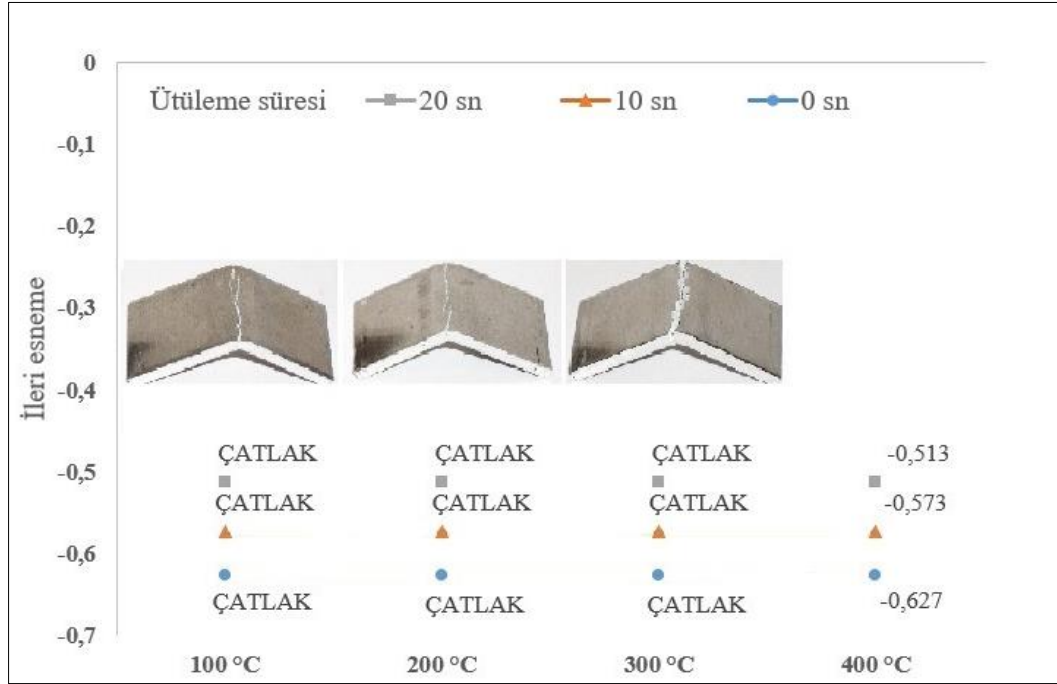
Şekil 5.12. Al2024-T3 45° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



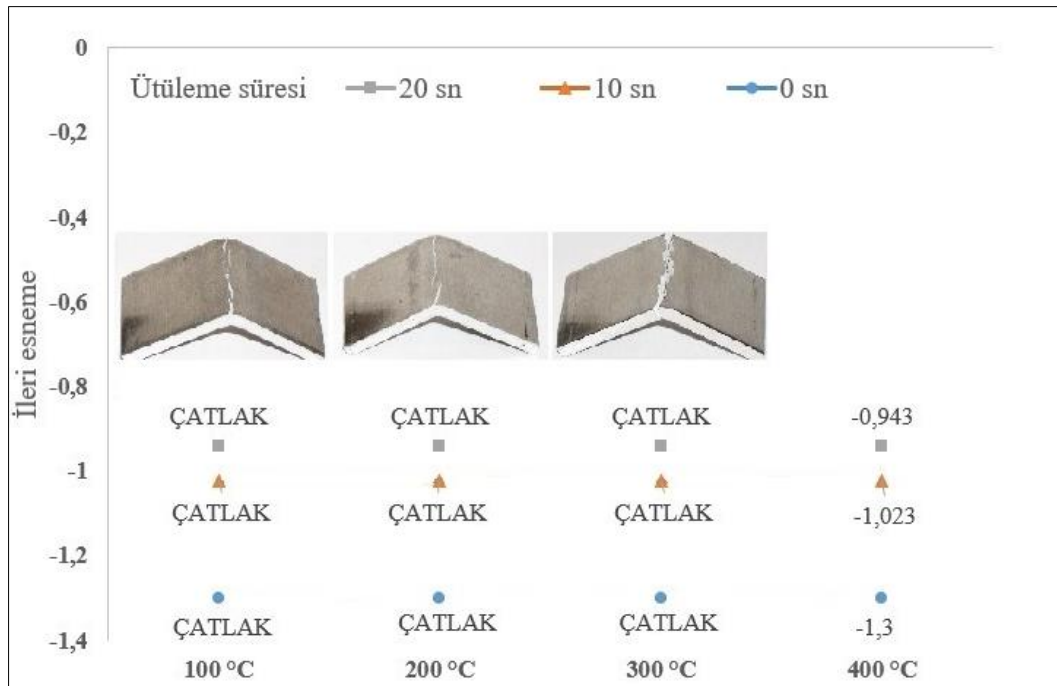
Şekil 5.13. Al2024-T3 45° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



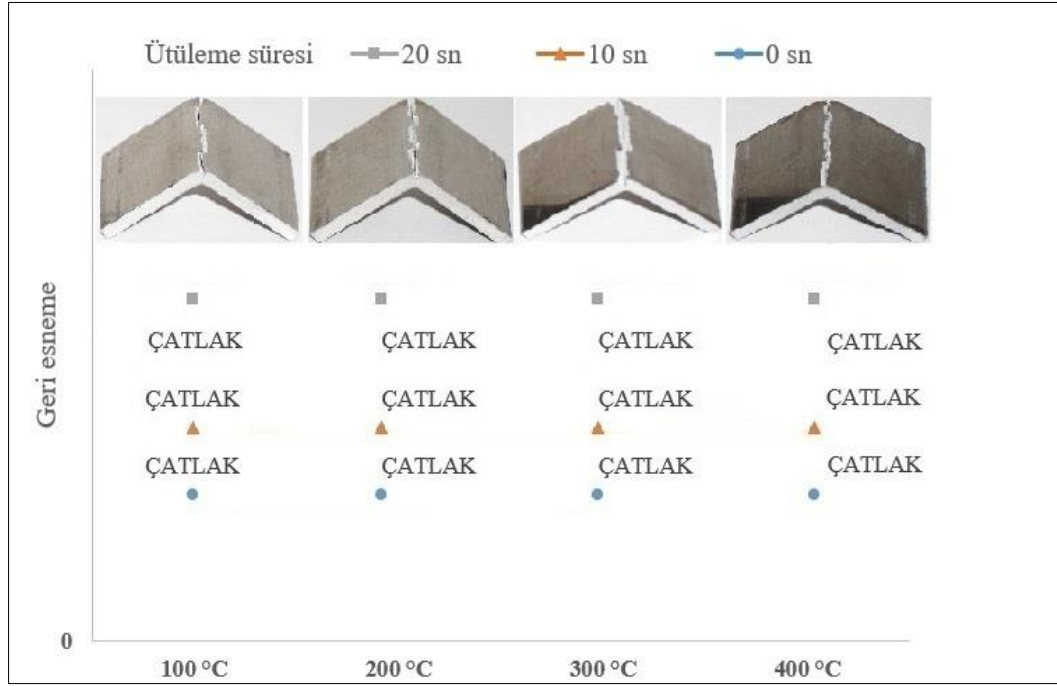
Şekil 5.14. Al2024-T3 60° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



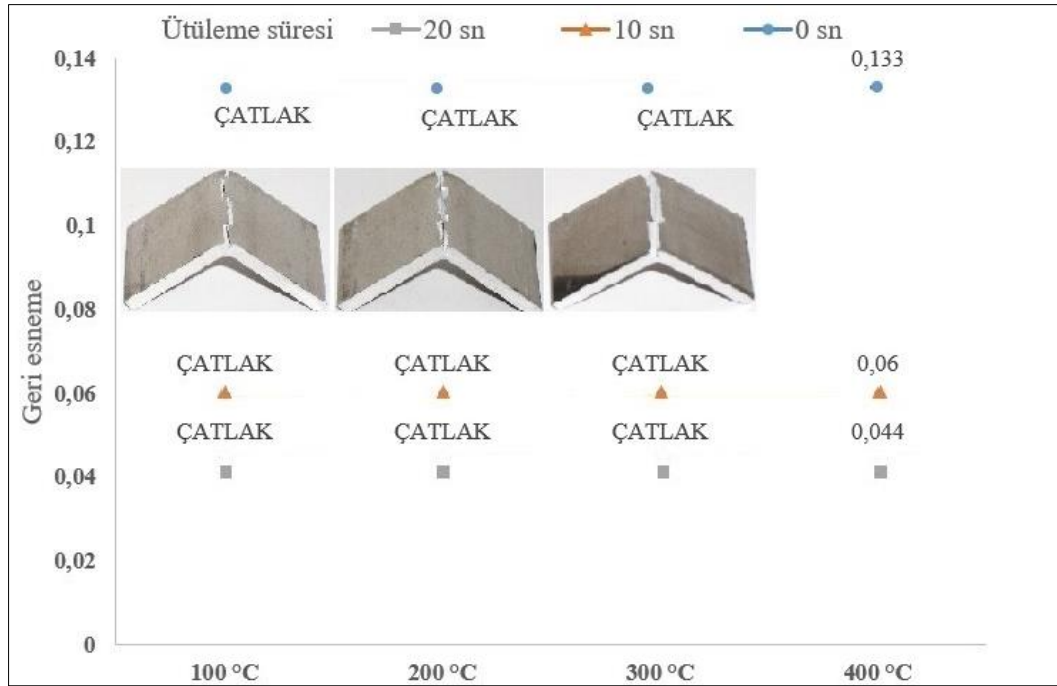
Şekil 5.15. Al2024-T3 60° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



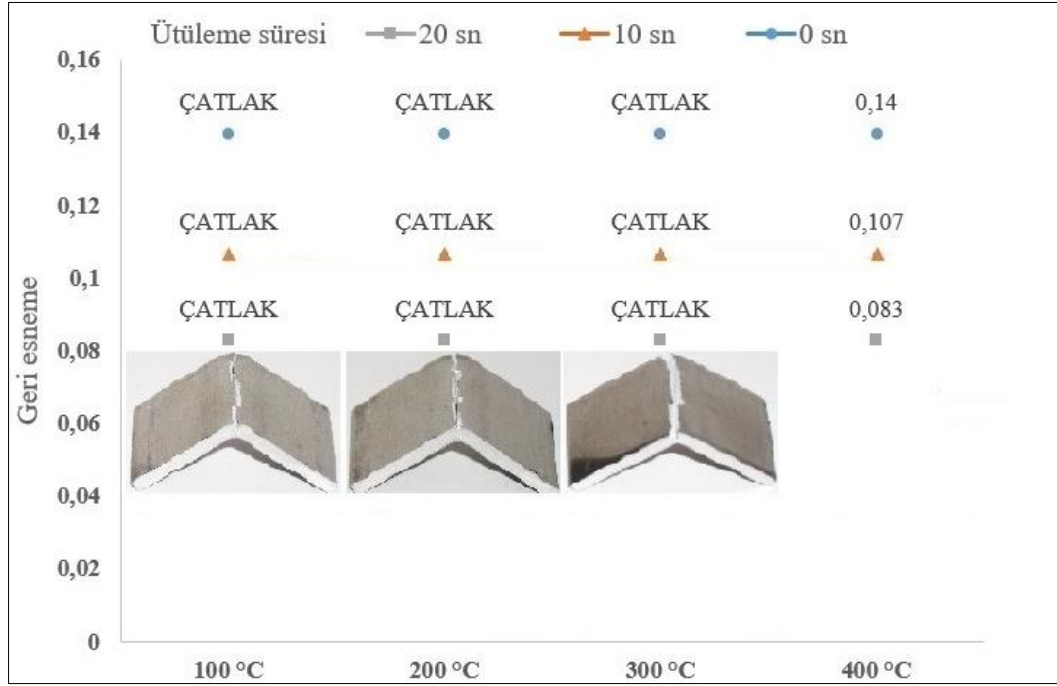
Şekil 5.16. Al2024-T3 60° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



Şekil 5.17. Al2024-T3 75° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



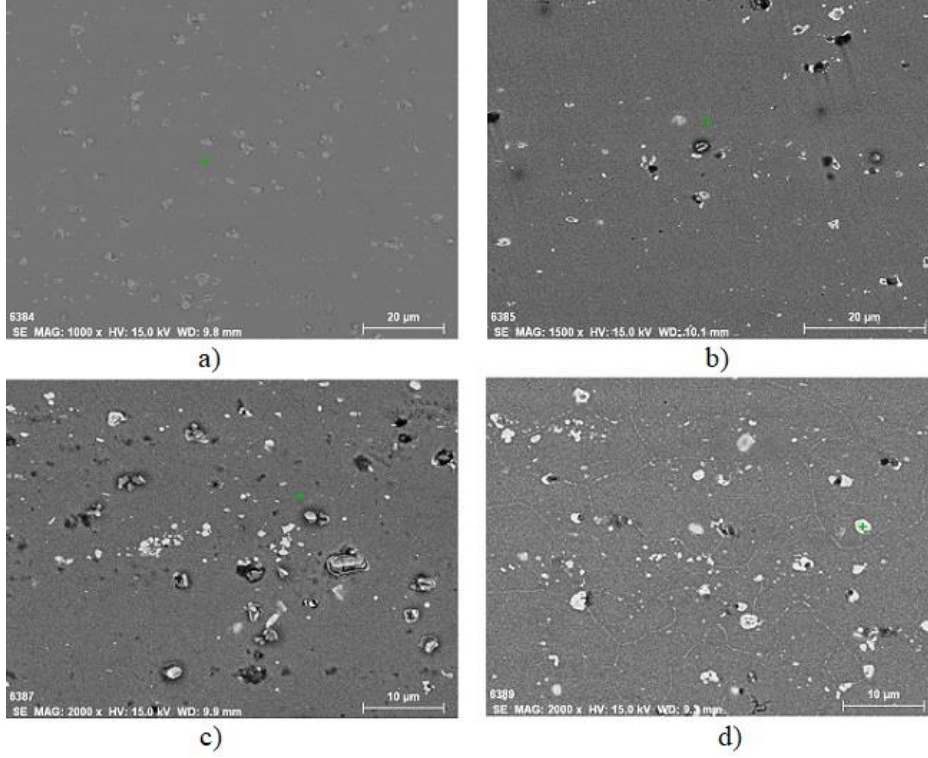
Şekil 5.18. Al2024-T3 75° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



Şekil 5.19. Al2024-T3 75° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi

Şekil 5.20’ de Al2024-T3 alüminyum alaşımının tavlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler verilmiştir. Al2024-T3 malzemesi için farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen işlemler sonucunda kimyasal bileşimden bağımsız olarak tavlama işleminin gerçekleştirildiği sıcaklığın artmasına bağlı olarak çökelti sayısının ve boyutunun arttığı gözlemlenmiştir.

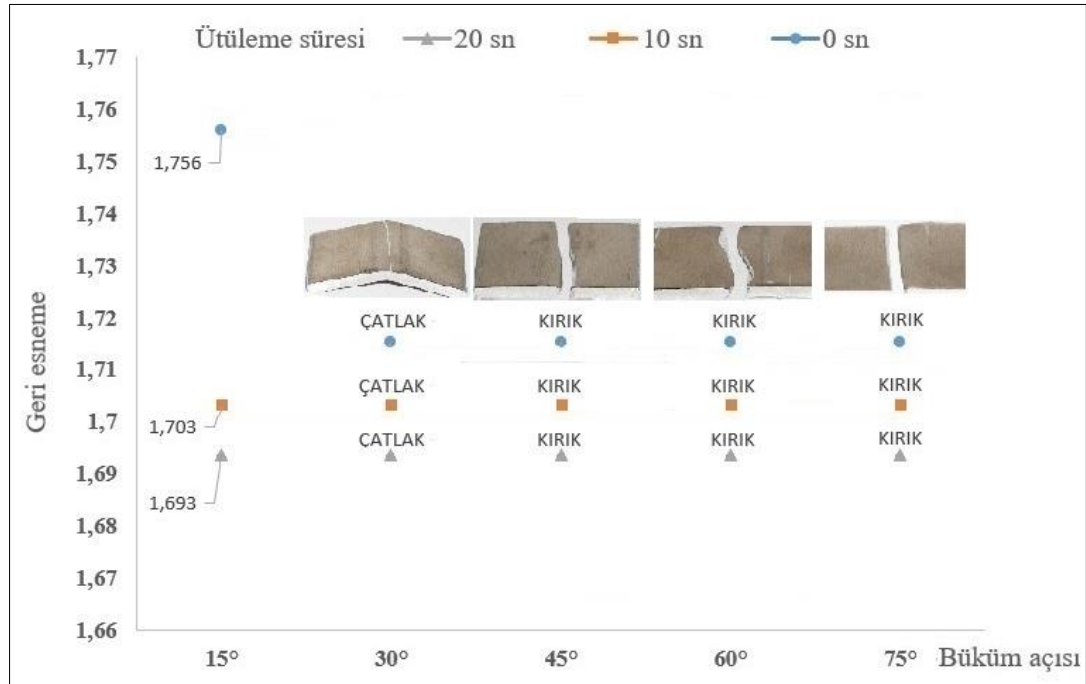
Oluşan çökeltilerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonucunda, ölçülen sertlik değerlerinde 300°C’ de 6 dk’ya kadar önemli bir değişikliğin olmadığı gözlemlenmiştir. 300°C ve 400°C sıcaklıklarda farklı sürelerde gerçekleştirilen tavlama işlemi sonucunda çökeltilerin boyutlarının ve sayısının artmasına bağlı olarak mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemiş olduğu, ölçülen sertlik değerlerindeki azalma ile tespit edilmiştir. Sertlik değerlerindeki bu azalma ile malzeme, 60° ve 75° büküm açılarında çatlamaya uğramadan şekillendirilebilmiştir.



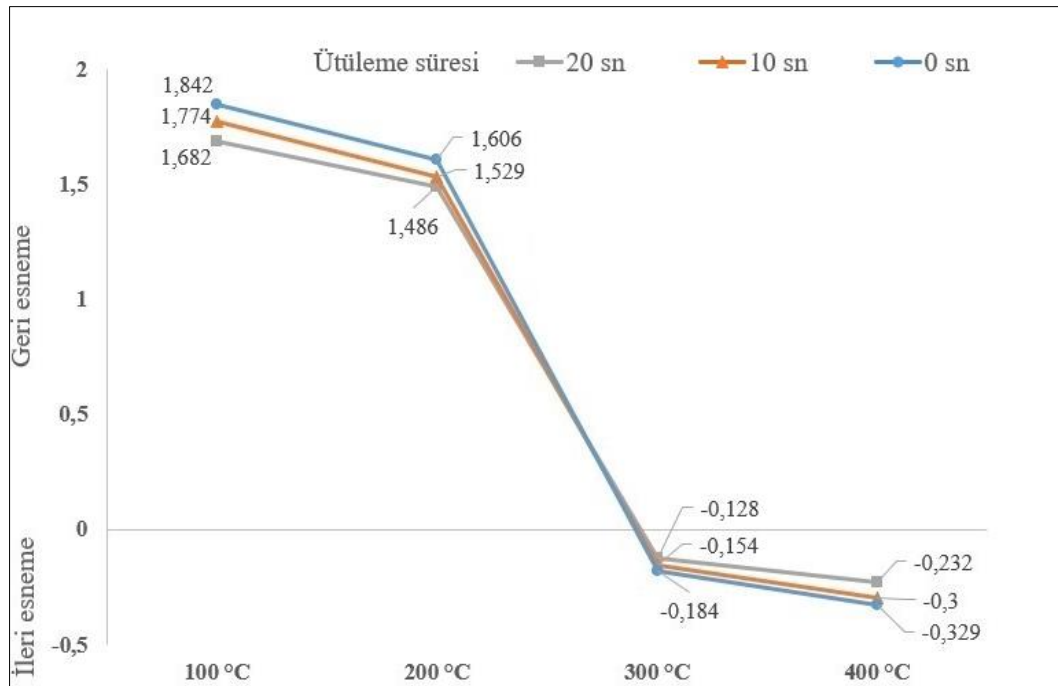
Şekil 5.20. Al2024-T3 alüminyum alaşımının tavlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler a) RT b) 200°C 60 dk c) 300°C 60 dk d) 400°C 60 dk

5.2. Al7075-T6 Malzemesi İçin Deney Sonuçları

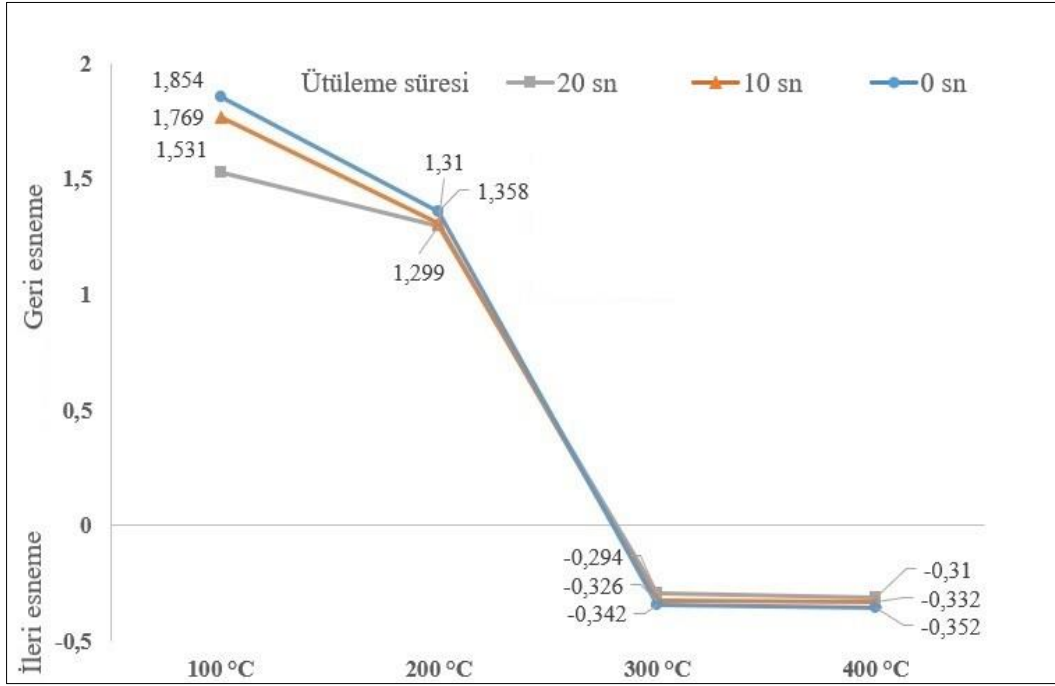
Bükülerek şekillendirilen Al2024-T3 alüminyum alaşımı numunelerin farklı kalıp açıları ve tavlama parametrelerinde V şekillendirilmesi sonucu ölçülen esneme açıları Şekil 5.21-5.36 arasında verilmiştir.



