



T.C.  
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI



**YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN AA2024  
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**GÖKHAN AKÖZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**KIRŞEHİR**

**2025**



T.C.  
KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ  
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM  
DALI



**YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN AA2024  
ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK  
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN  
İNCELENMESİ**

**GÖKHAN AKÖZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**DANIŞMAN**

**Prof. Dr. Ali Osman KURBAN**

**II. DANIŞMAN**

**Dr. Başak TUNA**

**KIRŞEHİR**

**2025**

**KIRŞEHİR AHİ EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**  
**YÜKSEK LİSANS/ DOKTORA TEZ ÇALIŞMASI**  
**ETİK BEYANI**

Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesini okuduğumu ve anladığımı ve Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında;

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

bildirir, aksi bir durumda bu konuda hakkımda yapılacak tüm yasal işlemleri ve aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

21/07/2025

Gökhan AKÖZ

# İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa No

İÇİNDEKİLER DİZİNİ.....	I
TEŞEKKÜR.....	III
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VII
TABLolar DİZİNİ.....	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	XI
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	XIII
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1. Problemin Tanımı.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	1
1.3. Tezin Önemi.....	2
1.4. Tezin Organizasyonu.....	3
1.5. AA2024 Alüminyum Alaşımı.....	4
1.5.1. Kimyasal bileşimi ve mikroyapı.....	4
1.5.2. Kullanım alanları.....	5
1.5.3. Mekanik özellikleri.....	6
1.6. Çökeltme Sertleşmesi ve Yaşlandırma İşlemi.....	6
1.6.1. Temel ilkeler.....	8
1.6.2. Çözeltiye alma.....	10
1.6.3. Su verme.....	11
1.6.4. Doğal ve yapay yaşlandırma.....	13
1.6.5. Yaşlandırma kinetiği.....	15
1.6.6. Pik sertlik ve aşırı yaşlanma.....	18
<b>2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR.....</b>	<b>21</b>
2.1. AA2024 Alüminyum Alaşımında Yaşlandırma Sertleşmesi Üzerine Yapılan Temel Çalışmalar.....	21
2.2. Yaşlandırma Süresi ve Sıcaklığının AA2024 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisi.....	23
2.3. Sertlik Ölçümleri Üzerine Literatür İncelemesi: Brinell Ölçümleri ve Yorumları.....	24
2.4. Çekme Testi Bulguları ile Yaşlandırma Davranışının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi.....	25

2.5. Yaşlandırma Sürecinin Mikroyapısal Gelişime Etkisi ve SEM İncelemeleri .....	27
<b>3. MATERYAL VE METOT .....</b>	<b>29</b>
3.1. Materyal.....	29
3.1.1. Malzeme özellikleri .....	29
3.1.2. Numune hazırlama .....	30
3.1.3. Numune sayıları .....	32
3.2. Metot.....	32
3.2.1. Isıl işlem prosedürü.....	32
3.2.2. Sertlik testi (brinell) .....	34
3.2.3. Çekme testi.....	36
3.2.4. SEM görüntüleme .....	38
<b>4. BULGULAR VE TARTIŞMA.....</b>	<b>41</b>
4.1. Sertlik Sonuçları .....	41
4.2. Çekme Testi Sonuçları.....	42
4.3. SEM Mikroyapı İncelemeleri .....	44
4.4. Yaşlandırma Süresi – Mekanik Özellik İlişkisi.....	46
4.5. Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması.....	47
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>49</b>
5.1. Genel Sonuçlar .....	49
5.2. Önerilen Çökeltme Sertleşmesi Parametreleri.....	50
5.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler .....	50
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>53</b>
<b>EKLER.....</b>	<b>57</b>
<b>EK-1</b> Seykoç – AA2024 Malzeme Sertifikası.....	<b>57</b>
<b>EK-2</b> Altınay – AA2024 Kimyasal Analiz Sonuçları.....	<b>58</b>
<b>EK-3</b> Seykoç – AA2024 Alüminyum Görseli .....	<b>59</b>
<b>EK-4</b> Numune Ölçüleri (Autocad Inventor) .....	<b>60</b>
<b>EK-5</b> Arslan Cnc – ASTM E8M/E10’a Uygun Numune Fotoğrafi .....	<b>61</b>
<b>EK-6</b> Brinell Sertlik Sonuçları.....	<b>62</b>
<b>EK-7</b> Çekme Testi Verileri ve Gerilme-Gerinim Eğrileri .....	<b>64</b>
<b>EK-8</b> Çekme Testi Sonuçları .....	<b>72</b>
<b>EK-9</b> Çekme Testi Formülleri .....	<b>75</b>
<b>EK-10</b> Mekanik Özellik Grafikleri .....	<b>76</b>
<b>EK-11</b> SEM Mikroyapı Görüntüleri .....	<b>80</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>91</b>

## TEŞEKKÜR

Yüksek lisansa kabul edildiğim ilk günden bu yana, her zaman yanımda olmasada desteğini ve rehberliğini hissettiren; hayatımız boyunca her alanda faydalanabileceğimiz kıymetli öğütleriyle bizleri aydınlatan, derslerini ilgi ve şevkle takip ettiğim saygıdeğer danışmanım Prof. Dr. Ali Osman KURBAN'a en içten teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmasında, kendisinden aldığım “Metallerde Mukavemet Arttırıcı Mekanizmalar” dersinden edindiğim bilgileri kullanmış olmam ve tez süresince yönelttiğim soruları bilgi ve tecrübesiyle yanıtlayarak katkı sağlaması nedeniyle Dr. Öğr. Üyesi Sercan BASİT'e teşekkür ederim.

Tezimin her aşamasında değerli öneri ve destekleriyle yanımda olan, sürece önemli katkıları olan ikinci danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Başak TUNA'ya teşekkür ederim.