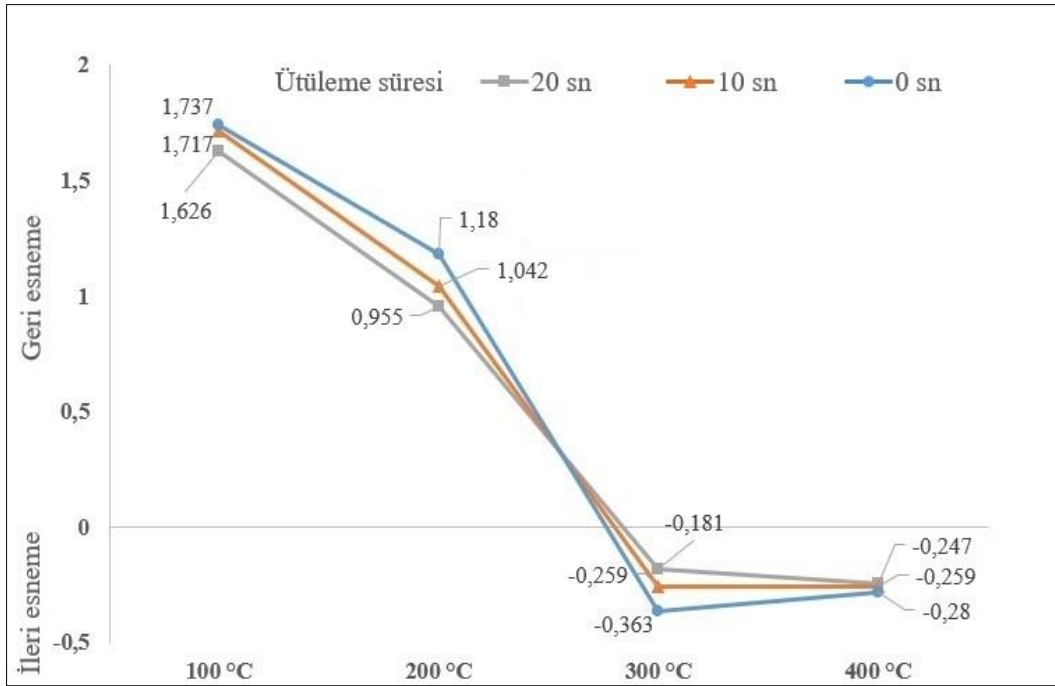
Şekil 5.21. Farklı ütüleme sürelerinde büküm açısı – esneme ilişkisi Al7075-T6, RT



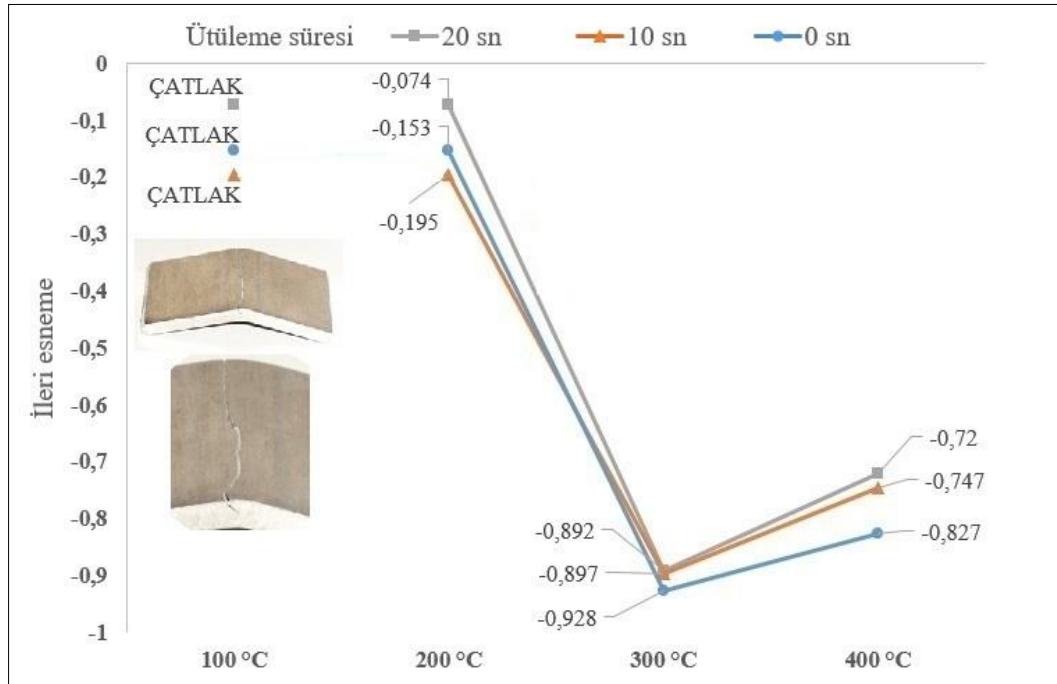
Şekil 5.22. Al7075-T6 15° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



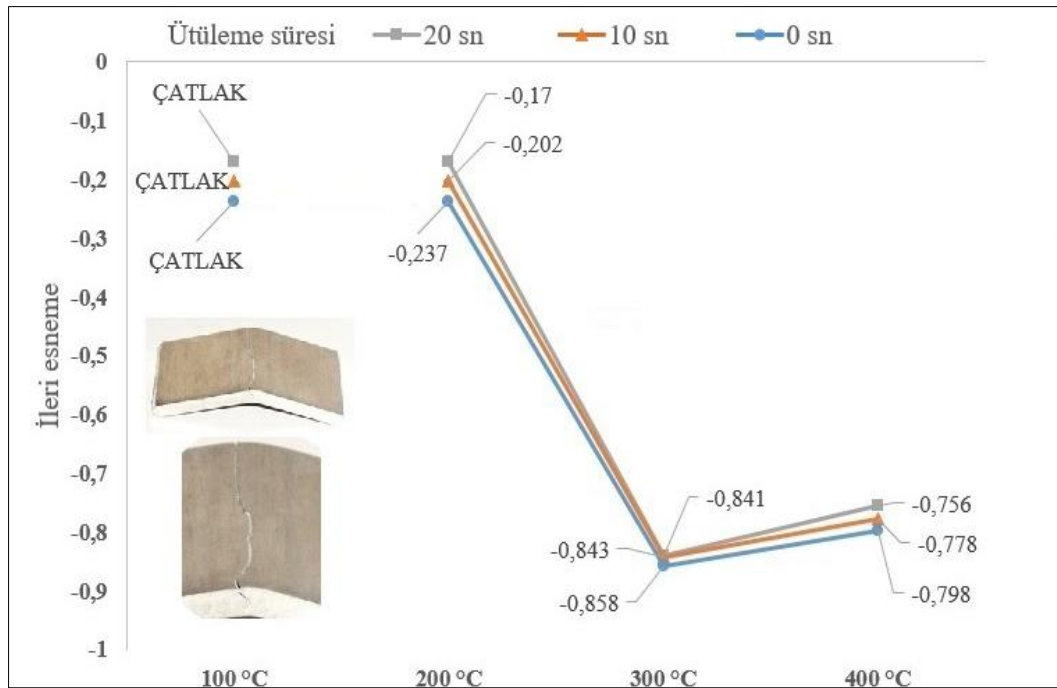
Şekil 5.23. Al7075-T6 15° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



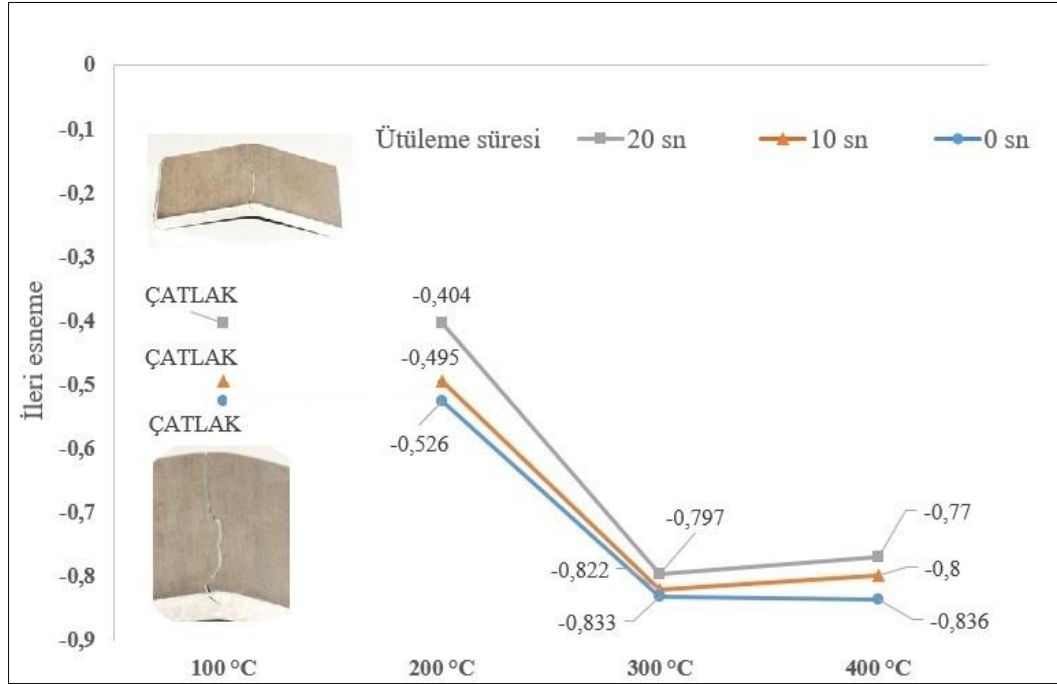
Şekil 5.24. Al7075-T6 15° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



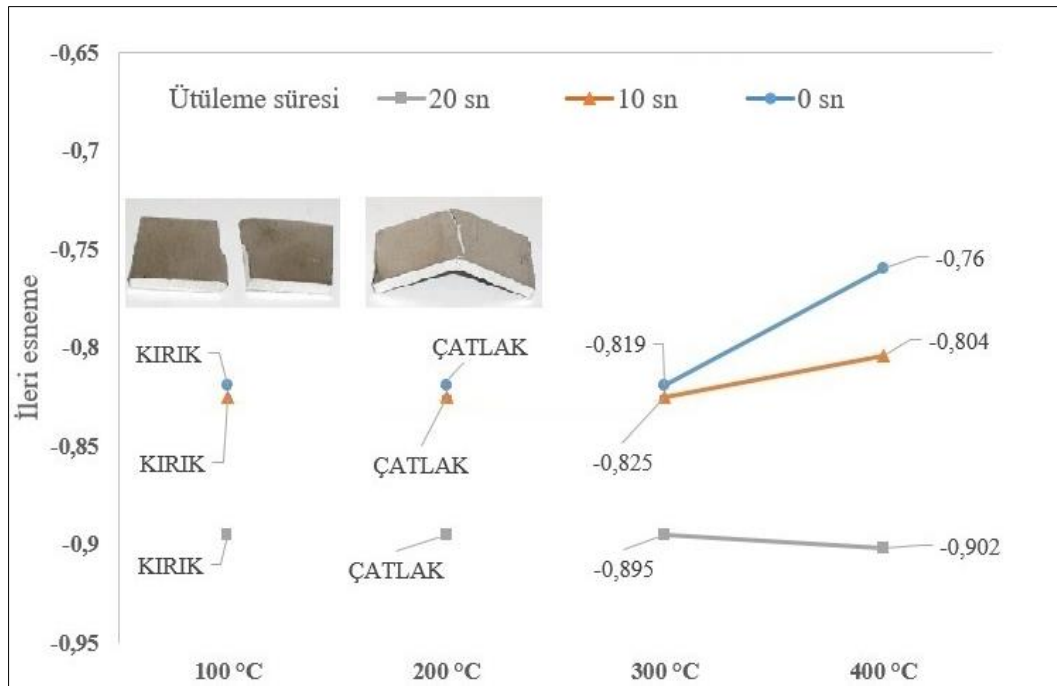
Şekil 5.25. Al7075-T6 30° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



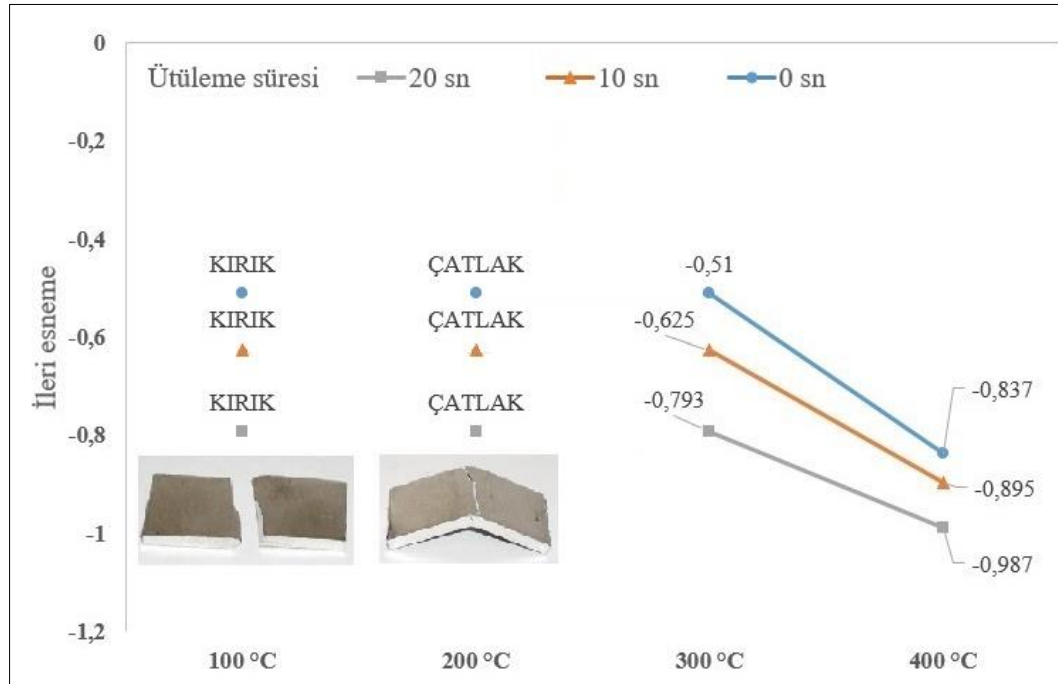
Şekil 5.26. Al7075-T6 30° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



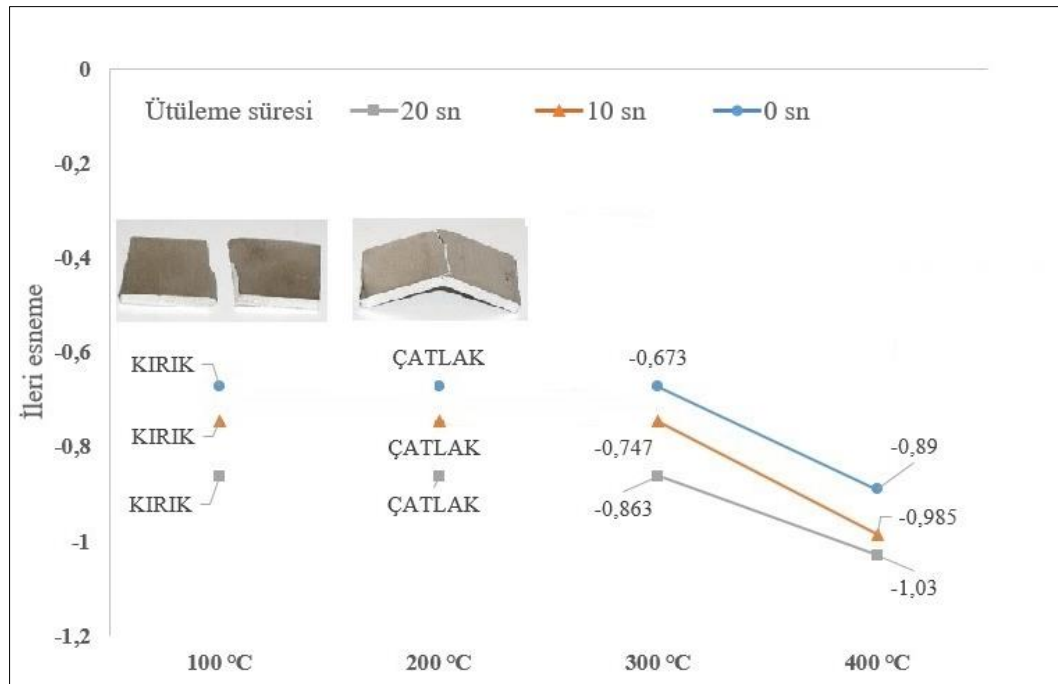
Şekil 5.27. Al7075-T6 30° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



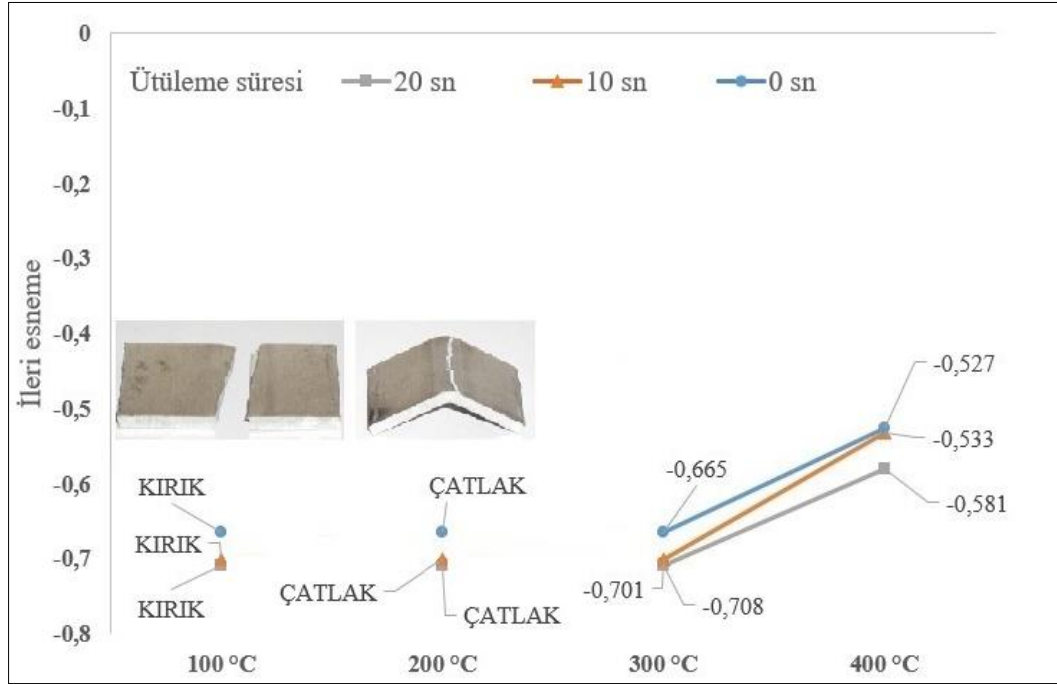
Şekil 5.28. Al7075-T6 45° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