Alüminyum firmasında görevli Sayın Mert Şerefoglu'na ve numune kesimi konusunda destek veren ARSLAN CNC'ye teşekkür ederim. Ayrıca kimyasal analizlerde destek olan TAAC-Altınay firması çalışanı Sayın Umut Ali Yıldız'a, sertlik ve çekme testlerinde katkı sunan Matil Laboratuvarı'ndan Sayın Çetin Bağlan'a ve SEM analizinde desteğiyle katkı sağlayan Sayın Cem Çiçek'e teşekkür ederim.

Bu sürecin her anında sevgi ve anlayışıyla yanımda olan, desteğini hiçbir zaman esirgemeyen eşim Görkem Aköz'e teşekkür ediyorum.

Temmuz, 2025

Gökhan AKÖZ

## ÖZET

### YÜKSEK LİSANS

#### YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN AA2024 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Gökhan AKÖZ

#### KIRŞEHİR AHI EVRAN ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLER ENSTİTÜSÜ MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**Danışman:** Prof. Dr. Ali Osman KURBAN  
Yıl: 2025, Sayfa: 91  
**Jüri:** Prof. Dr. Ali Osman KURBAN  
Prof. Dr. Levent URTEKİN  
Prof. Dr. Fehmi NAİR  
Doç. Dr. Merdin DANIŞMAZ  
**İkinci Danışman:** Dr. Öğr. Üyesi Başak TUNA

Bu tez çalışmasında, çökelme sertleşmesi mekanizmasına sahip AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma ısıl işleminin, malzemenin mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel çalışma kapsamında, AA2024 500 °C'de 2 saat süreyle çözeltiye alınmış, ani su verme işlemine tabi tutulmuştur. Sonrasında ise 190 °C sıcaklıkta sırasıyla 5, 10 ve 15 saat süreyle yapay yaşlandırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Her yaşlandırma süresi sonunda Brinell sertlik ölçümleri yapılmış, çekme testleri gerçekleştirilmiş ve mikroyapısal karakterizasyon Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte önce sertlik ve çekme dayanımının yükseldiğini, ancak 10 saatin ardından bu değerlerde düşüş başladığını göstermektedir. Özellikle 10 saatlik yaşlandırmanın, en yüksek sertlik 109.77 HB ve çekme dayanımı 310.04 MPa değerlerini sağladığı gözlemlenmiştir. SEM analizleri de bu durumu desteklemekte olup, 10 saatlik yaşlandırmada çökeltilerin homojen, ince ve matrisle uyumlu dağıldığı; 15 saatlik yaşlandırmada ise çökeltilerin büyüyerek matrisle uyumsuz hale geldiği ve mekanik performansı olumsuz etkilediği görülmüştür. Bu çalışma, yaşlandırma süresinin hassas kontrolünün, yüksek performanslı uygulamalar için kritik olduğunu ortaya koymakta ve AA2024 alaşımı için önerilen optimum ısıl işlem parametrelerini sunmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** AA2024 Alüminyum alaşımı, Çökelme sertleşmesi, Yaşlandırma işlemi, Brinell sertlik testi, Çekme testi, SEM, Mikroyapı

## ABSTRACT

### MASTER's THESIS

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AGING PROCESS ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF AA2024 ALUMINUM ALLOY

Gökhan AKÖZ

KIRŞEHİR AHİ EVRAN UNIVERSITY  
INSTITUTE OF NATURAL AND APPLIED SCIENCES  
DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING

<b>Supervisor:</b>	<b>Prof. Dr. Ali Osman KURBAN</b> <b>Year: 2025, Pages: 91</b>
<b>Juries:</b>	<b>Prof. Dr. Prof. Dr. Ali Osman KURBAN</b> <b>Prof. Dr. Levent URTEKİN</b> <b>Prof. Dr. Fehmi NAİR</b> <b>Assoc. Prof. Dr. Merdin DANIŞMAZ</b>
<b>Co-Supervisor:</b>	<b>Asst. Prof. Dr. Başak TUNA</b>

In this thesis study, the effects of aging heat treatment applied to the AA2024 aluminum alloy, which exhibits a precipitation hardening mechanism, on the mechanical properties and microstructure of the material were experimentally investigated. As part of the experimental work, AA2024 specimens were solution treated at 500 °C for 2 hours and subsequently subjected to rapid water quenching. This was followed by artificial aging at 190 °C for 5, 10, and 15 hours, respectively. At the end of each aging duration, Brinell hardness measurements and tensile tests were conducted, and microstructural characterization was performed using Scanning Electron Microscopy (SEM). The obtained results showed that with increasing aging time, both hardness and tensile strength initially increased but started to decrease after 10 hours. Notably, the highest hardness value of 109.77 HB and tensile strength of 310.04 MPa were observed at 10 hours of aging. SEM analyses supported these findings, revealing that the precipitates in the 10-hour aged samples were fine, uniformly distributed, and coherent with the matrix, while in the 15-hour aged samples, the precipitates had grown larger and lost coherence with the matrix, thereby negatively affecting mechanical performance. This study highlights the critical importance of precise aging time control for high-performance applications and presents recommended optimal heat treatment parameters for the AA2024 alloy.

**Key Words:** AA2024 Aluminum alloy, Precipitation hardening, Aging treatment, Brinell hardness test, Tensile test, SEM, Microstructure

## TABLolar DİZİNİ

	Sayfa No
<b>Tablo 1.1.</b> AA2024 alüminyum alaşımının tipik kimyasal bileşimi.....	4
<b>Tablo 1.2.</b> Çökelme sertleşmesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi .....	9
<b>Tablo 1.3.</b> Çözeltiye alma parametreleri – AA2024 için önerilen aralıklar .....	11
<b>Tablo 1.4.</b> AA2024 için su verme parametreleri.....	12
<b>Tablo 1.5.</b> Doğal ve yapay yaşlandırmanın karşılaştırılması .....	14
<b>Tablo 1.6.</b> Yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak pik sertlik süresi ve aşırı yaşlanma başlangıç süresi	17
<b>Tablo 3.1.</b> AA2024 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi.....	30
<b>Tablo 3.2.</b> AA2024 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri.....	30
<b>Tablo 3.3.</b> Numune hazırlığında dikkate alınan test türleri ve uygulanan standartlar.....	31
<b>Tablo 3.4.</b> ASTM E10 ve E8M standardına uygun çekme testi numune ölçüleri.....	31
<b>Tablo 3.5.</b> Uygulanan ısıl işlem parametreleri .....	34
<b>Tablo 3.6.</b> Sertlik testi parametreleri.....	36
<b>Tablo 3.7.</b> Uygulanan çekme testi parametreleri .....	37
<b>Tablo 4.1.</b> Brinell sertlik değerleri.....	41
<b>Tablo 4.2.</b> Çekme testi sonuçları .....	43
<b>Tablo 5.1.</b> Çökelme sertleşmesi.....	50

## ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa No
Şekil 1.1. Çökeltme ile sertleştirilebilir bir alaşımın içeren faz diyagramı .....	9
Şekil 1.2. Çökeltme ile sertleştirilebilir bir alaşımın sıcaklık-zaman grafiği.....	10
Şekil 1.3. Yaşlandırma öncesi, su verme ve yaşlandırma sonrası mikroyapılar .....	16
Şekil 1.4. Yaşlandırma.....	16
Şekil 3.1. Çekme testi numunesi teknik çizimi.....	31
Şekil 3.2. Alser Teknik – HLF190 marka tav fırını .....	33
Şekil 3.3. Bulut Makina – Unibul marka universal sertlik ölçüm cihazı .....	35
Şekil 3.4. Zwick 2500E marka üniversal test cihazı .....	37
Şekil 3.5. Carl Zeiss – EVO MA 10 marka cihaz .....	38
Şekil 4.1. Yaşlandırma süresine bağlı sertlik değişimi.....	42
Şekil 4.2. Yaşlandırma süresine bağlı çekme dayanımı değişimi.....	44
Şekil 4.3. SEM görüntüleri.....	45

## SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

<b>Simgeler</b>	<b>Açıklama</b>
$F_{0.2}$	: 0.2% plastik şekil değişiminde ölçülen kuvvet (N)
$R_{p0.2}$	: 0.2% kalıcı şekil değişimindeki akma dayanımı (MPa)
A	: Alan (numune kesiti)
$\pm$	: Artı-eksi tolerans işareti
$L_0$	: Başlangıç boyu (mm)
$b_0$	: Başlangıç genişliği (mm)
$a_0$	: Başlangıç kalınlığı (mm)
$S_0$	: Başlangıç kesit alanı (mm <sup>2</sup> )
$\epsilon$	: Birim uzama
$\Delta\epsilon$	: Birim uzama değişimi
HB	: Brinell sertlik değeri
$R_m$	: Çekme dayanımı (MPa)
$\Delta\sigma / \Delta\epsilon$	: Elastik bölgedeki gerilme/birim uzama oranı (E)
E	: Elastik modül (Young modülü, MPa)
Amanual	: Elle hesaplanan toplam uzama (%)
$\sigma$	: Gerilme
$\Delta\sigma$	: Gerilme değişimi (MPa)
$x_i$	: Her bir ölçüm değeri
kN	: Kilonewton (yük birimi)
$L_u$	: Kopma sonrası ölçülen boy (mm)
F	: Kuvvet
$F_m$	: Maksimum çekme kuvveti (N)
MPa	: Megapascal (çekme/akma dayanımı)
$\mu\text{m}$	: Mikrometre (mikroyapı ölçüsü)
mm	: Milimetre
mm/dk	: Milimetre/dakika (çekme testi hızı)
N	: Newton (kuvvet)
$\bar{x}$	: Ortalama değer
n	: Ölçüm sayısı (adet)
h	: Saat (yaşlandırma süresi)
°C	: Santigrat derece
At	: Toplam uzama yüzdesi (%)
Agt	: Üniiform uzama yüzdesi (%)
Lgt	: Üniiform uzamanın sona erdiği boy (mm)
%	: Yüzde (uzama, tolerans, görel oranlar)

<b>Kısaltmalar</b>	<b>Açıklama</b>
AA2024	: Alüminyum Alaşımı 2024
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Derneği
SSSS	: Aşırı Doymuş Katı Çözelti
EDS	: Enerji Dağılımlı Spektroskopi
TEM	: Geçirimli Elektron Mikroskobu
GP	: Guinier–Preston Bölgeleri
S Fazı	: Kararlı Çökelti Fazı (Al <sub>2</sub> CuMg)
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
ISO	: Uluslararası Standardizasyon Örgütü
S' Fazı	: Yarı Kararlı Çökelti Fazı

# 1. GİRİŞ

## 1.1. Problemin Tanımı

Havacılık ve savunma sanayii gibi yüksek mühendislik gereksinimleri olan sektörlerde, yapısal malzemelerin hem hafif hem de yüksek dayanımlı olması büyük önem taşımaktadır. Bu alanlarda kullanılan malzemelerin spesifik mukavemetinin yüksek, yorulma dayanımının iyi, mikroyapısının kararlı ve ısı işlemlerle özelliklerinin geliştirilebilir olması beklenir (Zhou ve ark., 2023).

AA2024 alüminyum alaşımı; çözeltiyeye alma, ani soğutma ve yaşlandırma adımlarını içeren ısı işlem dizisiyle mekanik özellikleri geliştirilebilen bir malzemedir. Bu işlem dizisinin en kritik adımlarından biri olan yaşlandırma, malzemenin mikroyapısında çökelti fazlarının oluşumunu sağlar. Bu fazların morfolojisi ve matris içindeki dağılımı, doğrudan çekme dayanımı, sertlik ve süneklik gibi performans parametrelerini etkiler (Abbass, 2012).