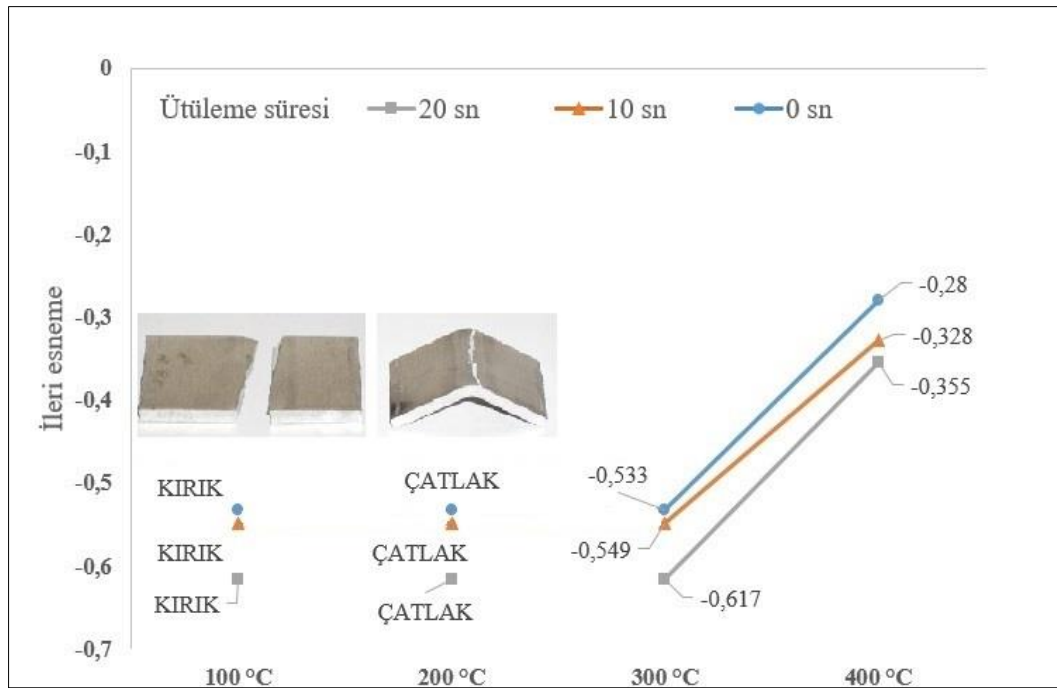
Şekil 5.29. Al7075-T6 45° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



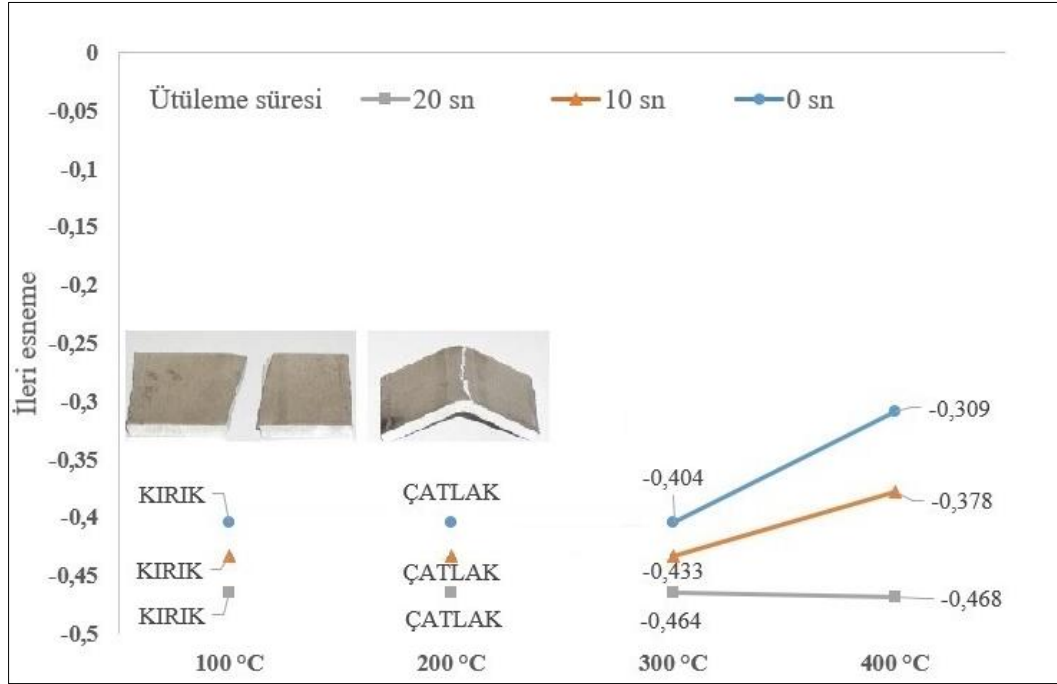
Şekil 5.30. Al7075-T6 45° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



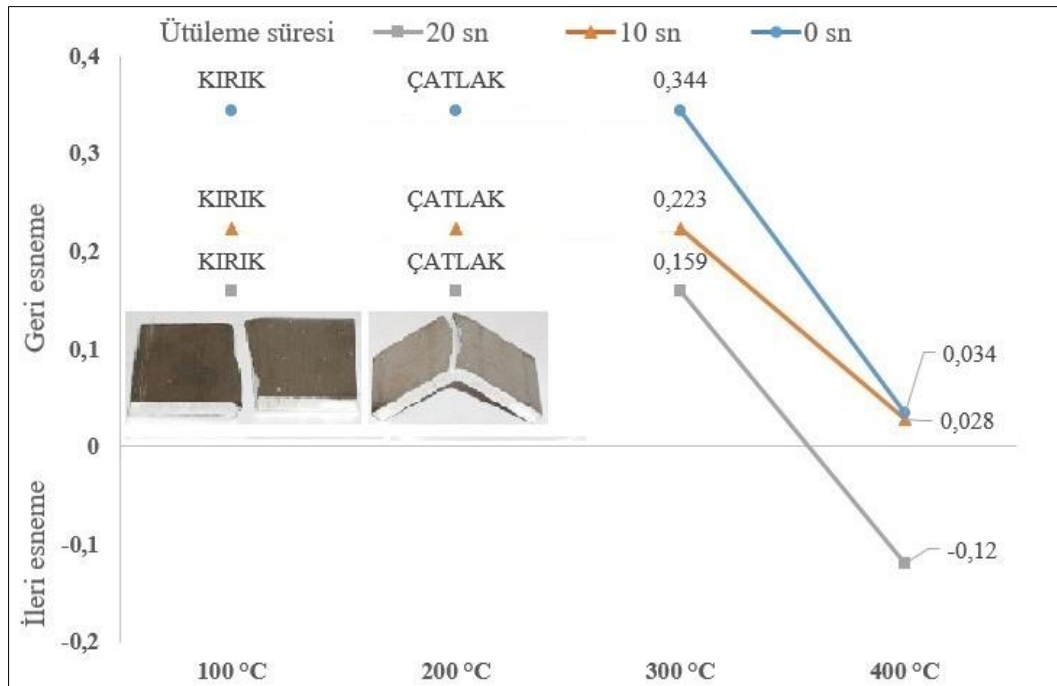
Şekil 5.31. Al7075-T6 60° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



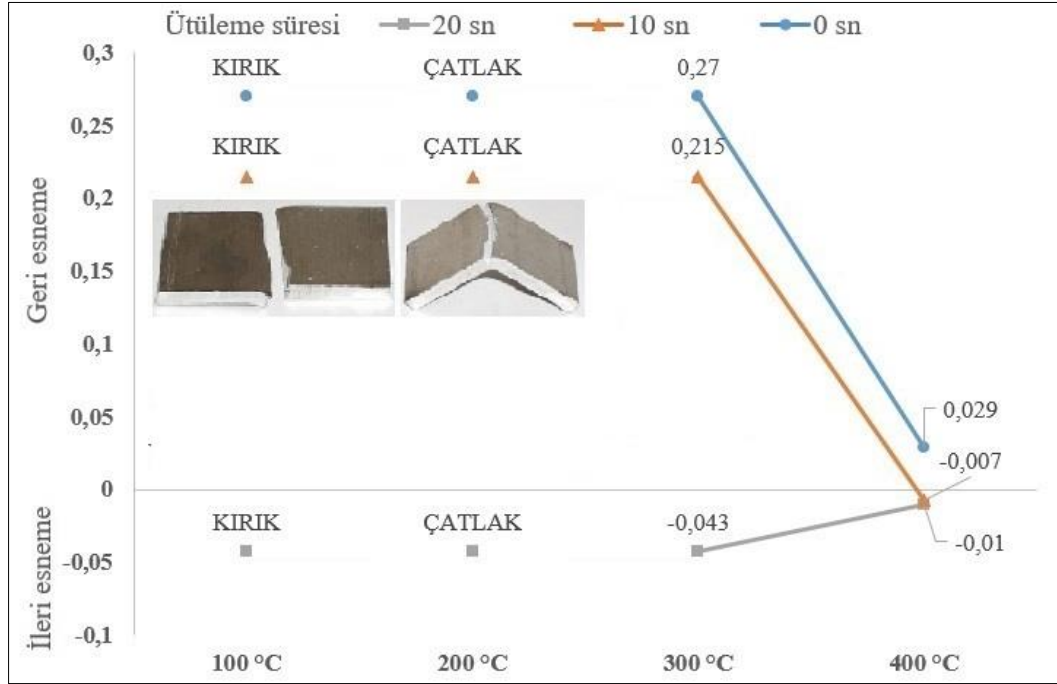
Şekil 5.32. Al7075-T6 60° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



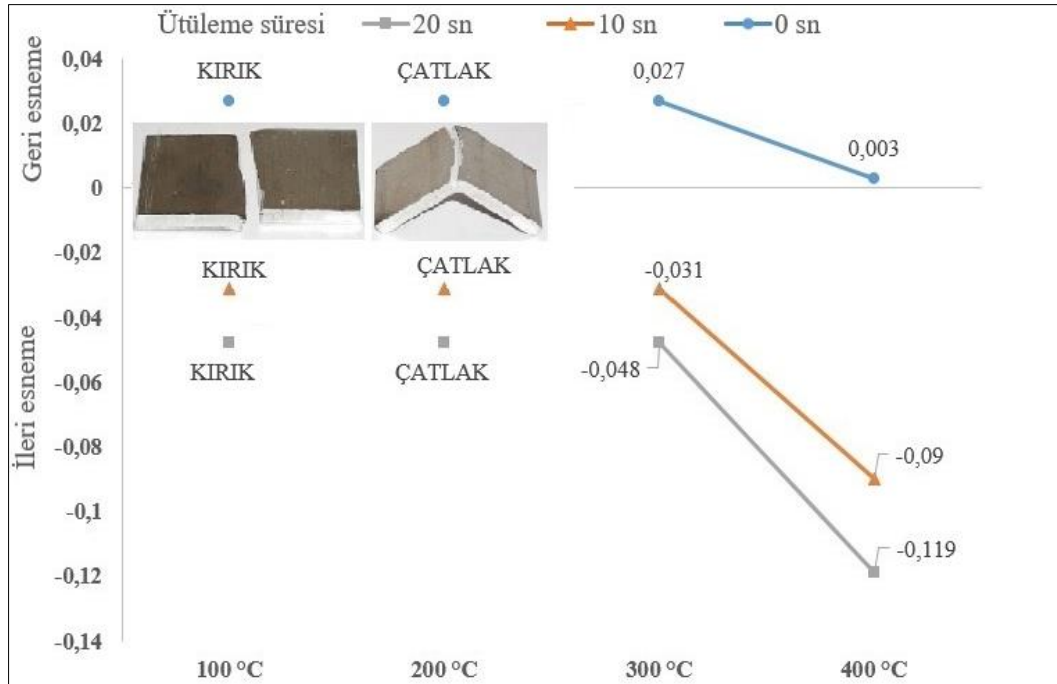
Şekil 5.33. Al7075-T6 60° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



Şekil 5.34. Al7075-T6 75° kalıp açısı 6 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



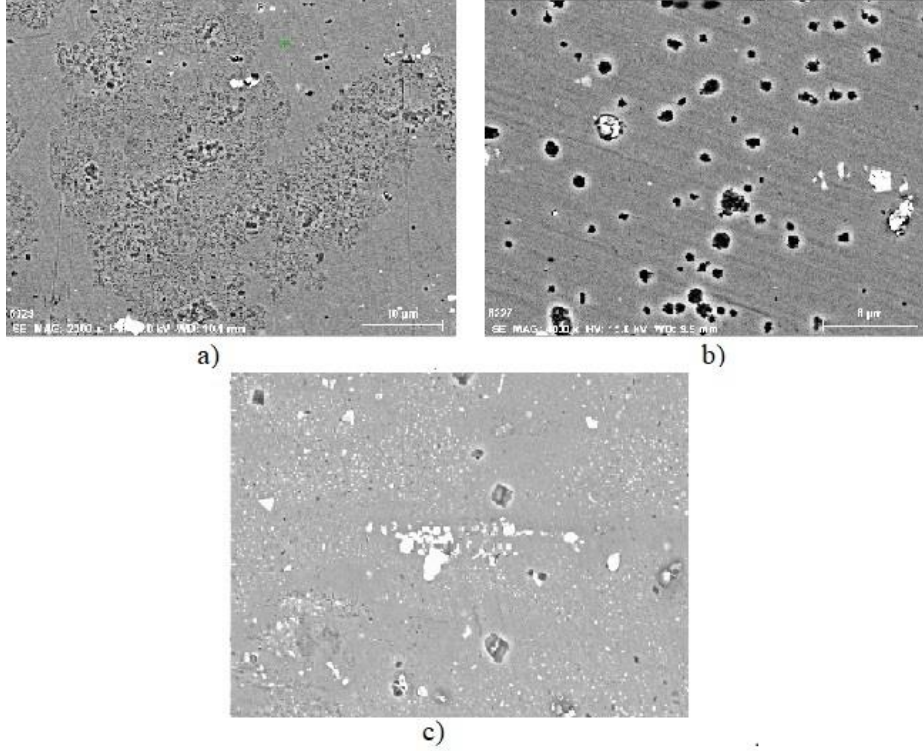
Şekil 5.35. Al7075-T6 75° kalıp açısı 30 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi



Şekil 5.36. Al7075-T6 75° kalıp açısı 60 dk tavlama süresinde sıcaklık – esneme ilişkisi

Şekil 5.37' de de A7075-T6 alüminyum alaşımının tavlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler verilmiştir. Deneysel çalışma kapsamında gerçekleştirilen tavlama prosesi sonucunda, Al7075-T6 alaşımı numunelerin mikro yapısında çökelme sertleşmesi mekanizması gerçekleşmiş ve farklı sıcaklıklarda ve

sürelerde gerçekleştirilen tavlama işlemlerinde yüksek sertlik değerlerine sahip çökelti fazlarının oluştuğu görülmüştür.



Şekil 5.37. Al7075-T6 alüminyum alaşımının tavlama sıcaklığına ve zamanına bağlı olarak mikro yapısındaki değişimler a) RT b) 200°C 60 dk c) 400°C 60 dk

Farklı sıcaklık ve sürelerde gerçekleştirilen işlemler sonucunda kimyasal bileşimden bağımsız olarak tavlama işleminin gerçekleştirildiği sıcaklığın artmasına bağlı olarak çökelti sayısının ve boyutunun arttığı görülmektedir. Oluşan çökeltelerin mekanik özellikler üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla gerçekleştirilen sertlik ölçümleri sonucunda, ölçülen sertlik değerlerinde 200°C' de 60 dk'ya kadar düzenli bir azalış gözlemlenirken, bu sıcaklıktan sonra ani bir azalma meydana geldiği tespit edilmiştir. Bunun nedeni, tavlama etkisiyle oluşan çökeltelerin matris alüminyum fazının kristal kafesi ile bağdaşık olması olarak açıklanabilmektedir. 300°C ve 400°C sıcaklıklarda farklı sürelerde gerçekleştirilen tavlama işlemi sonucunda çökeltelerin boyutlarının ve sayısının artması mekanik özellikleri olumsuz yönde etkilemiş olduğu, ölçülen sertlik değerlerindeki azalma ile görülmektedir. 200°C tavlama sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda tavlanoarak şekillendirilen Al7075-T6 numunelerinde ölçülen geri esneme davranışının malzemenin sertlik değerlerindeki azalma sebebiyle ileri esneme davranışı gösterdiği tespit edilmiştir.

6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, farklı sıcaklık ve sürelerde fırında ısıtılarak tavlanan Al2024-T3 ve Al7075-T6 alüminyum sac malzemelerin farklı işlem parametrelerinde V bükme ile şekillendirilebilirlikleri ve şekillendirme sonucu geri esneme davranışları deneysel olarak araştırılmıştır. Deneysel çalışmalarda, tavlama sıcaklığı, tavlama süresi, kalıp açısı ve ütüleme süresi deney parametreleri olarak belirlenmiştir. Deneysel çalışmalar bilgisayar kontrollü, deney parametrelerinin dijital olarak ayarlanabildiği ve verilerin bilgisayar ortamında okunabildiği deney cihazında gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışma sonunda şekillendirilen parçaların açıları CMM ile ölçülmüş, ölçülen açılar kalıp açısından çıkarılarak esneme açısı değerleri elde edilmiştir. Deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- 1) Al2024-T3 ve Al7075-T6 malzemelerinin her ikisinin de sıcaklığa karşı duyarlı olduğu gözlemlenmiştir. Sıcaklığın artmasına bağlı olarak, tane sınırlarının ergimesiyle mukavemet ve mekanik özelliklerde azalma gözlemlenirken, şekillendirilebilirlikte belirgin bir artış gözlemlenmiştir.
- 2) Al2024-T3 malzemenin RT’de sertliği ortalama 141 HV iken, 400°C sıcaklıkta 60 dk tavlama mekanik özelliklerdeki düşmeden dolayı sertliğin ortalama 61,83 HV’ye azaldığı tespit edilmiştir.
- 3) Al7075-T6 malzemenin RT’de sertliği ortalama 200,67 HV iken, 400°C sıcaklıkta 60 dk tavlama sonrasında sertlik değeri ortalama 62,90 HV’ye azalmıştır.
- 4) Al2024-T3 alüminyum alaşımı RT koşullarında 15°-30° ve 45°’lik kalıp açılarında V bükme ile şekillendirilebilirken, 60° ve 75°’lik kalıp açılarında büküm bölgesinden numunelerin çatladığı ve kalıp açısının artmasıyla da çatlak boyutunun büyüdüğü gözlemlenmiştir. Bu durum malzemenin RT’de sertliğinin yüksek olmasından kaynaklanmaktadır.
- 5) Al7075-T6 alüminyum alaşımı RT koşullarında sadece 15°’lik kalıp açısında V bükme ile şekillendirilebilirken, 30°’lik kalıp açısında büküm bölgesinde çatlak oluştuğu, 45°, 60° ve 75°’lik kalıp açılarında ise numunelerin büküm bölgesinden kırıldığı tespit edilmiştir.
- 6) Her iki alüminyum malzeme tipinde, tavlama sıcaklığının artmasıyla ortalama sertlik ve mukavemet değerinin düştüğü, buna bağlı olarak geri esneme miktarının azaldığı tespit

edilmiştir. Sertlik ve mukavemet değerinin düşmesine bağlı olarak sac malzemelerde ileri esneme davranışının arttığı gözlemlenmiştir.

- 7) Ütüleme süresinin artması, elastik gerilmelerin azalmasına kalıcı gerilmelerin artmasına neden olmaktadır. Bu durum, şekillendirilen parçalarda geri esneme açısında azalmaya sebep olmaktadır. Ütüleme süresinin 10 sn artmasına bağlı olarak geri esneme açısının Al2024-T3 malzemedede ortalama $0,067^\circ$ azaldığı, Al7075-T6 malzemedede ise ortalama $0,055^\circ$ azaldığı tespit edilmiştir.
- 8) Tavlama sıcaklığı ve tavlama süresi parametrelerine göre şekillendirilebilirliğin bükme açısına en yakın olduğu değer Al2024-T3 için 400°C tavlama sıcaklığı 6 dk tavlama süresi, Al7075-T6 için de 400°C tavlama sıcaklığı 30 dk tavlama süresi olarak belirlenmiştir.
- 9) Al2024-T3 malzemesinin 200°C sıcaklığa kadar geri esneme açısında anlamlı bir değişim gözlemlenememiştir. Bu durum sertlik değerleri ölçümlerinin birbirine çok yakın olması ve mikroyapıda bir değişim olmaması ile de gözlemlenebilmektedir.
- 10) Tavlama sıcaklığında bekleme süresindeki artış tane büyümesine, difüzyonun artmasına ve renk dönüşümüne neden olmaktadır. Deneysel çalışmalarda, estetik açıdan problem oluşturabilecek düzeyde artan renk değişimleri gözlemlenmiştir. Bu durumun şekillendirilecek parçalarda estetik problemlere sebep olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

1. Öksüz, K. E., Bağirov, H., Şimşir, M., Karpuzoğlu, C., Özbölük, A., Demirhan, Y. Z., and Bilgin, H. U. (2013). Investigation of mechanical properties and microstructure of AA2024 and AA7075. *Applied Mechanics and Materials*, 390, 547-55.
2. Vallellano, C., Morales, D., and García-Lomas, F. J. (2008). A study to predict failure in biaxially stretched sheets of aluminum alloy 2024-T3. *Materials and Manufacturing Processes*, 23, 303–310.
3. Wang, H., Luo Y. B., Friedman P., Chen M. H., and Gao L. (2012). Warm forming behavior of high strength aluminum alloy AA7075. *Transactions Nonferrous Metals Society China*, 22, 1-7.
4. Wang H., Ye F., Chen L., and Li E. (2017). Sheet metal forming optimization by using surrogate modeling techniques. *Chinese Journal Of Mechanical Engineering*, 30(1), 22-36.
5. Ötü R. (2012). *V bükme kalıplarında alüminyum alaşımlı sacların şekillendirilmesi ve geri esneme miktarlarının tespiti*, Yüksek Lisans Tezi, Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.
6. Şen, M., Yıldırım E., Çebi, H., ve Özdemir, C. (2015). Çift fazlı çeliklerden üretilen otomotiv sac parçalarının dizaynında geri esnemeyi optimize edebilmek için sac kalınlığına bağlı olarak büküm radyüslerinin belirlenmesi. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 12(2), 75-95.
7. Zhang, D. J., Cui, Z. S., Chen, Z. Y., and Ruan, X. Y. (2007). An analytical model for predicting sheet springback after V-bending. *Journal of Zhejiang University Science A*, 8(2), 237-244.
8. Hatipoğlu, H. A., ve Alkaş C. O. (2016). Process modelling and die design concepts for forming aircraft sheet parts. *Journal of Physics: Conference Series*, 734, 1-4.
9. Tiryakioğlu, M. F. (2013). *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.
10. Mohammadia, A., Vanhovea, H., Baelb, H. A., and Dufloua, J. R. (2012). Bending properties of locally laser heat treated AA2024-T3 aluminium alloy. *Physics Procedia*, 39, 257 – 264.

11. Nguyen, V. T., Thomson P. F., and Chen Z. (2014). Prediction of springback in anisotropic sheet metals: The effect of orientation and friction. *Proc IMechE Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 1-8.
12. Chen, L., Chen, H., Guo, W., Chen, G., and Wang Q. (2014). Experimental and simulation studies of springback in rubber forming using aluminium sheet straight flanging process. *Materials and Design*, 54, 354–360.
13. Chen, G., Chen, M., Wang, N., and Sun, J. (2016). Hot forming process with synchronous cooling for AA2024 aluminum alloy and its application. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, 133–139.
14. Gisario, A., Barletta, M., and Venettacci, S. (2016). Improvements in springback control by external force laser-assisted sheet bending of titanium and aluminum alloys. *Optics & Laser Technology*, 86, 46–53.
15. Leacock, A., Ling, D., and Bergkvist, M. (2016). Industrial application and validation of forming simulation in the flexforming process. *Journal of Physics: Conference Series* 734, 601-604.
16. Jeshvaghania, R. A., Zohdia, H., Shahverdia, H. R., Bozorga, M., and Hadavi, S. M. M. (2012). Influence of multi-step heat treatments in creep age forming of 7075 aluminum alloy: Optimization for springback, strength and exfoliation corrosion. *Materials Characterization*, 73, 8–15.
17. Kumar, M. (2017). AW-7075-T6 sheet for shock heat treatment forming process. *Transactions Nonferrous Metals Society China*, 27, 2156–2162.
18. Polak, S., Kaczynski, P., Gronostajski, Z., Jaskiewicz, K., Krawczyk J., Skwarski, M., Zwierzchowski, M., and Chorzepa, W. (2017). Warm forming of 7075 aluminum alloys. *Procedia Engineering* 207, 2399–2404.
19. Erdin, M. E., ve Atmaca, A. (2016). Effects of holding force on the springback behavior of annealed aluminum plates. *Procedia Engineering*, 149, 56 – 61.
20. Yilamu, K., Hino, R., Hamasaki, H., and Yoshida, F. (2010). Air bending and springback of stainless steel clad aluminum sheet. *Journal of Materials Processing Technology*, 210, 272–278.
21. Parsa, M. H., Mohammadi, S. V., and Aghchai, A. J. (2014). Al3105/polypropylene/Al3105 laminates springback in V-die bending. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, 849–860.

22. Ötü, R., ve Demirci, H. İ. (2013). Farklı bükme yöntemleri uygulanarak V bükme kalıplarında AA5754-O sac malzeme ile elde edilen numunelerin geri esneme miktarının tespiti. *Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 10(3), 27-42.
23. Sarıkaya, O. T. (2008). *Analysis of heat treatment effect on springback in V-bending*, Yüksek Lisans Tezi, Orta Doğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
24. Moon, Y. H., Kang, S. S., Cho, J. R., and Kim, T. G. (2003). Effect of tool temperature on the reduction of the springback of aluminum sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 132, 365–368.
25. Choudhury, I. A., and Ghomi, V. (2014). Springback reduction of aluminum sheet in V-bending dies. *Proc IMechE Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(8) 917–926.
26. Öztürk, F., Toros, S., Ece, R. E., ve Esener, E. (2009). 5083-H111 alaşımında ön gerilmenin geri esnemeye etkilerinin incelenmesi. 4. *Alüminyum Sempozyumu, İstanbul*.
27. Tekaslan, Ö., Şeker, U., ve Gerger, N. (2007). Bükme kalıplarında 0,75 mm kalınlığındaki çelik sac malzemenin geri esneme miktarlarının belirlenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(1), 15-22.
28. Anık, S., Dikicioğlu, A., ve Vural, M. (2000). *İmal Usulleri*. Türkiye: Birsan Yayınevi, 245.
29. Çiğdem, M., (2006). *İmal Usulleri* (İkinci Baskı). Türkiye: Çağlayan Kitabevi, 157.
30. Gautam, B., Kumar, P., Chandra, V., and Rawat, K. (2016). Analysis of springback variation in v bending. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 5(2), 555-560.
31. Huang, Y. M., and Leus, D. K. (1998). Effects of process variables on V-die bending process of steel sheet. *International Journal of Mechanical Sciences*, 40(7), 631-650.
32. Schuler. (1998). *Metal Forming Handbook*, Germany: Springer
33. Tekaslan, Ö., ve Şeker, U. (2009). Pirinç sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük*.
34. Uzun, İ., ve Erişkin, Y. (1983). *Saç Metal Kalıpçılığı* (Birinci Basılış). Türkiye: Milli Eğitim Basımevi, 264.

35. Şahin, Ç. Ö., (2013). *Sac levhaların V-bükme sonucu geri yaylanma davranışlarının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
36. Ivanišević, A., Milutinović, M., Štrbac, B., and Skakun, P. (2013). Stress state and spring back in V-bending operations. *Journal for Technology of Plasticity*, 39(2), 157-168.
37. Tekaslan, Ö., Gerger, N., ve Şeker, U. (2008). V bükme kalıplarında bakır sac malzemelerin geri esneme miktarlarının tespiti. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(1), 231-238.
38. Sousa, L. C., Castro, C. F., and Antonio, C. A. C. (2006). Optimal design of V and U bending processes using genetic algorithms. *Journal of Materials Processing Technology*, 172, 35–41.
39. Grizelj, B., Cumın, J., and Grizelj, D. (2010). Effect of Spring-Back and Spring-Forward in V-die Bending of St1403 Sheet Metal Plates. *Strojarstvo*, 52(2), 181-186.
40. Aslan, Y., ve Karaağaç, İ. (2014). V bükmede geri esneme davranışları. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part:C, Tasarım Ve Teknoloji*, 2(3), 255-263.
41. Groover, Mikell P. (2015). *Modern İmalat Prensipleri*, (Çev. Mustafa Yurdakul, Yusuf Tansel İç). Nobel Akademik Yayıncılık, 443.
42. Savaşkan, T. (1999). *Malzeme Bilgisi ve Muayenesi*, Türkiye: Derya Kitabevi, 158, 166.
43. Mısırlı, C. (2011). *5083 kalite alüminyum alaşımlarının homojenize edilerek sertlik değerlerinin ve mikroyapılarının incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
44. Altschuler, Y., Kaatz, T., and Cina, B. (1988). Relief of residual stresses in a high-strength aluminum alloy by cold working. *Mechanical Relaxation of Residual Stresses*, ASTM STP 993, L. Mordfin, Ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 19-29.
45. Sönmez, N., ve Güner, Z. (1989). Alüminyum, magnezyum, titan, çinko ve alaşımlarının ısıtma işlemleri. *Mühendis ve Makine*, 30(351), 8-13.
46. Başer, T. A. (2012). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 53(635), 51-58.
47. Durmuş, H. K., Okur, A., ve Meriç, C. (2003). AA 2014 ve AA 2024 alüminyum alaşımlarında soğutma koşullarının sertliğe etkisinin incelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(1), 9-13.

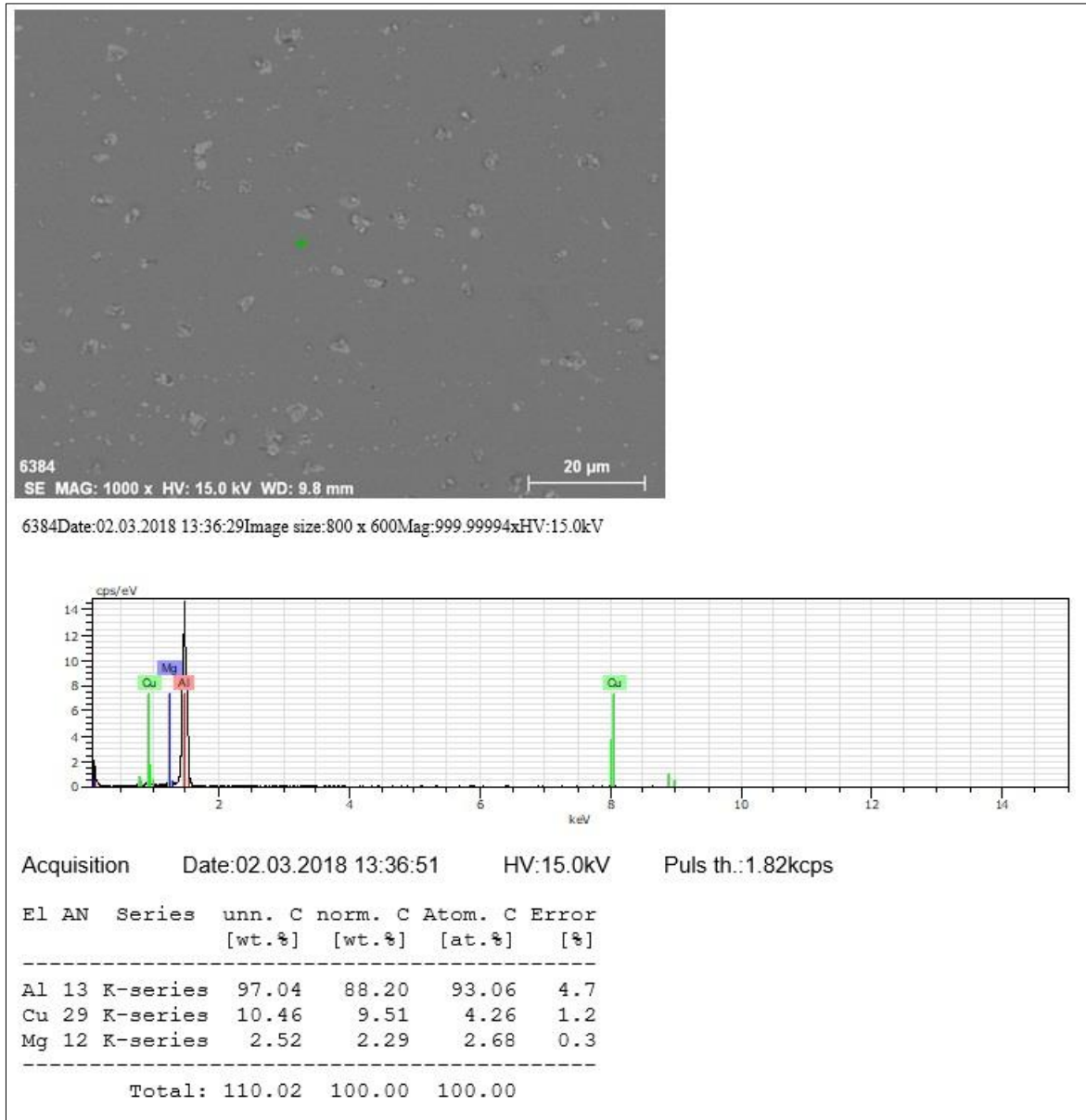
48. Durmuş, H., Akgün, S., ve Şahin, S. (2009). Çökelme sertleştirilmesi uygulanmış aa7012 alüminyum alaşımlarında sertliğin mikroyapı ile değişiminin incelenmesi. 5. *Uluslararası İleri Teknolojiler Sempozyumu (IATS'09), Karabük.*
49. Yurdakul, M., Özbay, O., ve İç, Y. T. (2002). Havacılık alanında kullanılan alüminyum alaşımlarının seçimi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 17(2), 1-23.
50. Aycan, M. F. (2010). *Yaşlandırma ısı işleminin SiC ve Al₂O₃ parçacık takviyeli alüminyum alaşımı esaslı kompozit malzemelerin mekanik özelliklerine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
51. Çicek, B., Topuz, P., Aydoğmuş, T., ve Sun, Y. (2015). Magnezyum matrisli parçacık takviyeli kompozit malzemelerde yapay yaşlandırma ısı işleminin sertlik ve mikroyapı üzerine etkisi. *Uluslararası Katılımlı III. Ege Kompozit Malzemeler Sempozyumu, Kuşadası.*
52. Erkal, S. (2011). *AA2024 alüminyum alaşımlarında yaşlandırma ısı işlemlerinin mekanik özelliklere ve işlenebilirliğe etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
53. Dilmeç, M., Tınkır, M., ve Arıkan, H. (2015). Al 2024 alaşımının çökelme sertleşmesi işlemi koşullarının şekillendirilebilirliğe etkisinin incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(1), 231-248.
54. Demir, E. (2008). *Alüminyum alaşımlarda ısı işlem etkilerinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
55. Güven, Ş. Y., ve Delikanlı, Y. E. (2012). AA2024 alüminyum alaşımında çökelme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Teknik Bilimler Dergisi*, 2(4), 13-20.
56. Yetiştiren, H. (1993). *2024 alüminyum alaşımında RRA işleminin GKÇ direncine etkilerinin araştırılması*, Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
57. Ayvaz, M., ve Çetinel, H. (2011). Farklı alüminyum alaşımlarının TIG kaynak yöntemi ile kaynatılması ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *C.B.Ü. Fen Bilimleri Dergisi*, 7(1), 39-46.
58. Uzman, İ., ve Şirin, Ş. Y. (1997). Soğuk çekilmiş yüksek frekans induksiyon kaynaklı (YFIK) borularda yeniden kristalleşme davranışı. *Tmmob Makina Mühendisleri Odası Kaynak Teknolojisi 1. Ulusal Kongresi*, 125-136.

59. Humphreys, F.J., and Hatherly, M. (2004). *Recrystallization and Related Annealing Phenomena* (Second Edition). Kidlington, Oxford: ELSEVIER Ltd., 2-3.
60. Kesti, E. (2009). *Ç-4140 çeliğinin, mikro yapı ve mekanik özelliklerine su verme ortamının etkilerinin araştırılması*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
61. Coşar, D. (2014). *8622RH ve 20MnCr5 çeliklerinin aşınma ve mekanik özelliklerine gaz karbürleme işleminin etkisinin incelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir.
62. Aydın, H., Şendeniz, M., ve Demirci, A. H. (2009). Ekstrüzyon öncesi ve sonrası uygulanan ısıtma işlemlerin AA6063 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 14(2), 1-10.
63. Gavgalı, M., ve Çetin, R. (1996). AA2014 alüminyum alaşımı ingotun iç yapısına homojenizasyon sıcaklığının etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 2(1), 41-46.
64. Ece, R. E., ve Öztürk, F. (2010). Elektrik akımı ile ısıtma yönteminin sıcak sac şekillendirme uygulamalarında kullanımının incelenmesi. 2. *Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresi*, Balıkesir.
65. Boljanovic V. (2009). *Metal Shaping Processes: Casting and Molding - Particulate Processing - Deformation Processes - Metal Removal*. (1. edition), New york: Industrial Press, Inc., 120.
66. Kalemtaş, A. (2014). Metal matrisli kompozitlere genel bir bakış. *Putech & Composites*, 22, 18-30.
67. Bagheriasl, R. (2012). *Formability of aluminum alloy sheet at elevated temperature*, Doktora Tezi, University of Waterloo Mechanical Engineering, Waterloo, Ontario, Canada.
68. Dilmeç, M. (2012). *2024-T4 alüminyum sacların şekillendirme sınır eğrilerinin kalınlığa göre değişimi*, Doktora Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
69. Yılmaz, R., Özyürek, D., ve Kibar, E. (2012). Yeniden çözeltiye alma parametrelerinin 7075 alüminyum alaşımlarının sertlik ve aşınma davranışlarına etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(2), 429-438.

70. Sevinç, C. (2002). *Zırhlı muharebe araçlarında kullanılan alüminyum alaşımlarının kaynak edilmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
71. Aydın, H., ve Bayram A. (2010). Farklı ısıtım işlem koşullarındaki 2024 alüminyum alaşımlarının korozyon sonrası mekanik özelliklerindeki kaybın belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 15(1), 159-168.
72. Ilgaz, O. (2014). *Döküm, ekstrüzyon ve dövme işlemlerinin 6082 al alaşımlı dövme süspansiyon parçalarında mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
73. Güler, K., ve Kaçar, R. (2011). Deformasyon yaşlanmasının AA7075 alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisinin incelenmesi. *6th International Advanced Technologies Symposium (IATS'11)*, Elazığ.
74. Karaağaç, İ. (2011). *Sıvı basıncıyla sac metal şekillendirme (Hydroforming) işlem parametrelerinin deneysel olarak araştırılması*, Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
75. Doruk, İ. (2010). *Yivsiz setsiz av ve spor tüfeklerinde kaliteyi artırmak amacıyla kritik parçalarda iyileştirme çalışmaları*, Doktora Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli.