Ancak, yaşlandırma süre ve sıcaklığının yanlış seçilmesi durumunda aşırı yaşlanma meydana gelmekte, bu da mekanik özelliklerde olumsuz sonuçlara yol açmaktadır (Guía-Tello ve ark., 2022). Literatürde AA2024 alaşımı üzerine yapılmış çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, bu çalışmaların birçoğunun yalnızca tek bir mekanik test yöntemiyle sınırlı olduğu görülmektedir (Onur, 2014).

Malzemenin davranışını daha bütüncül analiz edebilmek için, sertlik ölçümleri, çekme testleri ve mikroyapısal gözlemlerin birlikte değerlendirilmesi gereklidir. Ancak bu tür çok yönlü yaklaşımlar literatürde sınırlı sayıdadır (Acar ve Dağ, 2021). Bu bağlamda, bu tez çalışmasının temel problemi; AA2024 numunelere uygulanan belirli bir çözeltiyeye alma ve su verme işleminin ardından, 190 °C'de farklı sürelerle (5, 10 ve 15 saat) yapılan yapay yaşlandırmanın, malzemenin mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerinin deneysel olarak ortaya konmasıdır. Böylece yaşlandırma süre ve malzeme performansı arasındaki ilişkinin anlaşılması ve optimum ısı işlem parametrelerinin belirlenmesi amaçlanmaktadır.

## 1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu tezin temel amacı, çökeltme sertleşmesi mekanizmasına sahip AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan ısı işlemlerin, özellikle yaşlandırma süresinin, alaşımın mekanik özellikleri ve mikroyapısı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemektir (Aydoğan, 2019). Çalışmanın özgün yanı hem mikroyapısal hem de makro mekanik

karakterizasyon tekniklerinin bir arada ve sistematik biçimde uygulanarak kapsamlı bir değerlendirme sunmasıdır (Radutoiu ve ark., 2015).

Tez kapsamında uygulanan deneysel yöntemler, belirli bir ısı işlem dizisini temel almaktadır. Öncelikle AA2024 numuneler 500 °C'de 2 saat süreyle çözeltiye alınmış, ardından su verme işlemiyle ani olarak soğutulmuştur. Bu işlem sonucunda malzemenin matris yapısı, aşırı doymuş bir katı çözelti hâline getirilmiş ve çökelme sertleşmesi için uygun hâle gelmiştir. Daha sonra yaşlandırma işlemleri, 190 °C sıcaklıkta sırasıyla 5 saat, 10 saat ve 15 saat olacak şekilde uygulanmıştır (Çarboğa ve Dal, 2014).

Bu farklı süreler, çökelme kinetiğinin ve mikroyapıdaki evrimin zaman boyutundaki etkisini gözlemlemek amacıyla seçilmiştir. Çalışma kapsamında belirlenen hedefler şunlardır:

- Farklı yaşlandırma sürelerinin Brinell sertliği, çekme dayanımı ve uzama gibi mekanik özellikler üzerindeki etkilerinin nicel olarak belirlenmesi,
- Yaşlandırma süresine bağlı olarak mikroyapıdaki çökelti fazlarının morfolojisi, dağılımı ve yoğunluğunun SEM incelemeleri ile değerlendirilmesi,
- Elde edilen verilerin mevcut literatürle karşılaştırılması ve deneysel veriler ışığında en uygun yaşlandırma süresinin önerilmesi. (Reis ve ark., 2012).

Bu kapsamda hazırlanan tez, yalnızca akademik bilgi üretimi açısından değil, aynı zamanda sanayi uygulamaları için de somut çıktılar sunmayı amaçlamaktadır.

### **1.3. Tezin Önemi**

Malzeme mühendisliği alanında, ısı işlem uygulamaları ile mikroyapının kontrol edilerek mekanik özelliklerin geliştirilmesi, günümüz mühendislik uygulamalarında kritik bir araştırma alanı hâline gelmiştir (Koçdağ, 2019). Özellikle çökelme sertleşmesine uygun alüminyum alaşımlarında, uygun yaşlandırma süresinin ve sıcaklığının belirlenmesi, nihai malzeme performansı açısından büyük önem arz etmektedir.

AA2024 alüminyum alaşımı gibi çökelme sertleşmesiyle güçlendirilebilen malzemelerde, aşırı yaşlandırma veya yetersiz yaşlandırma gibi durumlar mekanik özelliklerde düşüşe neden olabilir. Bu tez çalışması, bu tür sorunlara yönelik deneysel bir değerlendirme sunmakta ve optimum yaşlandırma süresinin belirlenmesi ile sanayiye doğrudan katkı sağlamayı hedeflemektedir (Şam Parmak ve Küçükelyas, 2017).

Ayrıca çalışma; Brinell sertlik testi, çekme testi ve SEM mikroyapı analizleri gibi birbirini tamamlayan yöntemleri bir arada sunarak, yalnızca mekanik değil mikroyapısal

düzeyde de değerlendirme yapmaktadır. Bu çok yönlü yaklaşım, ileri mühendislik uygulamalarında karşılaşılan performans gereksinimlerinin daha iyi anlaşılmasına olanak tanımaktadır (Alexopoulos ve ark., 2016).

Sonuç olarak, bu tez çalışmasının önemi, akademik katkılarının yanı sıra, kalite kontrol süreçlerinde, ısıtma işlem parametrelerinin optimizasyonunda ve üretim standardizasyonlarında kullanılacak somut ve uygulanabilir bilgiler üretmesinden kaynaklanmaktadır (Akyüz ve Şenaysoy, 2014).

#### **1.4. Tezin Organizasyonu**

Bu tez çalışması, toplam yedi ana bölümden oluşmaktadır:

Birinci bölümde, çalışmanın problemi, amacı, kapsamı ve önemi ayrıntılı olarak sunulmuş ve izlenecek araştırma yöntemi açıklanmıştır.

İkinci bölümde, alüminyum alaşımlarının genel özellikleri, sınıflandırmaları ve özellikle AA2024 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ile mikroyapısal karakteristikleri detaylandırılmıştır. Bu bölümde ayrıca alaşımın endüstrideki uygulama alanları da ele alınmıştır (Durmuş ve ark., 2003).

Üçüncü bölümde, çökeltme sertleşmesi mekanizması, ilgili faz oluşumları ve yaşlandırma ısıtma işleminin teorik temelleri ayrıntılı olarak açıklanmıştır. Çökelti fazlarının oluşum süreci, yapısal etkileri ve mikro düzeydeki dağılımları bu bölümde incelenmiştir (El Garchani ve ark., 2023).

Dördüncü bölüm, deneysel çalışmaları kapsamaktadır. Kullanılan malzeme özellikleri, ısıtma işlem adımları (çözeltiye alma, su verme, yaşlandırma) ve deneysel test yöntemleri (sertlik testi, çekme testi, SEM analizi) açıklanmıştır.

Beşinci bölüm, elde edilen deneysel bulguların tablo ve grafiklerle sunulduğu kısımdır. Yaşlandırma süresine göre değişen sertlik, dayanım ve mikroyapı verileri analiz edilmiştir.

Altıncı bölüm, bulguların literatürle karşılaştırılarak yorumlandığı bölümdür. Elde edilen sonuçların daha önceki çalışmalarla örtüşüp örtüşmediği tartışılmış ve bilimsel çıkarımlar yapılmıştır (Reis ve ark., 2012).

Yedinci bölümde, genel sonuçlar özetlenmiş ve bu çalışma doğrultusunda yapılabilecek ileriye dönük araştırmalar ile uygulama önerileri sunulmuştur.

Bu yapı hem literatür bilgisi hem de deneysel veri bütünlüğü sağlayarak AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan ısıtma işlemlerinin kapsamlı biçimde değerlendirilmesini hedeflemektedir.

## 1.5. AA2024 Alüminyum Alaşımı

AA2024 alüminyum alaşımı, havacılık ve savunma sanayii başta olmak üzere yüksek mukavemet ve düşük yoğunluk gerektiren birçok mühendislik uygulamasında tercih edilen, çökelme sertleşmesine uygun bir dövme alaşımıdır. Al–Cu–Mg sistemine dahil olan bu alaşım; ısıl işlemle güçlendirme özelliği, iyi işlenebilirliği ve yorulma dayanımı gibi nitelikleriyle özellikle uçak yapısal parçalarında, otomotiv endüstrisinde ve yüksek performanslı mekanik bileşenlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu bölümde, AA2024 alaşımının teknik özellikleri detaylı alt başlıklar altında sistematik biçimde incelenecektir.

Bu bölümde AA2024 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi ve mikroyapı karakteristiği, endüstriyel kullanım alanları, mekanik özellikleri ve farklı temper durumlarının teknik karşılaştırmaları detaylı şekilde ele alınacaktır (Avner, 1974).

### 1.5.1. Kimyasal bileşimi ve mikroyapı

AA2024 alüminyum alaşımı, temel olarak alüminyum (Al) matris içerisinde bakır (Cu), magnezyum (Mg) ve mangan (Mn) elementlerinin alaşımlanması ile elde edilir. Bu alaşımda en belirleyici alaşım elementi bakırdır ve yaklaşık 4% düzeyindedir. Magnezyum 1.5–2% ve mangan 0.6–0.8% oranındadır. Ayrıca eser miktarda demir (Fe), silisyum (Si), çinko (Zn) ve titanyum (Ti) gibi elementler de yapıda bulunabilir. Bu bileşim, yüksek mukavemet ve iyi yorulma direnci gibi özellikler sağlamaktadır (Afzal ve ark., 2013).

**Tablo 1.1.** AA2024 alüminyum alaşımının tipik kimyasal bileşimi (% Ağırlıkça) (Akyüz ve Şenaysoy, 2014; Yücel, 2024)

Element	Al	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti
Oran (%)	92.7	4.4	1.5	0.6	0.5	0.08	0.22	0.03

Mikroyapısal açıdan incelendiğinde, AA2024 alaşımı çökelme sertleşmesine elverişli bir yapıya sahiptir. Isıl işlem uygulanmamış hâlde alaşımın yapısı iri taneli ve homojen bir faz dağılımına sahiptir. Isıl işlem sonrası ise tane içi ve tane sınırlarında ince ve dağınık çökeltiler oluşur. Bu çökeltilerin morfolojisi ve yoğunluğu, uygulanan yaşlandırma süresi ve sıcaklığına bağlı olarak değişiklik gösterir. GP zonları, S' fazı (Al<sub>2</sub>CuMg) ve kararlı S fazı (Al<sub>2</sub>CuMg) en yaygın gözlenen çökeltiler arasındadır. Özellikle S' fazı, matris ile yarı uyumlu yapısı sayesinde mukavemete önemli katkı sağlar (Varol Özkavak ve Bıçaklı, 2018).

### 1.5.2. Kullanım alanları

AA2024 alüminyum alaşımı, yüksek spesifik mukavemeti, iyi yorulma dayanımı ve ısı ile geliştirilebilen yapısı sayesinde, birçok yüksek performans uygulamasında tercih edilen bir mühendislik malzemesidir. Özellikle havacılık endüstrisinde yapısal parçalarda yaygın olarak kullanılır. Uçak gövdeleri, kanat panelleri, iniş takımı elemanları ve perçin bağlantıları gibi yüksek yük taşıma kapasitesi gerektiren ancak ağırlığın kritik öneme sahip olduğu bölgelerde AA2024 alaşımı öne çıkmaktadır (Avner, 1974; Alexopoulos ve ark., 2016).

Bu alaşımın ısı ile mukavemet kazanabilmesi, onu yalnızca havacılıkta değil; otomotiv, savunma, gemi inşa, raylı sistemler ve yüksek hassasiyetli mühendislik uygulamaları için de uygun hâle getirmiştir. Otomotiv sektöründe, özellikle yarış araçlarında ve yüksek dayanım gerektiren şasi parçalarında; savunma sanayisinde ise füze gövdeleri, mühimmat kasaları ve zırhlı araç bileşenlerinde kullanılmaktadır (Radutoiu ve ark., 2015; Varol Özkavak ve Bıçaklı, 2018).