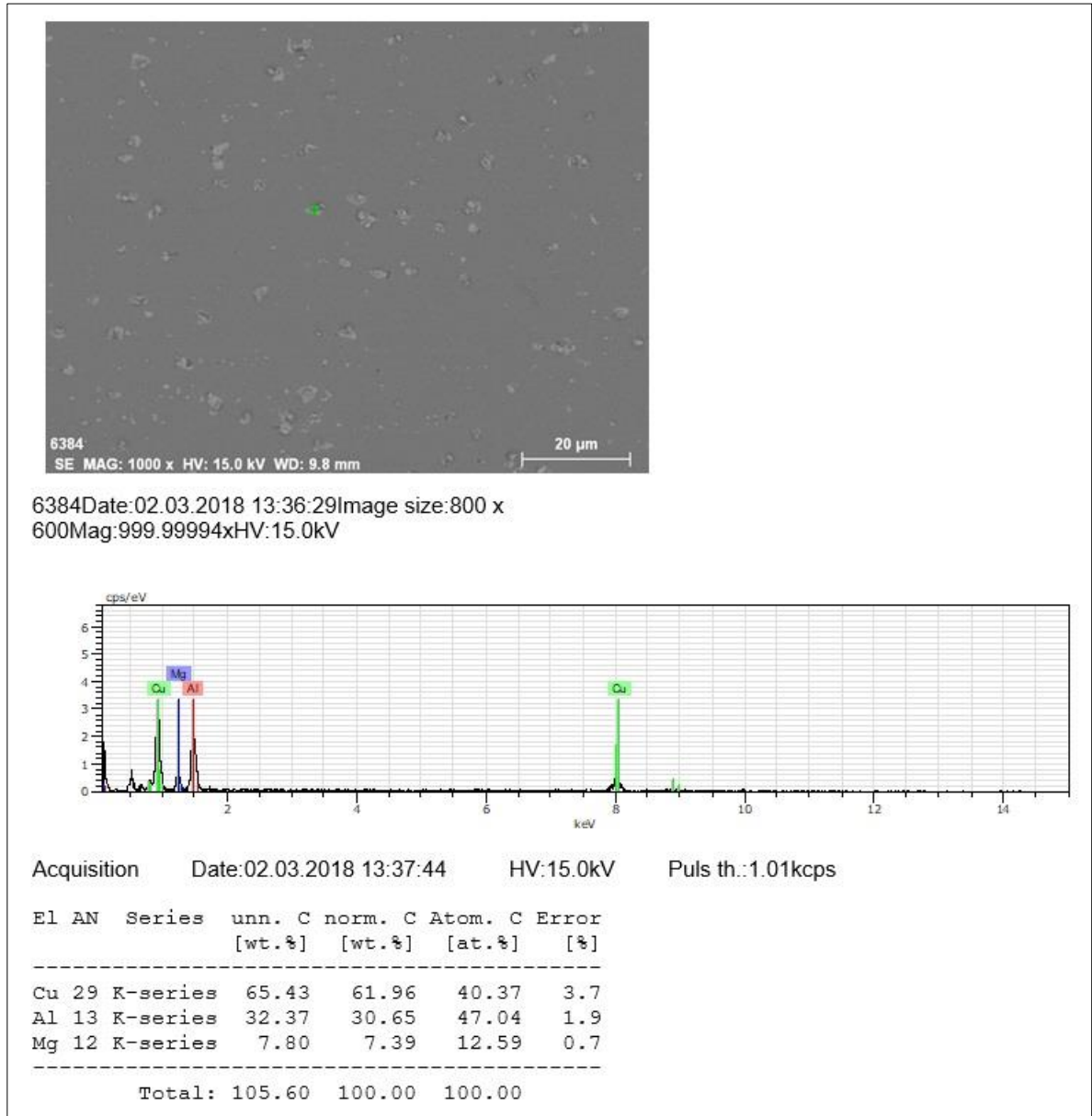
EKLER

EK-1. Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



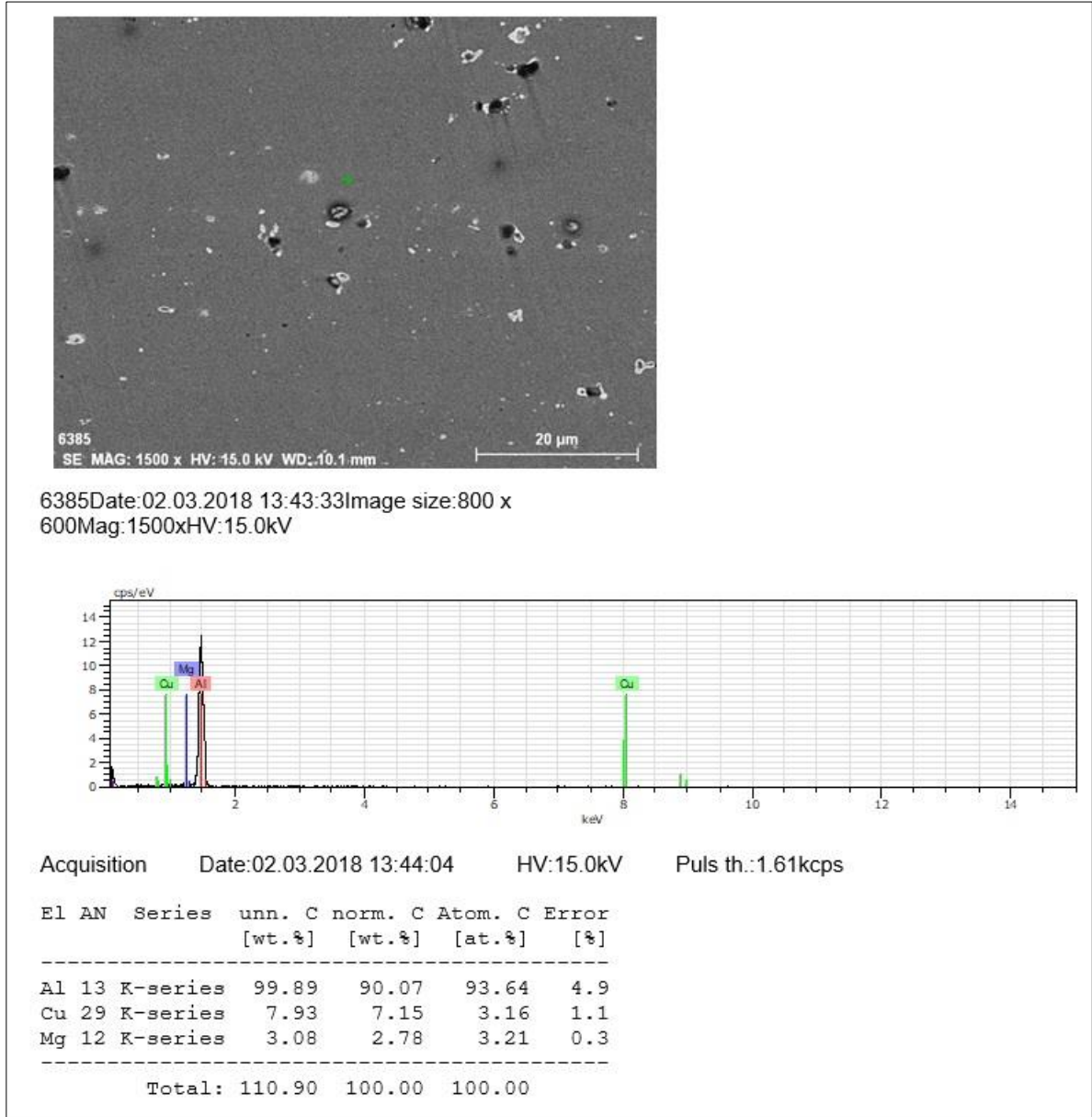
Şekil 1.1. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, RT

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



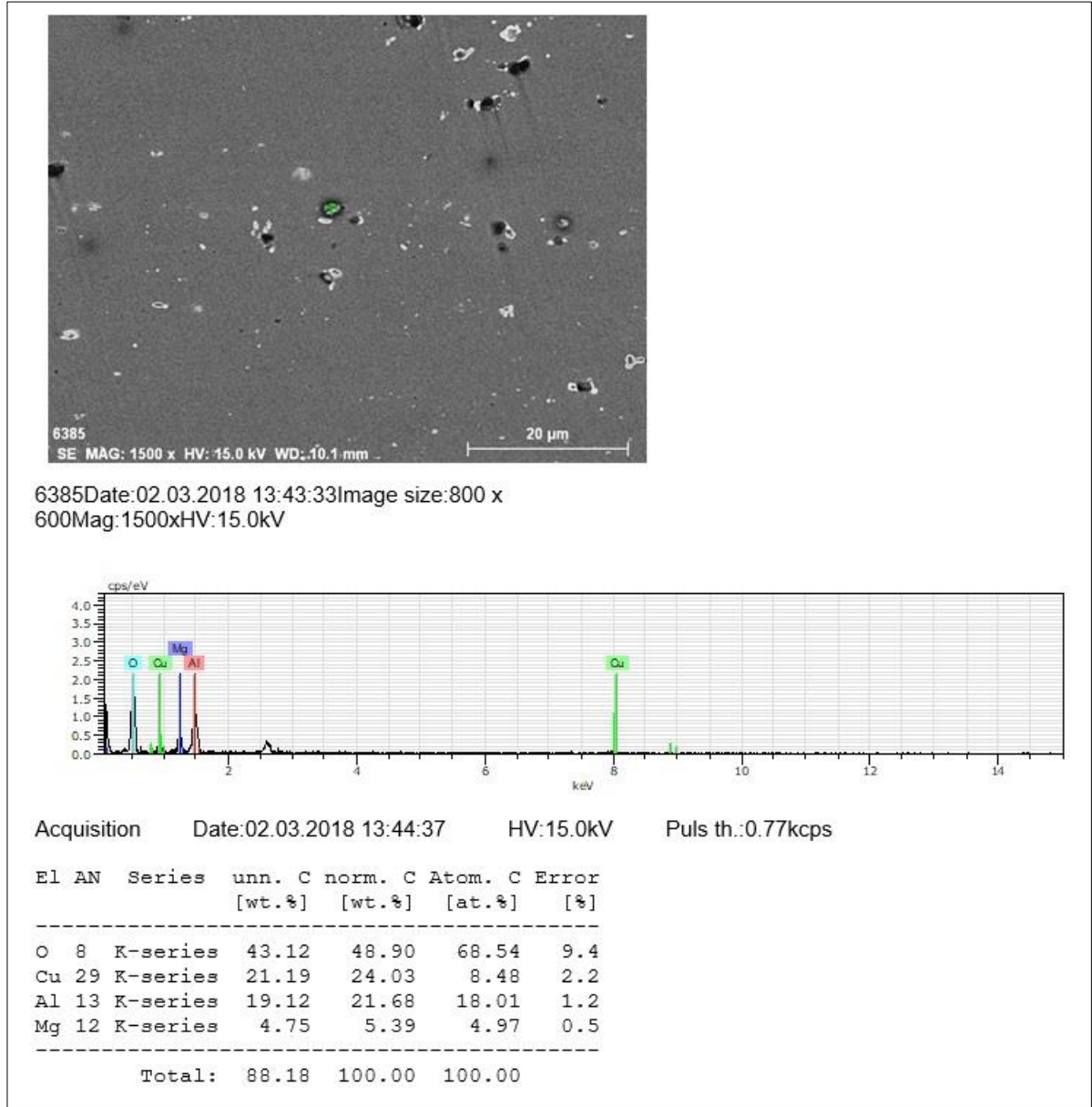
Şekil 1.2. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, RT

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



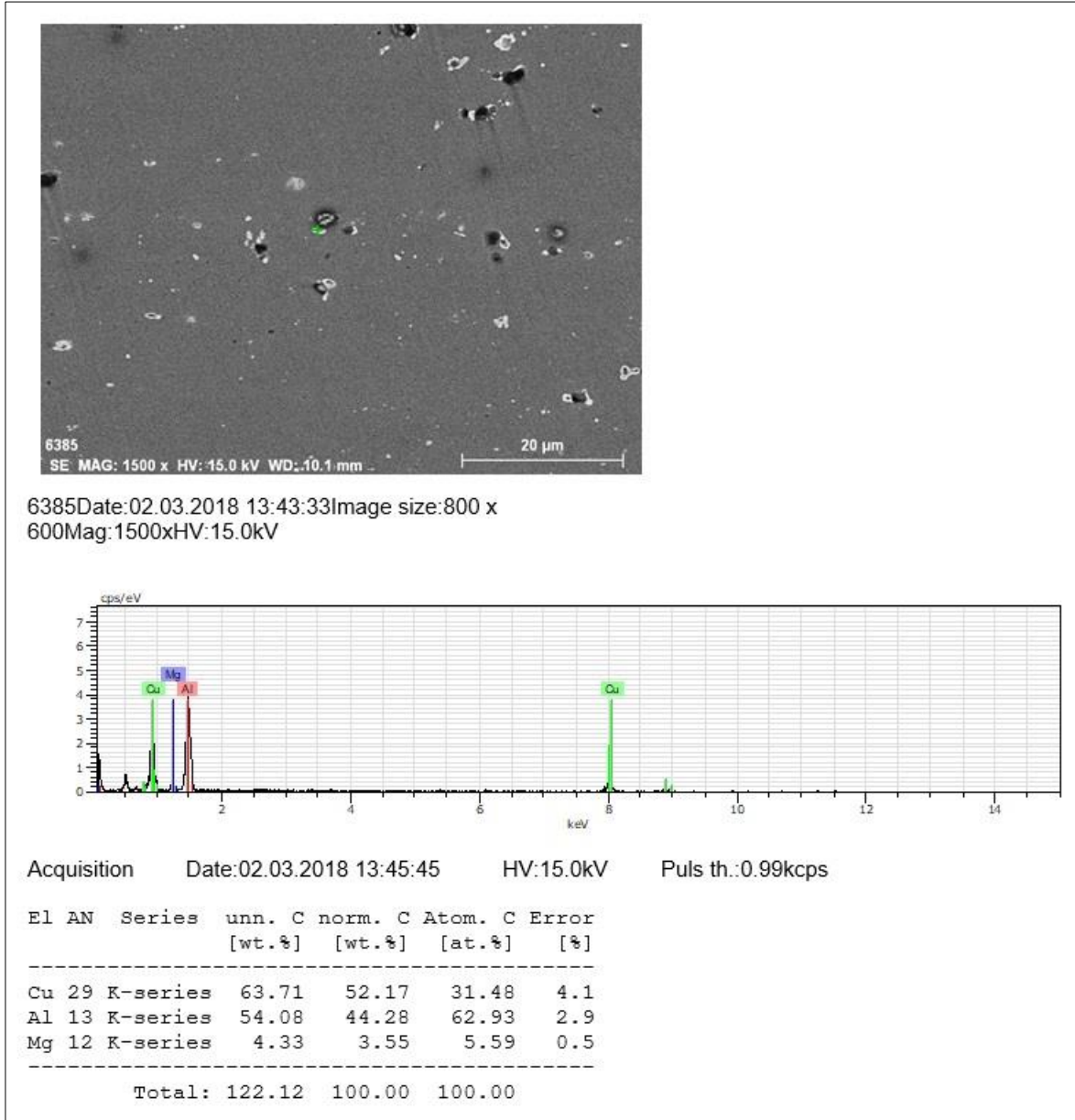
Şekil 1.3. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



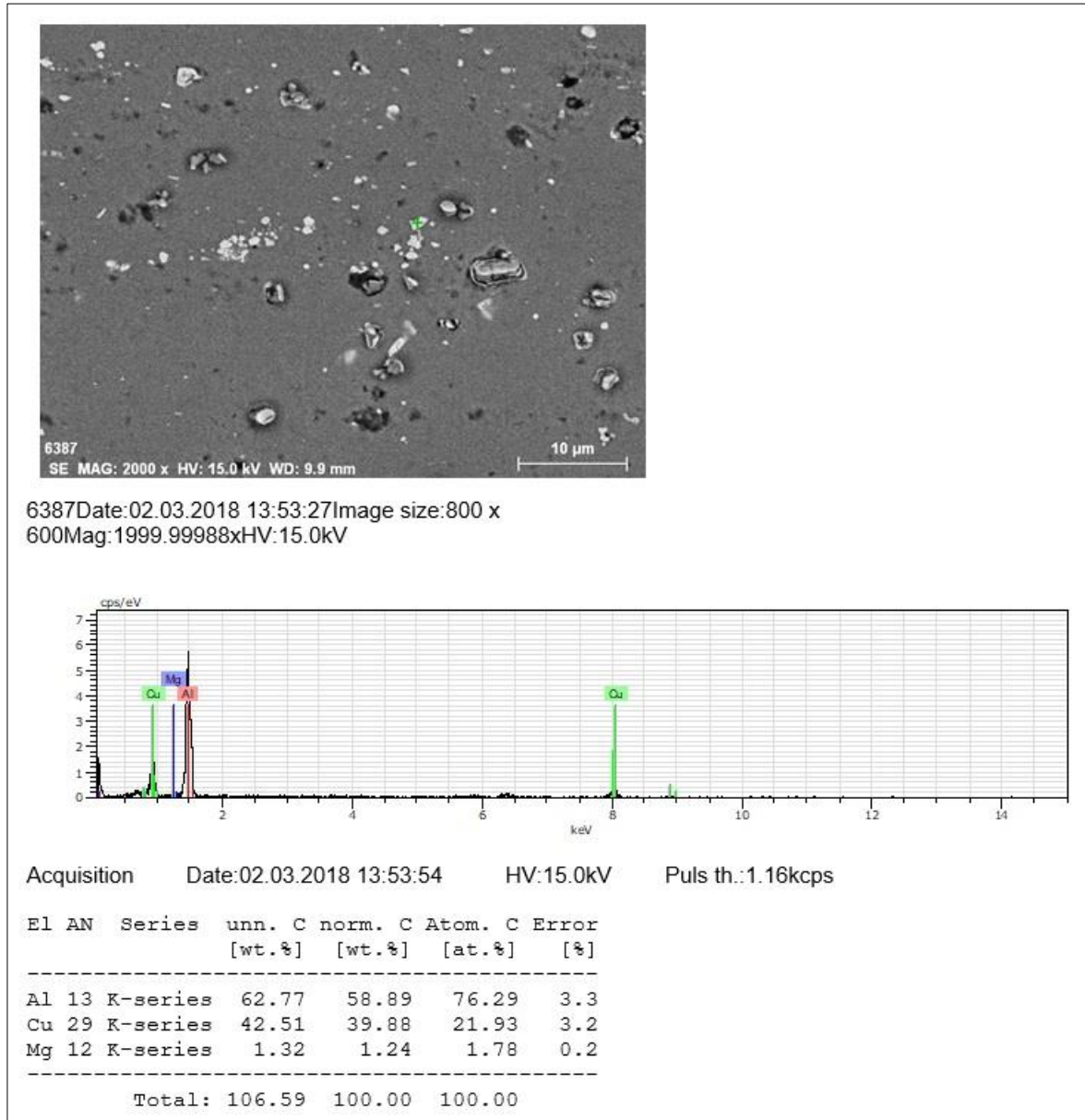
Şekil 1.4. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



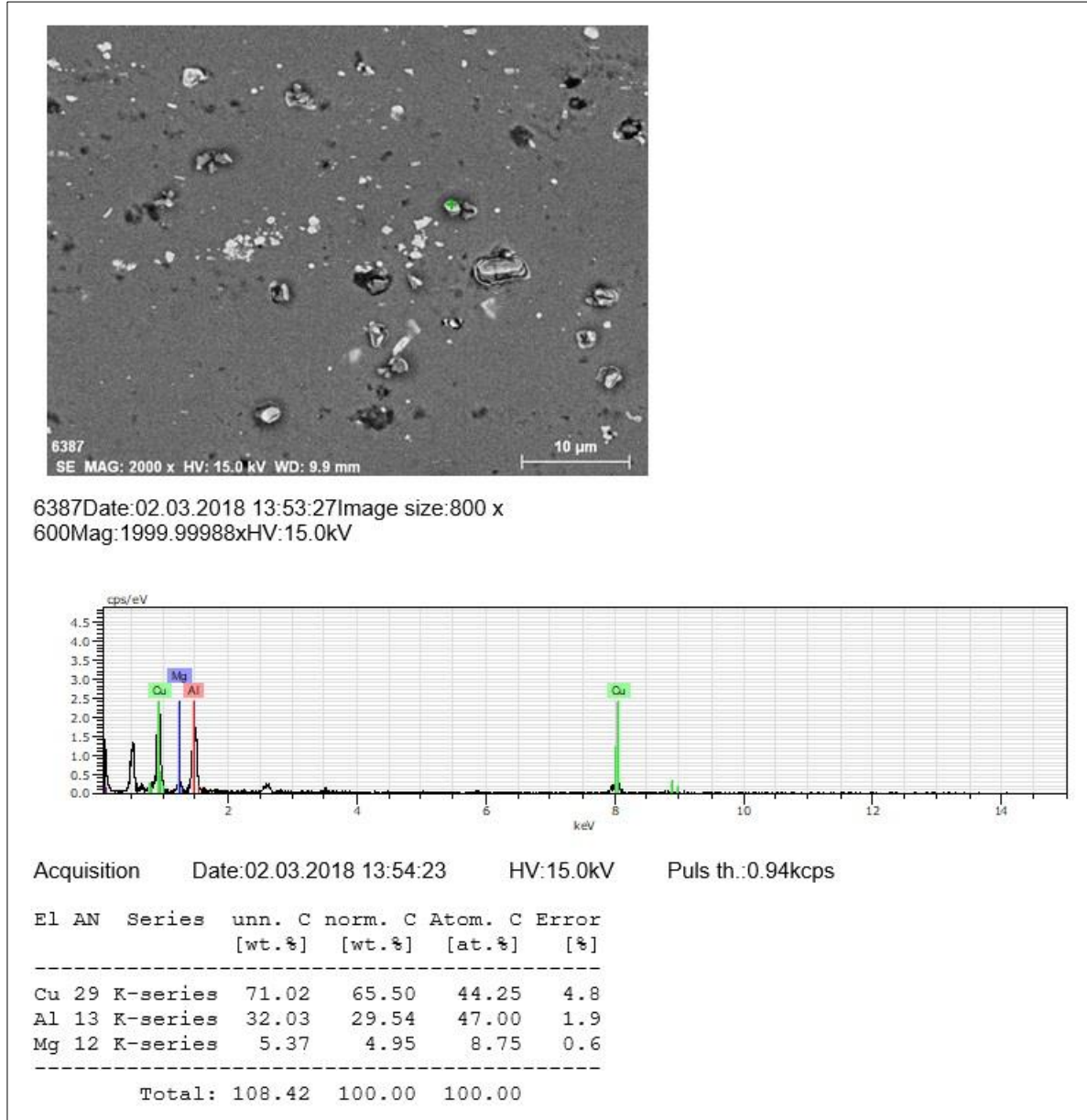
Şekil 1.5. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



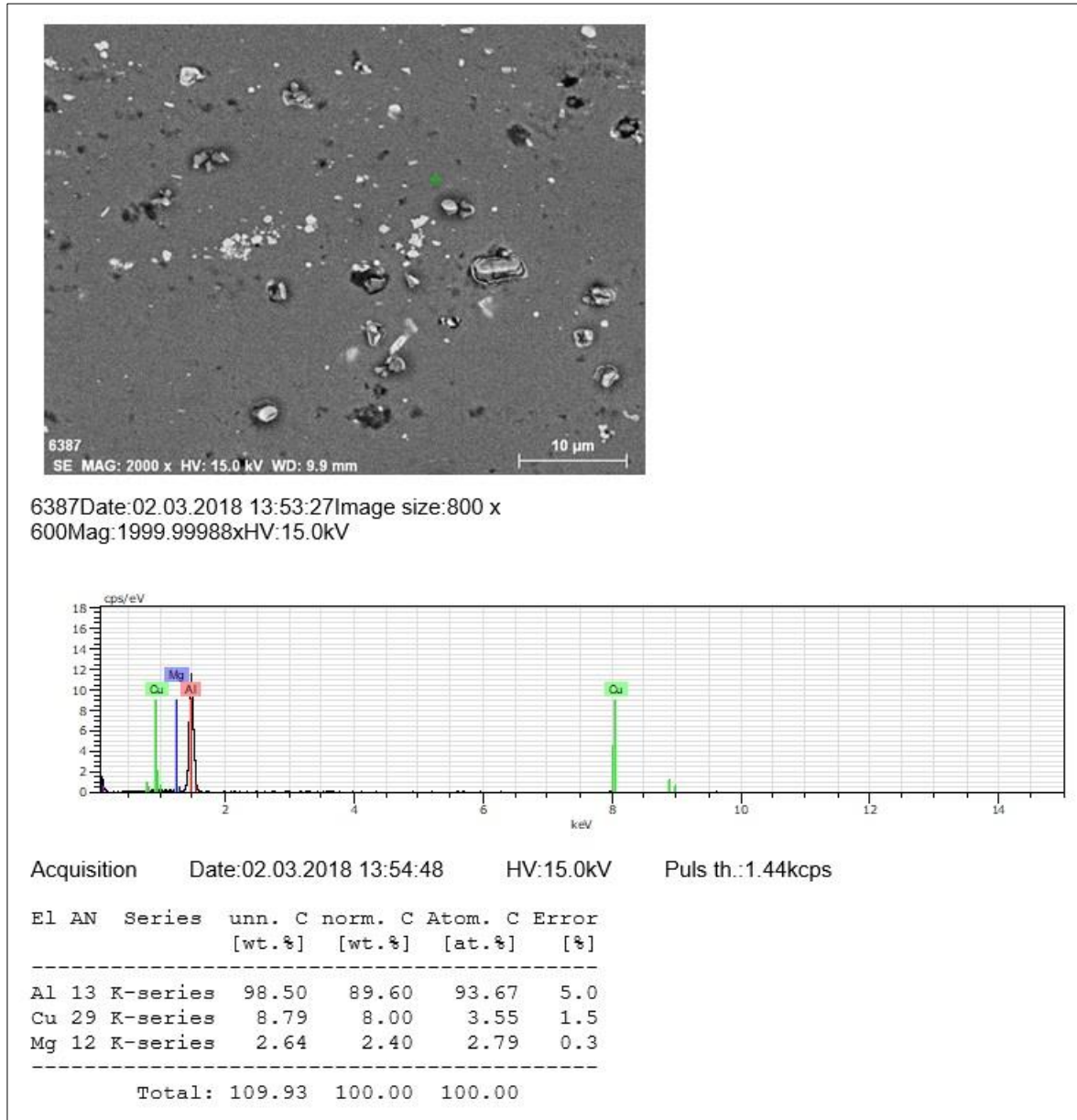
Şekil 1.6. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 300°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



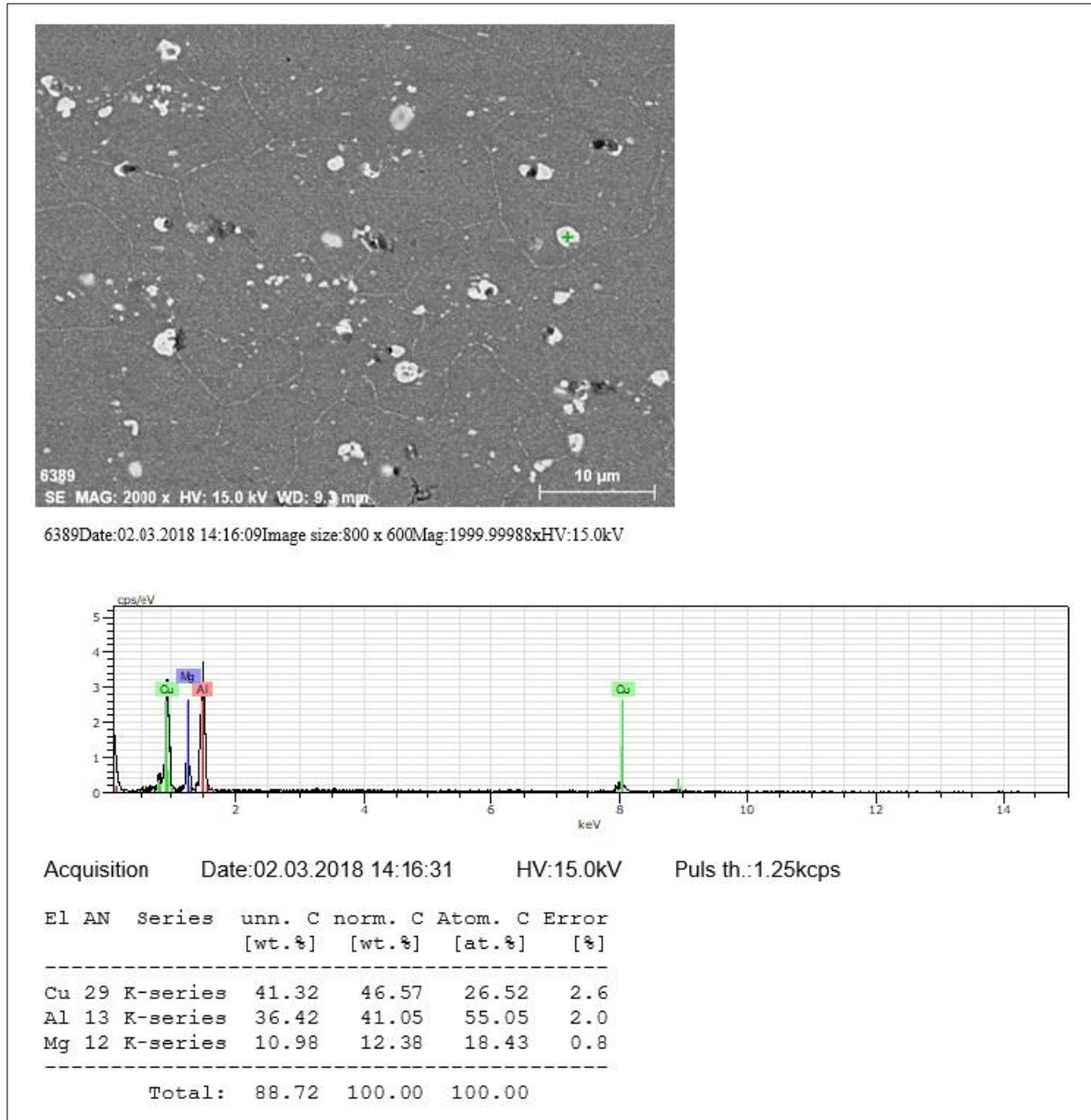
Şekil 1.7. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 300°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



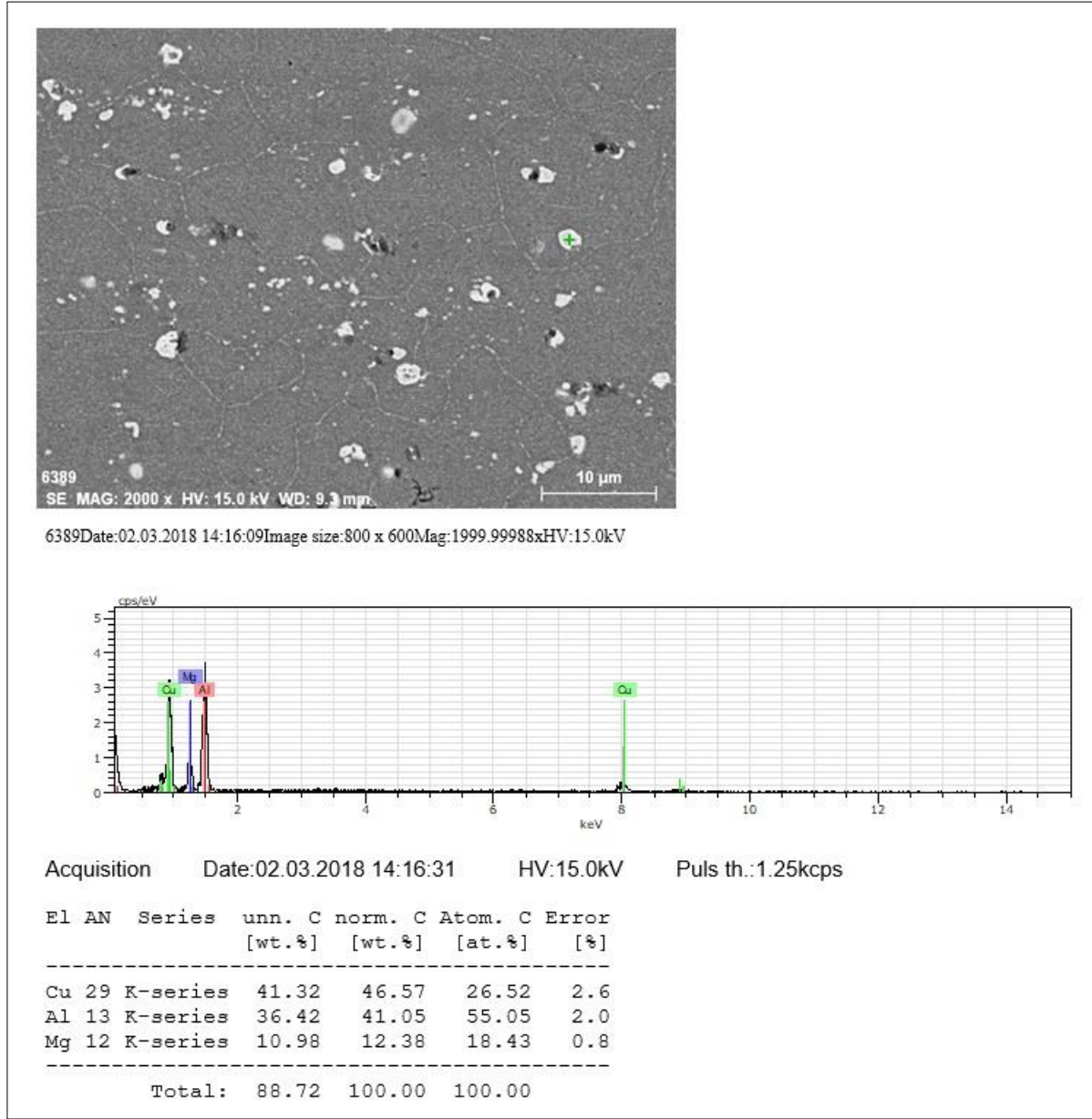
Şekil 1.8. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 300°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



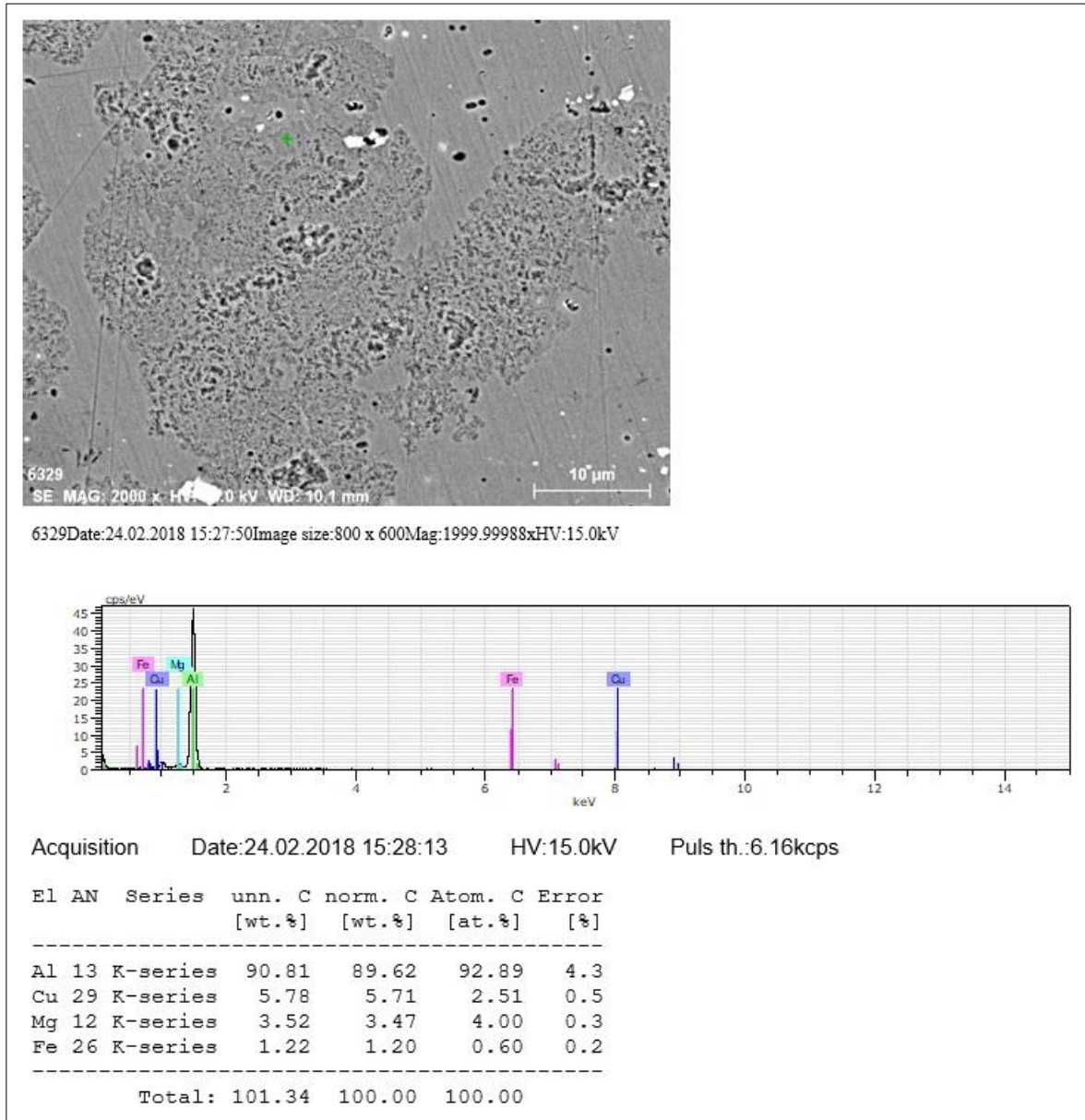
Şekil 1.9. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 400°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



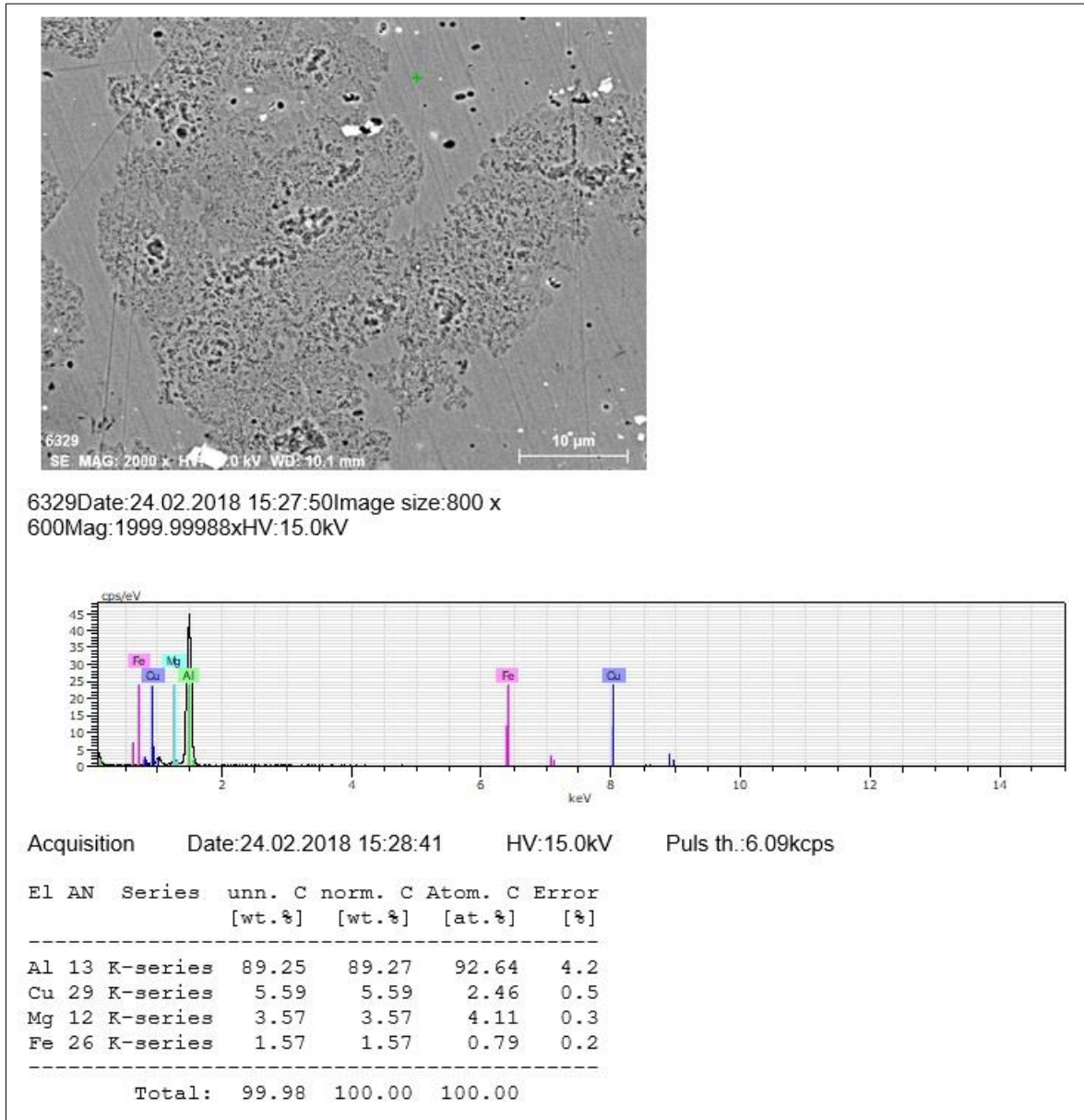
Şekil 1.10. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al2024-T3, 400°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