AA2024 alaşımının yaygın kullanım alanları örneklenmiştir:

- Uçak gövde panelleri
- Kanat bağlantı elemanları
- Helikopter rotor sistemleri
- Füze ve mühimmat gövdeleri
- Otomotiv şasi parçaları ve darbe elemanları
- Zırh panelleri ve askeri araç parçaları
- Hafif gemi yapıları, yat iskeletleri
- Raylı sistem bağlantı elemanları

Ancak bu alaşım, korozyon dayanımı açısından sınırlı bir performans gösterir. Özellikle nemli veya tropikal ortamlarda, yüzeyde çöken bakır zengin fazlar nedeniyle galvanik korozyon riski artar. Bu nedenle, eloksal kaplama, kromatlama veya boyama gibi yüzey koruma işlemleriyle kullanım ömrü uzatılmakta ve çevresel etkiler minimize edilmektedir (Güven ve Delikanlı, 2012).

Sonuç olarak, AA2024 alaşımı; ağırlığın azaltılması, yüksek dayanım elde edilmesi ve uzun ömürlü yapısal performans hedeflenen her alanda teknik üstünlük sağlamaktadır. Alaşımın çökelme sertleşmesine uygunluğu sayesinde üretim sonrası özelliklerin mühendislik ihtiyaçlarına göre uyarlanabilmesi, onun geniş bir uygulama spektrumuna sahip olmasını mümkün kılmıştır.

### 1.5.3. Mekanik özellikleri

AA2024 alüminyum alaşımı, yüksek akma ve çekme dayanımı ile ön plana çıkan, aynı zamanda yorulma ve darbe dayanımı açısından da oldukça iyi performans gösteren bir mühendislik malzemesidir. Özellikle T3 ve T6 gibi temper durumlarında 400–500 MPa aralığında çekme dayanımı, 250–400 MPa aralığında akma dayanımı sergileyebilmektedir. Süneklik, uygulanan ısıtma işlemine göre değişmekle birlikte genellikle 10%–20% aralığındadır.

Bu mekanik özelliklerin büyük ölçüde çökeltme sertleşmesine bağlı olduğu bilinmektedir. Uygun süre ve sıcaklıkta uygulanan yaşlandırma işlemi, alaşımda GP zonları ve S' fazı gibi çökeltilerin oluşmasını sağlayarak dislokasyon hareketlerini sınırlar ve böylece sertlik ve mukavemet artışı elde edilir. Ancak yaşlandırma süresi uzadıkça çökelti büyür ve kararlı S fazına dönüşür; bu durum matris ile çökelti arasındaki uyumu bozar ve gevrekleşmeye neden olur. Dolayısıyla optimum yaşlandırma süresinin belirlenmesi hem yüksek dayanım hem de yeterli süneklik için kritik önemdedir.

### 1.6. Çökeltme Sertleşmesi ve Yaşlandırma İşlemi

Alüminyum alaşımları, yüksek özgül mukavemet, işlenebilirlik ve hafiflik gibi avantajları sayesinde havacılık, otomotiv ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren sektörlerde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ancak saf alüminyumun düşük sertlik ve mukavemet özellikleri, bu alanlardaki kullanımı sınırlandırmaktadır. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli sertleştirme yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemler arasında özellikle çökeltme sertleşmesi 2xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımları gibi yapısal uygulamalarda sıkça tercih edilen sistemlerde en etkili ısıtma işlemi tekniği olarak öne çıkmaktadır (Avner, 1974; Yücel, 2024).

Çökeltme sertleşmesi, metal matris içinde çözünmüş durumda bulunan alaşım elementlerinin, kontrollü sıcaklık ve zaman koşullarında yeniden birleşerek ikinci faz çökeltileri oluşturması prensibine dayanır. Bu ince çökelti, deformasyon mekanizmasının temel unsurlarından biri olan dislokasyonların hareketini kısıtlayarak, alaşımın çekme dayanımı, akma gerilmesi ve sertlik gibi mekanik özelliklerini anlamlı ölçüde artırır. Oluşan çökeltinin boyutu, morfolojisi, matrisle kristal yapısal uyumu ve dağılım yoğunluğu, elde edilen nihai mekanik performans üzerinde belirleyicidir (Afzal ve ark., 2013).

Çökeltme sertleşmesi, genellikle üç temel ısıtma işlemi aşamasını içerir:

Çözeltiye alma: Alaşım, alaşım elementlerinin matris içinde maksimum düzeyde çözüldüğü sıcaklığa kadar ısıtılır ve bu sıcaklıkta belirli bir süre bekletilir.

Su verme: Yüksek sıcaklıktaki yapı, çökeltilerin oluşmasına fırsat vermeden ani şekilde oda sıcaklığına soğutularak aşırı doymuş katı çözelti elde edilir.

Yaşlandırma: Belirli bir süre boyunca oda sıcaklığında (doğal yaşlandırma) veya kontrollü sıcaklıkta (yapay yaşlandırma) bekletilerek ikinci faz çökeltilerin oluşumu sağlanır.

Bu işlemler sonucunda, mikroyapıdaki aşırı doymuş katı çözelti (SSSS) zamanla Guinier–Preston (GP) bölgelerine, oradan da yarı kararlı S' fazlarına ve nihayet kararlı S (Al<sub>2</sub>CuMg) fazlarına dönüşür. Bu faz evrimi, çökeltme kinetiğiyle doğrudan ilişkilidir ve alaşımın yaşlandırma süresine, sıcaklığına ve başlangıç mikroyapısına bağlı olarak farklılık gösterir (Akyüz ve Şenaysoy, 2014; Alexopoulos ve ark., 2016).