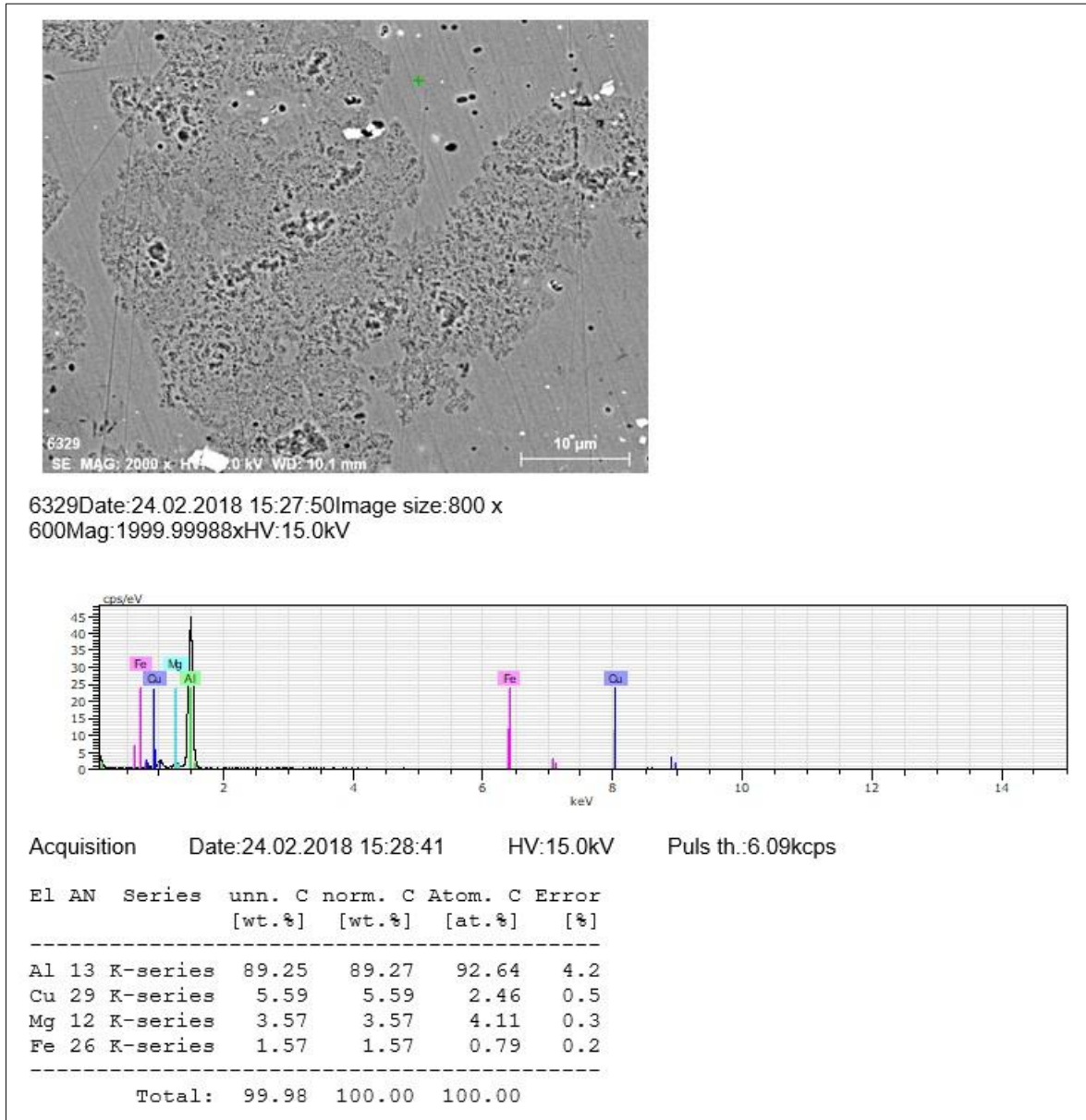
Şekil 1.11. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, RT

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



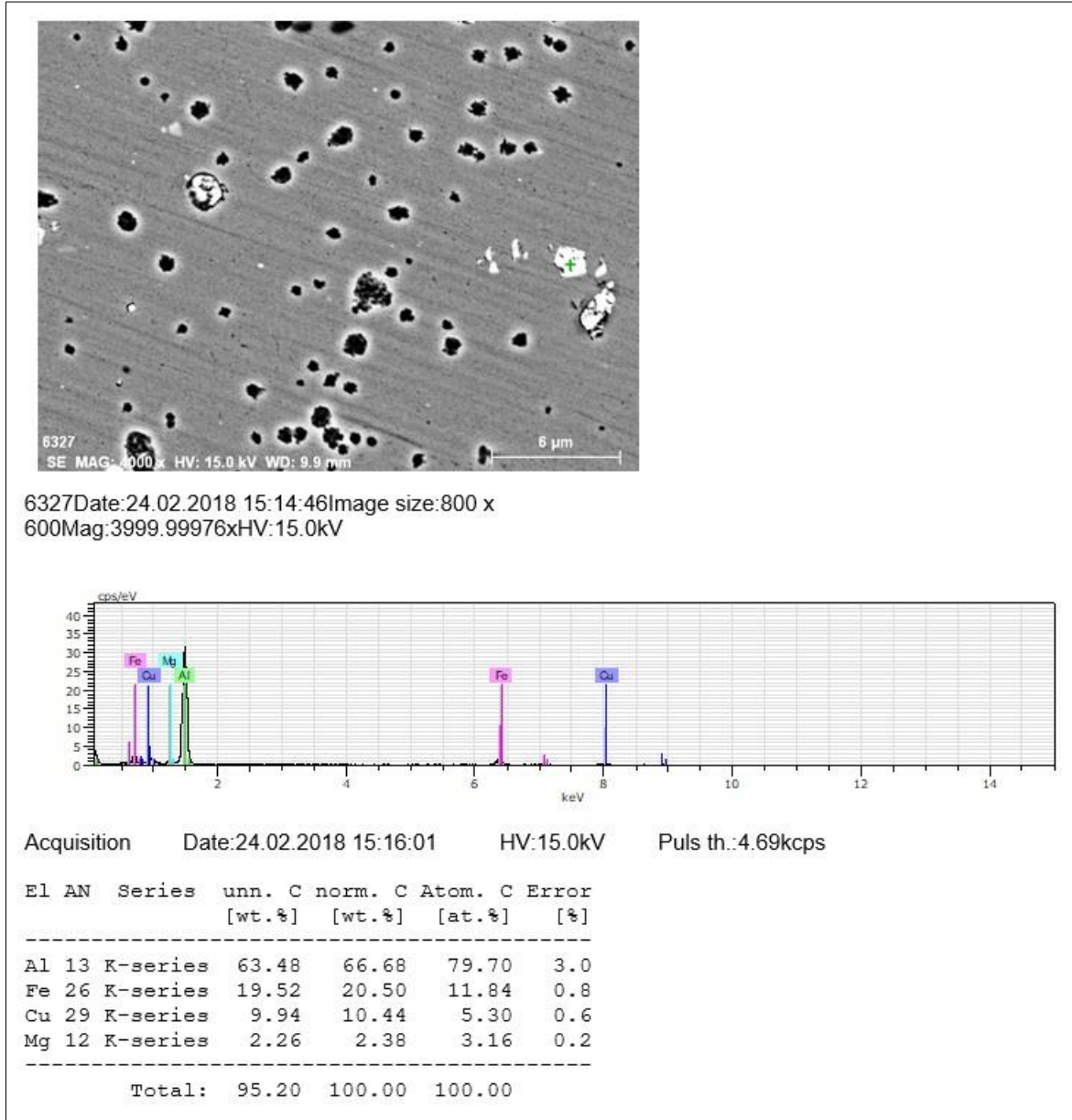
Şekil 1.12. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, RT

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



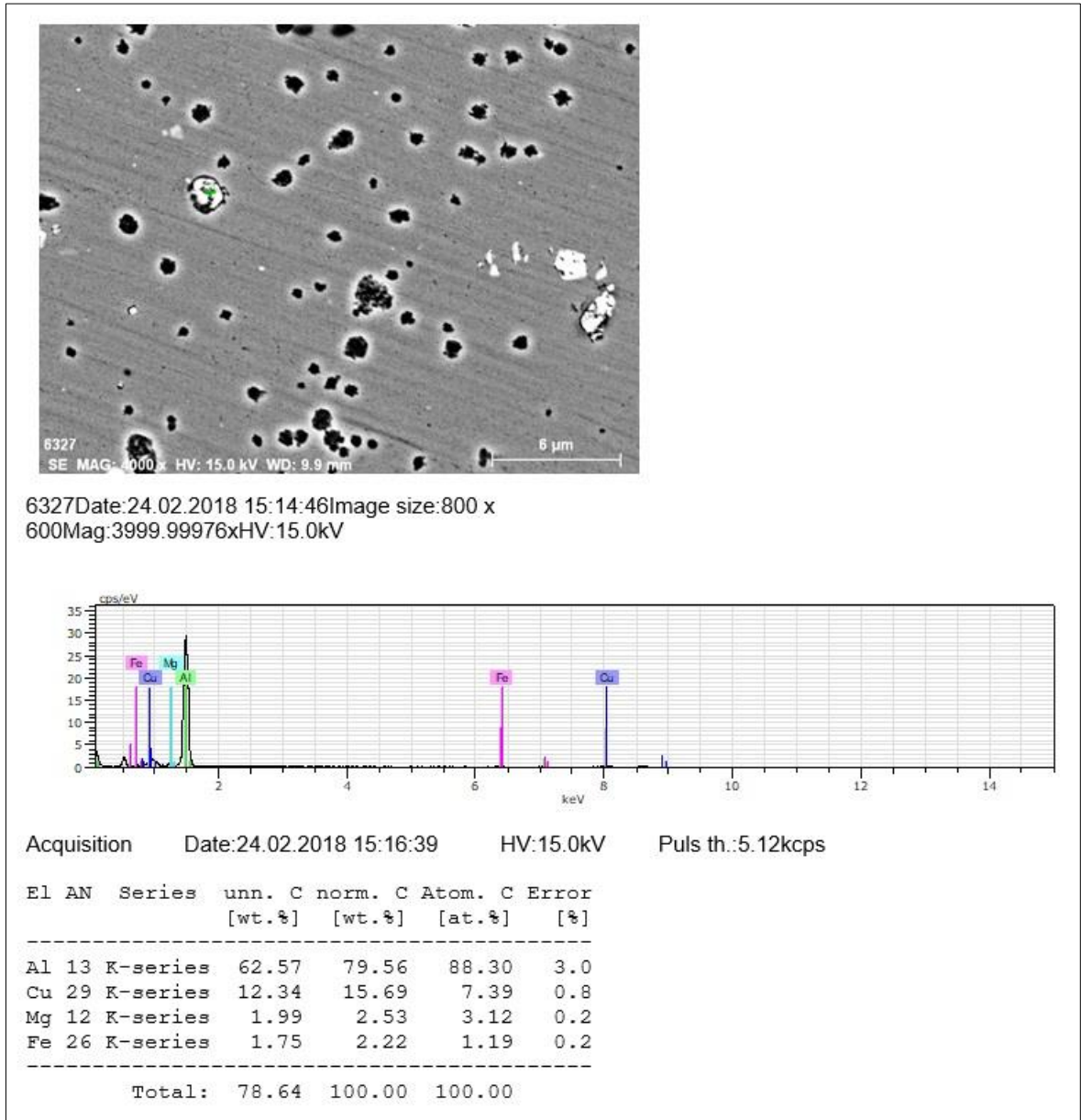
Şekil 1.13. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, RT

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



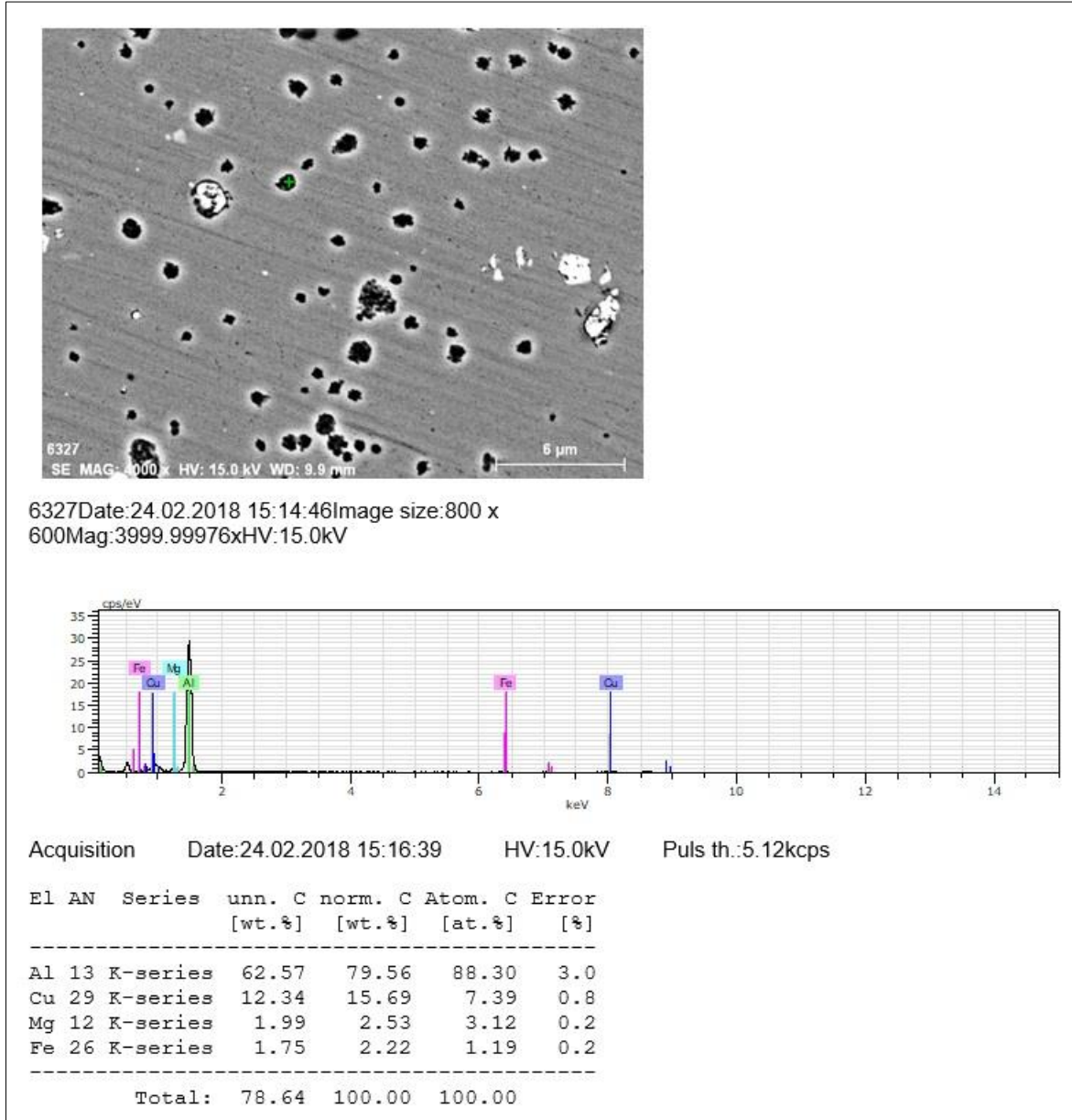
Şekil 1.15. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



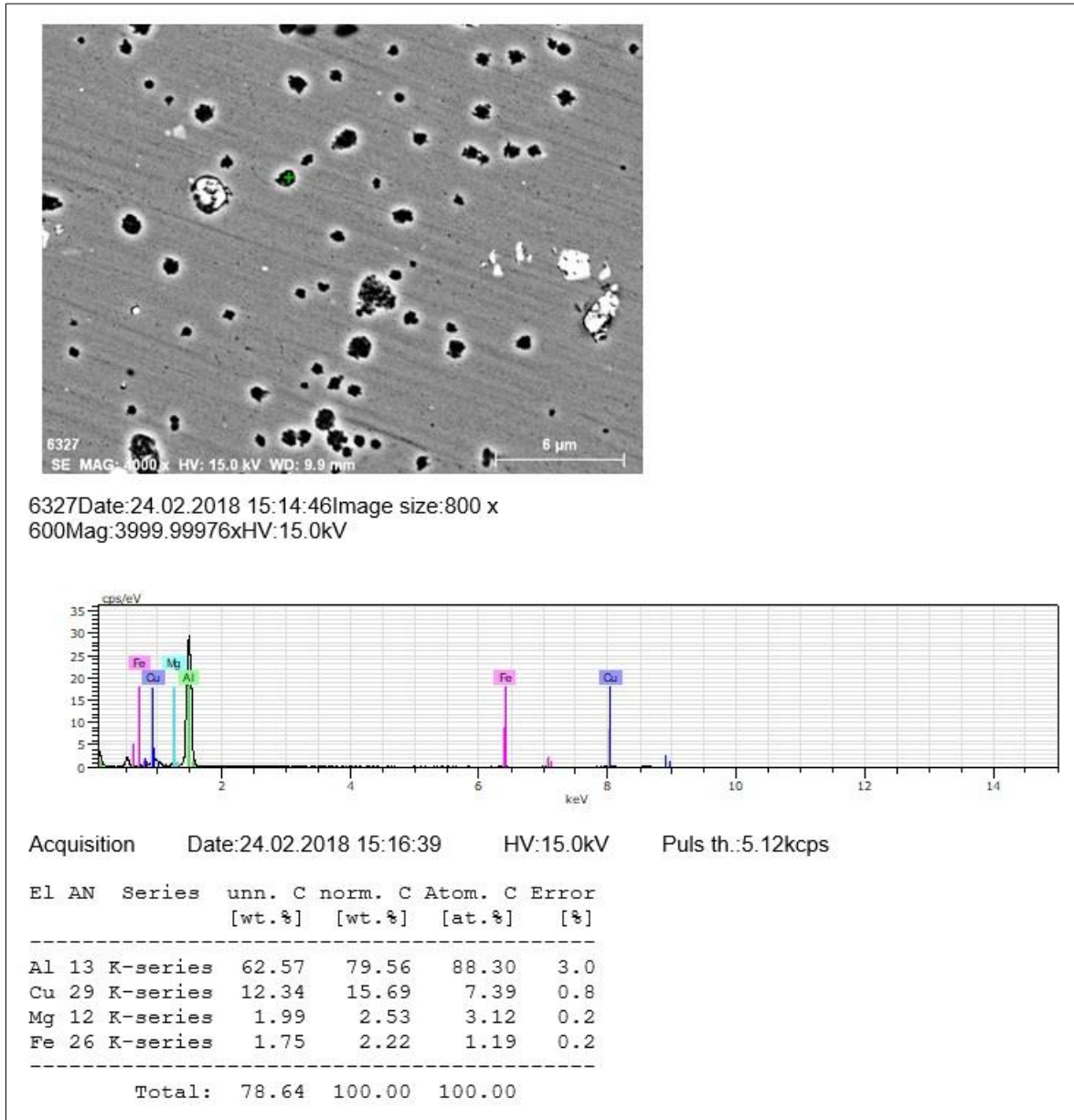
Şekil 1.16. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