AA2024 alüminyum alaşımı, özellikle Al–Cu–Mg–Mn sistemine dayanan yapısı sayesinde çökeltme sertleşmesine oldukça uygundur. Alaşım içeriğindeki yüksek oranda bakır, çökeltilerin matris içinde etkin biçimde oluşmasına olanak sağlar. Bu sayede, kontrollü bir ısıl işlem dizisiyle yüksek sertlik ve dayanım elde edilebilir. Ancak bu süreç, ısıtma süresi, yaşlandırma sıcaklığı, su verme hızı gibi parametrelerden büyük ölçüde etkilenmektedir. Yanlış parametrelerin uygulanması durumunda istenmeyen mikroyapılar oluşabilir ve bu da aşırı yaşlanma, gevrekleşme veya düşük performans gibi olumsuz sonuçlara yol açabilir (Siqueira ve ark., 2019).

Tez kapsamında uygulanan ısıl işlem yöntemi, AA2024 numunelere 500 °C'de 2 saat çözeltiye alma, ardından su verme ve 190 °C'de sırasıyla 5, 10 ve 15 saatlik yaşlandırma adımlarını içermektedir. Bu yöntemle, çökeltme sürecinin zaman bağımlı evrimi gözlemlenerek mikroyapı ile mekanik özellikler arasındaki ilişki sistematik olarak değerlendirilecektir.

Bu bölümün devamında çökeltme sertleşmesi sürecinin alt başlıklar hâlinde detaylandırılması yapılacaktır. Her bir işlem aşaması, mikroyapıdaki dönüşüm mekanizmaları, yaşlandırma türleri, çökeltme kinetiği ve aşırı yaşlanma olgusu açısından ayrı ayrı açıklanacaktır. Bu sayede, AA2024 alaşımının ısıl işleme tepkisi daha iyi anlaşılacak ve optimum işlem parametrelerinin belirlenmesi için bilimsel bir temel oluşturulacaktır.

### 1.6.1. Temel ilkeler

Çökeltme sertleşmesi, özellikle Al–Cu ve Al–Zn–Mg sistemine dayalı alüminyum alaşımlarında mekanik özelliklerin geliştirilmesinde en etkili ısıl işlem tekniklerinden biridir. Bu mekanizma, alaşım elementlerinin matris içinde çözünmüş hâlde bulunduğu metastabil bir durumda başlar ve belirli sıcaklık ve süre koşullarında bu elementlerin ikinci faz çökeltilerini oluşturmasıyla devam eder. Oluşan bu çökelti, matris içinde dislokasyon hareketini engelleyerek akma ve çekme dayanımını belirgin şekilde artırır. Bu nedenle çökeltme sertleşmesi, plastik deformasyon davranışının kontrol edilmesinde son derece kritik bir role sahiptir (Avner, 1974; Yücel, 2024).

Alüminyum alaşımlarında uygulanan çökeltme sertleşmesi; atom ölçeğinde enerji değişimleri, difüzyon kinetiği, kristal yapılar arası uyumluk ve mikroyapı evrimi gibi fiziksel olaylara dayanır. Bu işlem; termomekanik enerji girişine, çökelti-matris arabirim etkileşimine ve dislokasyon yoğunluğu gibi çok sayıda mikroskobik parametreye bağlı olarak ilerler. Sürecin verimli işlemesi, çökelti boyutlarının küçük, dağılımlarının homojen ve matrisle yapısal uyumlarının yüksek olmasına bağlıdır. Aksi takdirde, iri ve düzensiz çökelti matrisin sürekliliğini bozar ve gevrekleşmeye yol açabilir (Afzal ve ark., 2013; Akyüz ve Şenaysoy, 2014).

AA2024 alaşımı özelinde çökeltme sertleşmesi süreci, sırasıyla şu faz evrimleri üzerinden ilerler:

- SSSS (Aşırı Doymuş Katı Çözelti): Yüksek sıcaklıkta çözeltilmeye alma işlemiyle tüm alaşım elementleri matris içinde homojen şekilde çözündürülür. Bu yapı metastabildir.
- GP Zonları (Guinier–Preston Bölgeleri): Su verme sonrası, oda sıcaklığında ya da düşük yaşlandırma sıcaklıklarında atom grupları bir araya gelerek kümeleşmeye başlar. Bu zonlar çok küçüktür ve matrisle tam uyumludur.
- S' Fazı: Yarı kararlı faz olarak adlandırılan bu yapı, GP bölgelerinin büyüyerek disk şeklini alması sonucu oluşur. Matrisle yarı uyumlu çökelti olup, sertlik artışına en fazla katkıyı sağlayan fazlardır.
- S Fazı ( $Al_2CuMg$ ): Nihai kararlı fazdır. Zamanla çökelti büyür ve daha düşük enerjiye sahip bu yapı oluşur. Ancak, faz büyüdükçe dislokasyon engelleme kabiliyeti azalır.

Bu dönüşüm sürecinde kritik nokta, her bir çökelti evresinin belirli sıcaklık ve süre koşullarına bağlı olarak mikroyapı içinde evrilmesidir. Örneğin, GP zonları yalnızca belirli düşük sıcaklık aralıklarında oluşabilirken, S' fazı genellikle 160–200 °C arasında

gözlenir. S fazı ise uzun süreli yaşlandırmalarla birlikte ortaya çıkar (Siqueira ve ark., 2019).