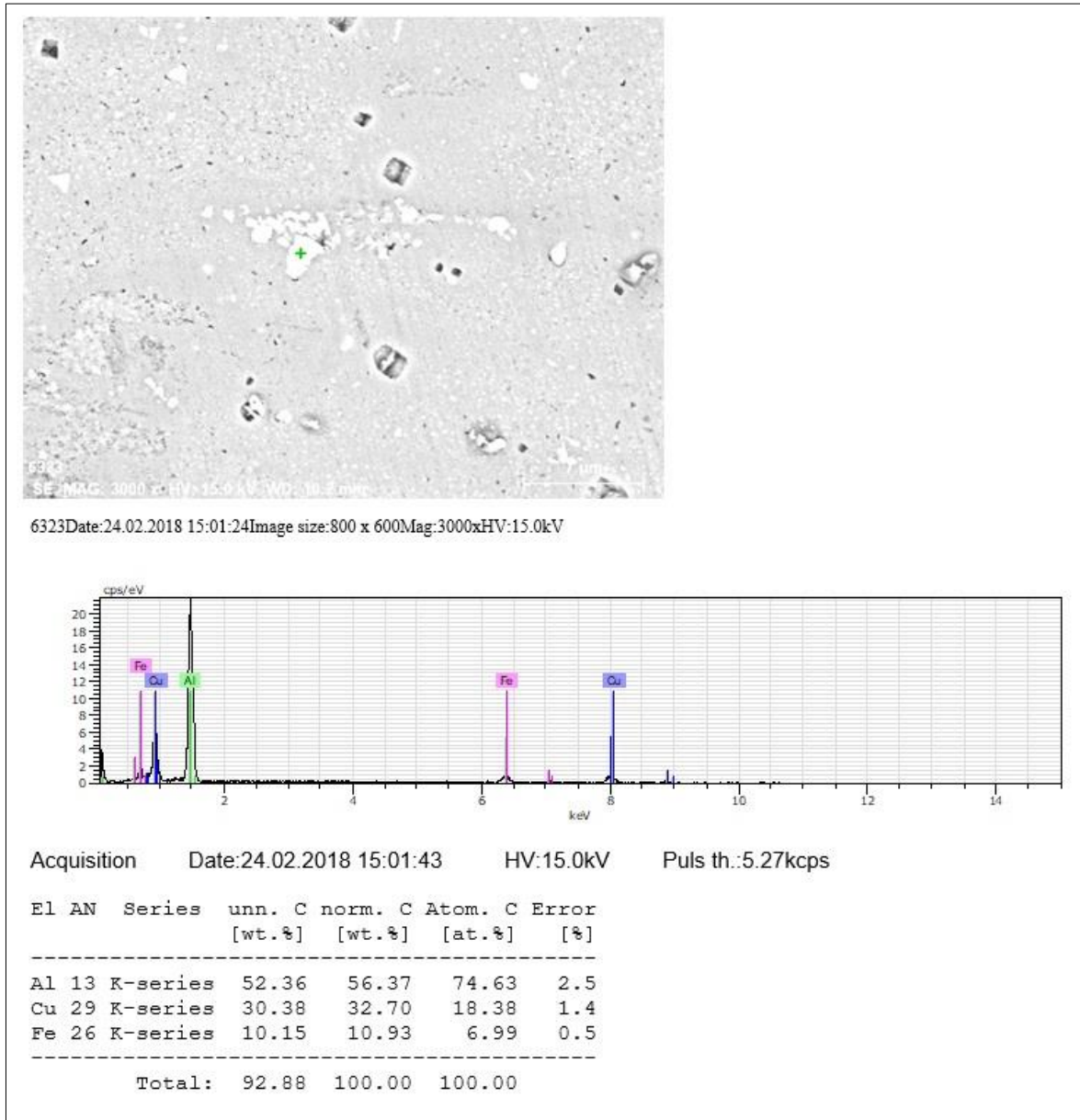
Şekil 1.17. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



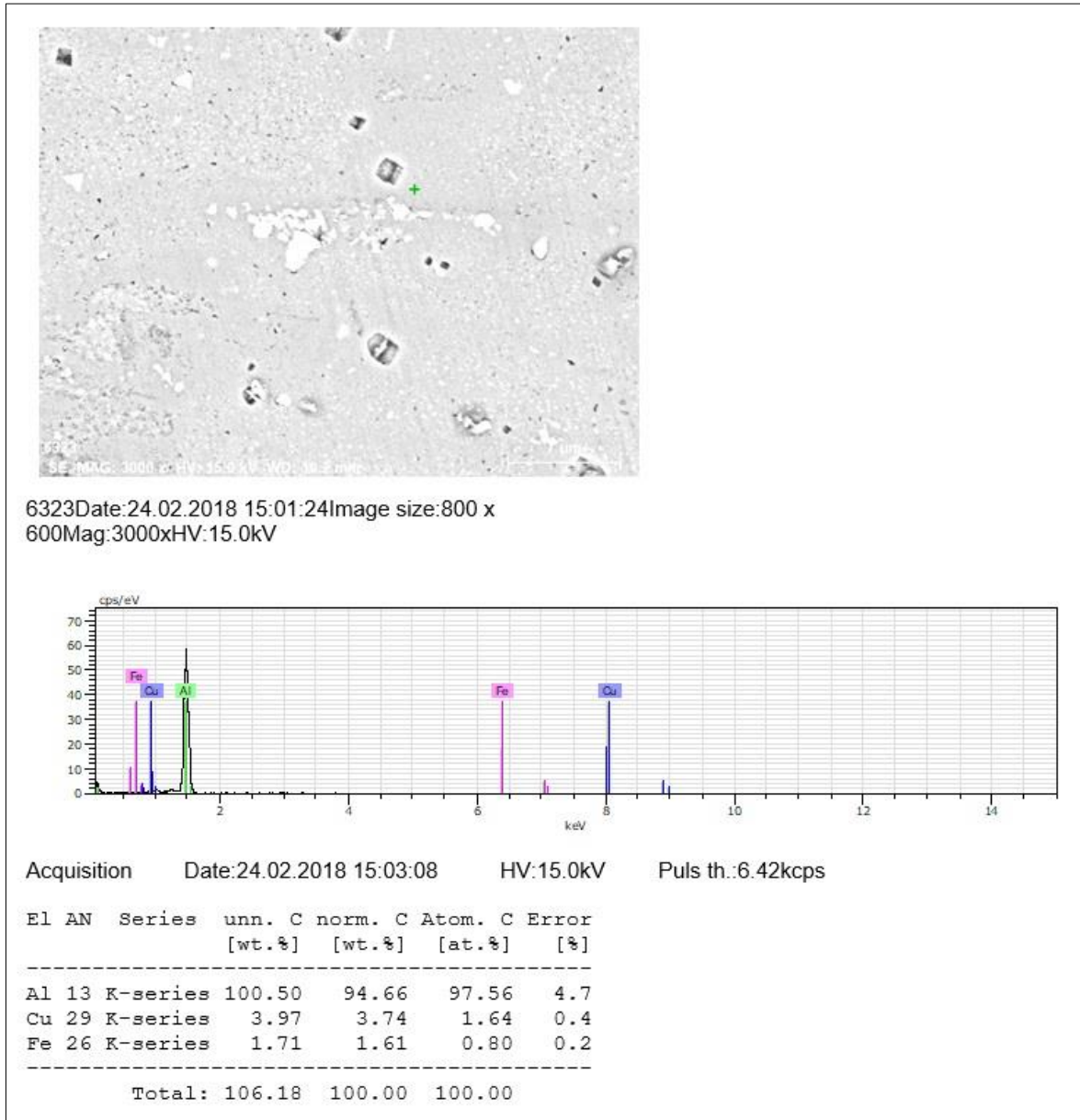
Şekil 1.18. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



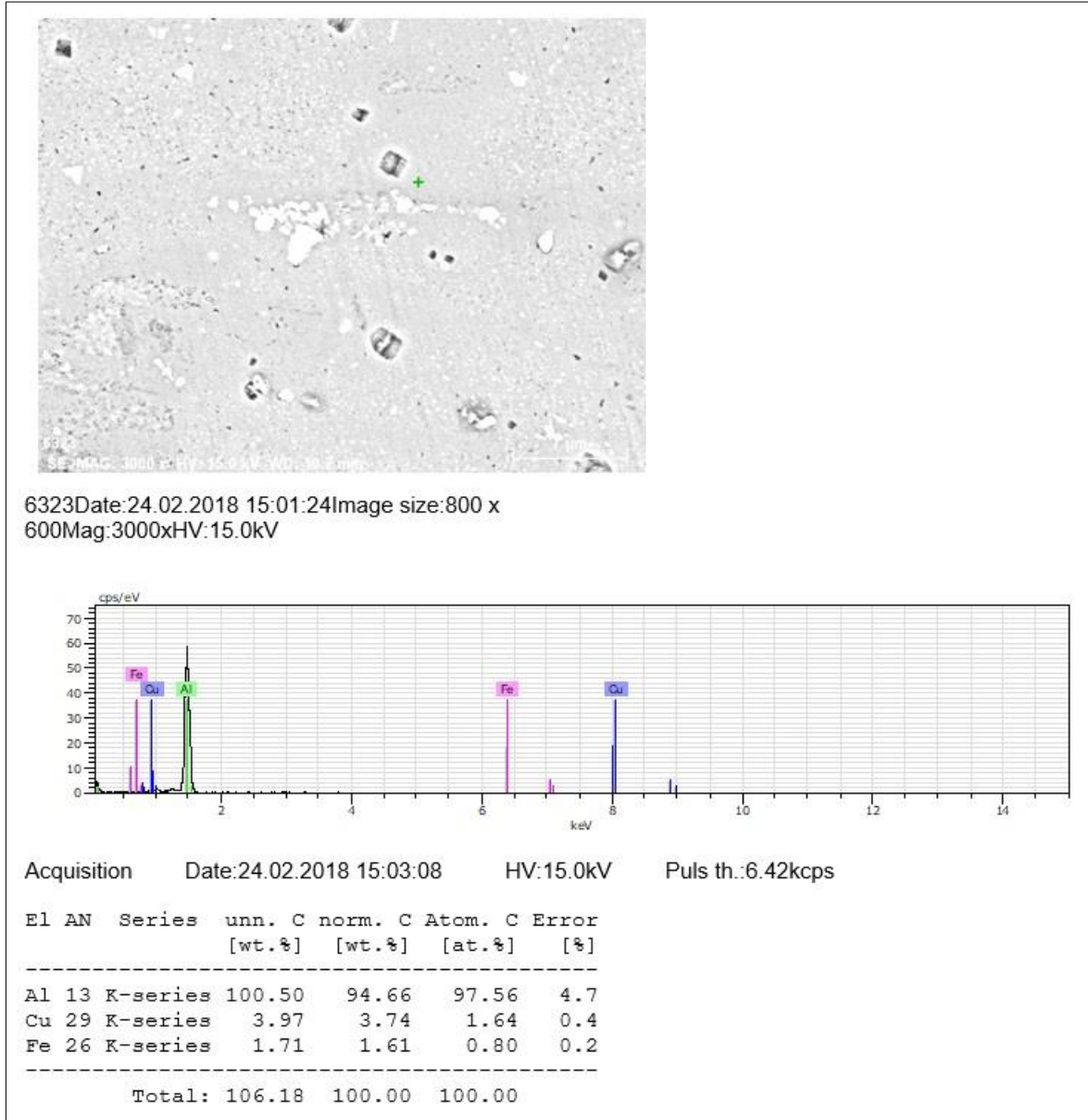
Şekil 1.19. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 200°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



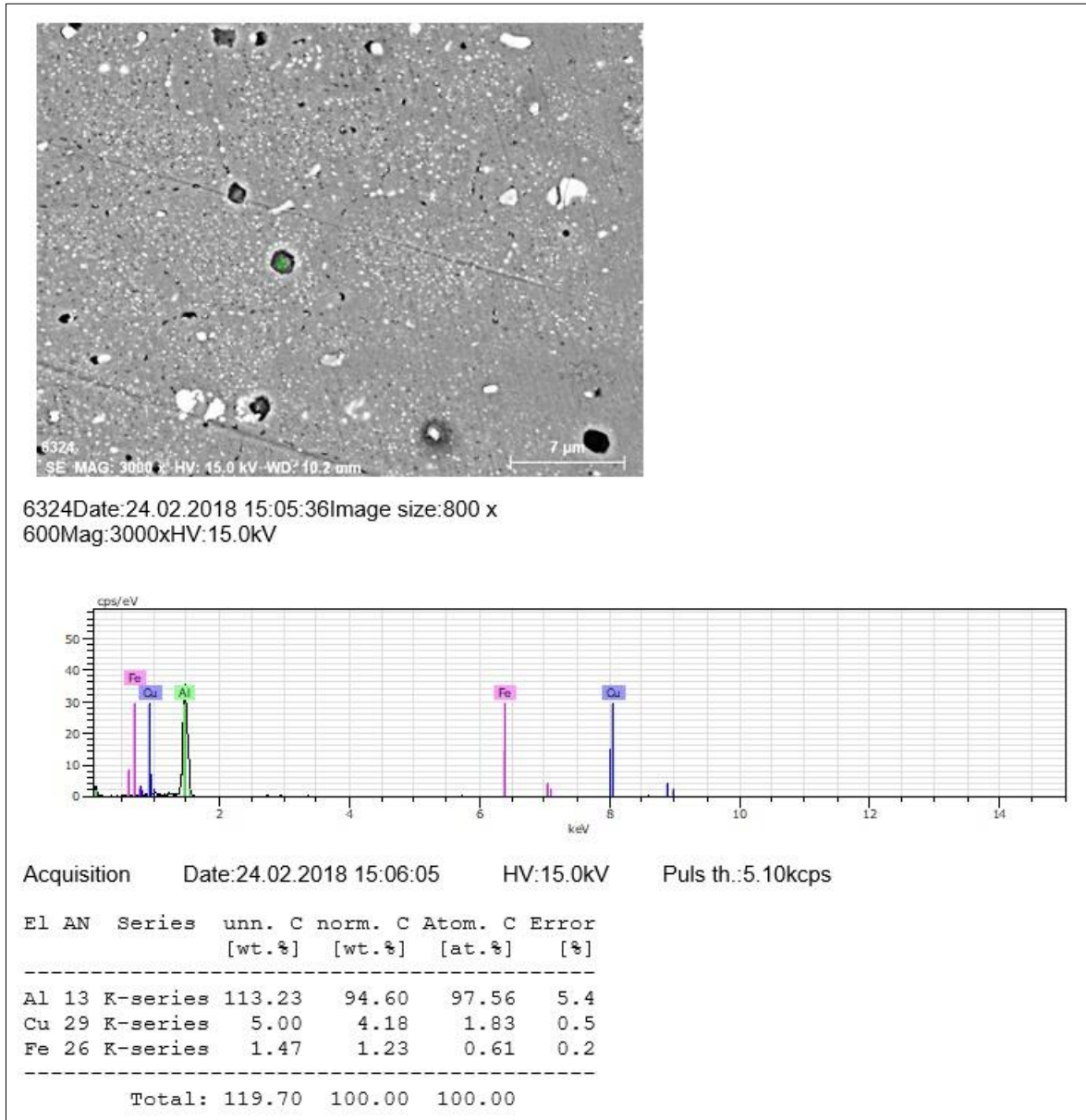
Şekil 1.20. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 400°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavllanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



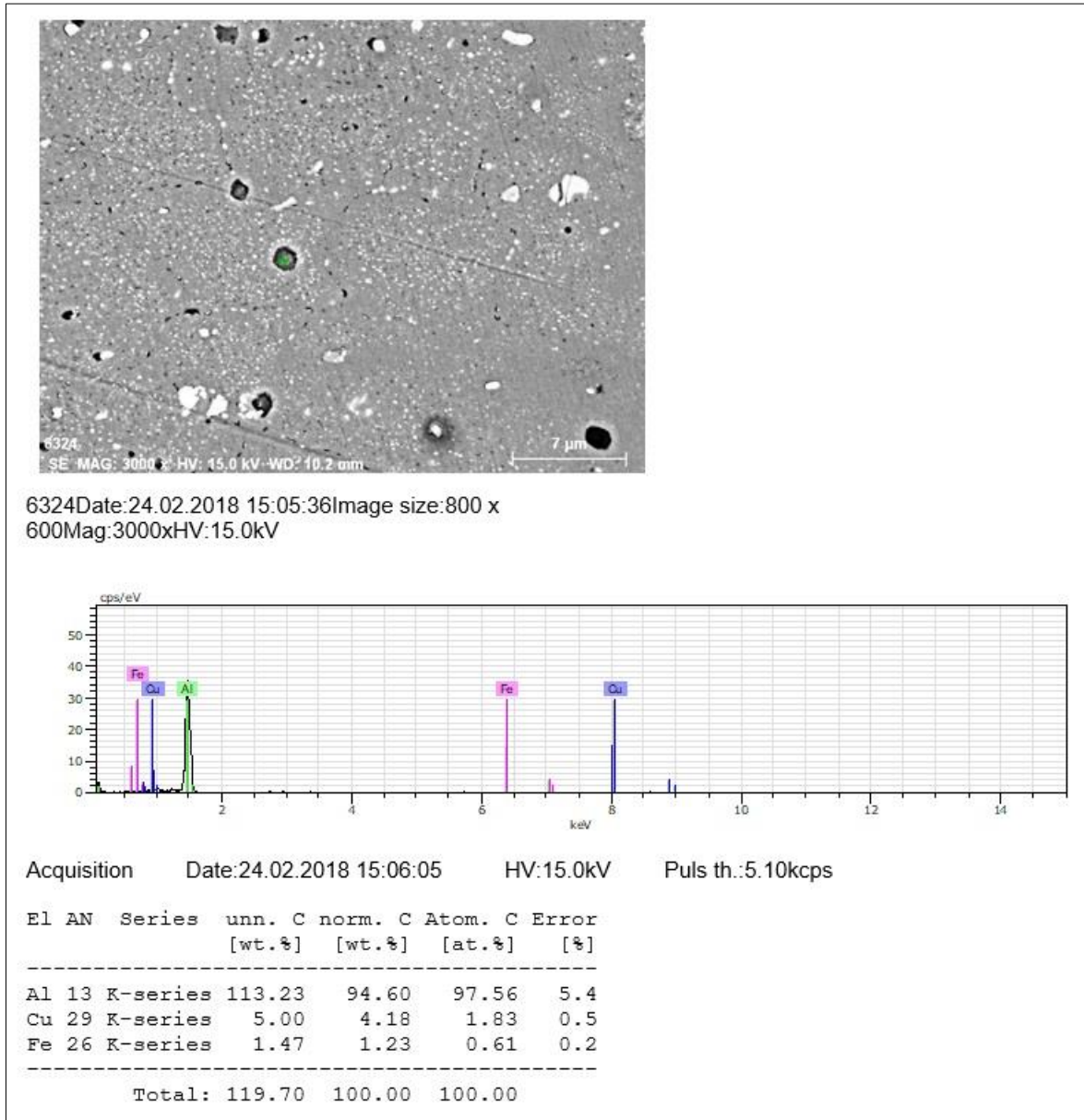
Şekil 1.21. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 400°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



Şekil 1.22. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 400°C, 60 dk

EK-1. (devam) Tavlanmış deney numunelerinin enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları



Şekil 1.23. Enerji dağılımı spektrometre analizi sonuçları Al7075-T6, 400°C, 60 dk

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DEMİREL, Mehmet Yasin
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 17.12.1983, İzmir
 Medeni hali : Evli
 e-mail : yasindemirel@outlook.com



Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Yüksek Lisans	Gazi Üniversitesi / İmalat Mühendisliği	Devam ediyor
Lisans	Kırıkkale Üniversitesi / Makine Mühendisliği	2004
Lise	Batıkent Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2017-Halen	Renko Ltd.	Üretim Müdürü
2017-2015	Azertexnolayn MMC	Üretim Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce

Yayınlar

1. Demirel, M. Y., ve Karaağaç, İ. (2017). Sürtünmeli delik delme prosesi ve prosesin başlıca uygulamaları. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi*, 4(2), 234-248.
2. Demirel, M. Y., and Mamedov, O. (2016). İstehsal xəttinin balanslaşdırılmasınınin kəsikli istehsal sisteminə tətbiqi –yamazumi. *Qafqaz University IV International Scientific Conference Of Young Researchers*, 451.
3. Demirel, M. Y., ve Karaağaç, İ. (2014). Bilgisayar destekli üretim süreçlerine genel bir bakış. *Mühendis ve Makina*, 55(652), 51-61.



GAZİ GELECEKTİR..