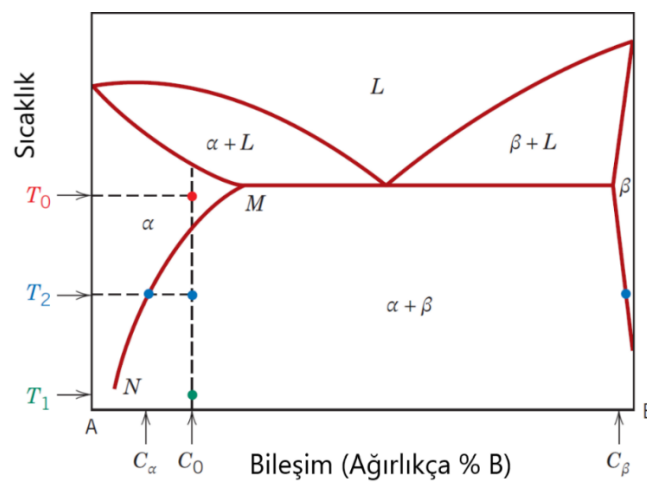
Mekanizma yalnızca çökelti oluşumunu değil, aynı zamanda çökelti-matris ara yüzeylerinin enerji durumunu da içerir. Dislokasyonların çökelti etrafında yön değiştirmesi veya kesilmesi, çökeltilerin büyüklüğü ve dağılımına doğrudan bağlıdır. Bu nedenle, yaşlandırma süresinin uzamasıyla birlikte önce dayanım artar, sonra çökelti yoğunluğu azalır ve malzeme aşırı yaşlanır. Bu durum, pik sertlik sonrası gözlenen bir gerileme evresidir (Koçdağ, 2019).

**Tablo 1.2.** Çökeltme sertleşmesinin mekanik özellikler üzerindeki etkisi

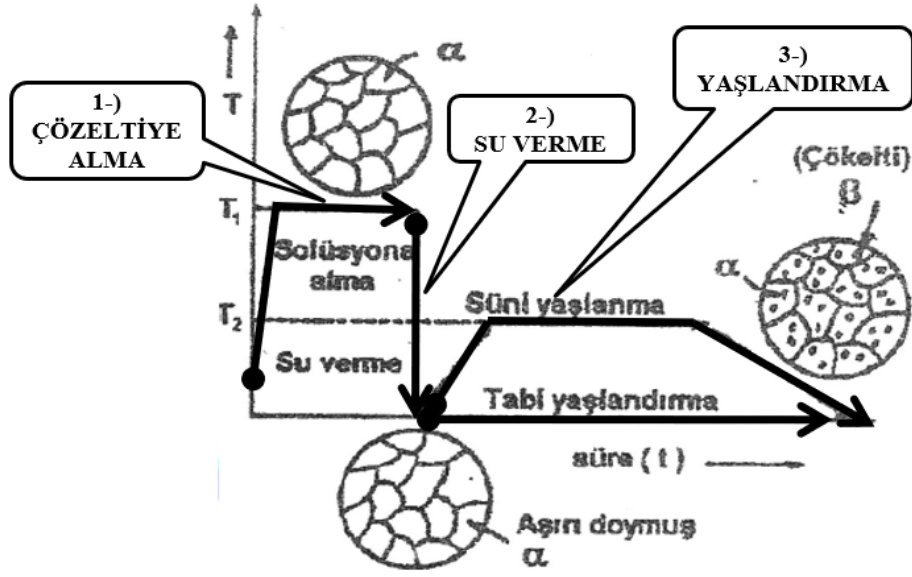
Faz Durumu	Sertlik (HB)	Akma Dayanımı (MPa)	Yorulma Dayanımı (MPa)	Süneklik (%)
GP Zonları	Orta	Artan	Yüksek	Yüksek
S' Fazı	Yüksek	Maksimum	Orta	Azalan
S Fazı	Orta-Düşük	Azalan	Düşük	Artan

Çökeltme sertleşmesi, yalnızca mekanik özellikleri değil, aynı zamanda mikroyapısal kararlılığı ve yorulma ömrünü de iyileştirir. Bu nedenle uçak yapıları, perçin bağlantıları, rotor sistemleri gibi tekrarlı yüklemeye altındaki bileşenlerde AA2024 gibi çökeltme sertleşmeli alaşımlar tercih edilmektedir (Radutoiu ve ark., 2015).

Sonuç olarak, çökeltme sertleşmesinin temel ilkeleri; atom ölçeğinde difüzyon, çökelti büyümesi ve yapısal uyum prensiplerine dayanmaktadır. Bu mekanizmaların anlaşılması, deneysel yaşlandırma sürecinin planlanması ve elde edilen sonuçların yorumlanması açısından temel teşkil etmektedir. Bir sonraki alt başlıkta bu sürecin ilk adımı olan çözeltiliye alma işlemi detaylandırılacaktır.



**Şekil 1.1.** Çökeltme ile sertleştirilebilen AA2xxx serisi bir alüminyum alaşımına ait, solvus eğrisini de içeren faz diyagramı (Bedjaoui, Boumerzoug ve Delaunois, 2022)



Şekil 1.2. Çökelme ile sertleştirilebilir bir alaşımın sıcaklık-zaman grafiği (Kayalı, 1991)

### 1.6.2. Çözeltiye alma

Çözeltiye alma işlemi, çökelme sertleşmesi mekanizmasının ilk ve en kritik adımudur. Bu işlemde amaç, alaşım içinde dağılmış hâlde bulunan alaşım elementlerini (özellikle Cu ve Mg gibi çökelme oluşturan elementleri) alüminyum matrisi içinde tamamen çözündürerek homojen bir aşırı doymuş katı çözelti (SSSS) oluşturmaktır. Bu yapı, sonraki yaşlandırma işlemlerinin etkili olabilmesi için ön koşuldur (Avner, 1974).

AA2024 alaşımı için çözeltiye alma sıcaklığı genellikle 495–505 °C aralığında seçilir. Bu sıcaklık, alaşım elementlerinin çözünbildiği en uygun aralıktır ve ötektik reaksiyonun başlamasından hemen önceki güvenli bölgeyi temsil eder. İşlem süresi, numune kalınlığına ve fırın atmosferine bağlı olarak 20–40 dakika arasında değişebilir. Bu tez kapsamında, 500 °C sıcaklıkta 2 saat çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır.

Çözeltiye alma işleminin temel hedefleri:

- Al–Cu–Mg sisteminde istenmeyen ön çökeltilerin (örneğin S fazı) yeniden çözündürülmesi,
- Tane sınırlarında oluşabilecek bakır zengin bölgelerin dağıtılması,
- Homojen bir mikroyapı elde edilmesi,
- Yaşlandırma aşamasında çökelti oluşumunun kontrollü ve etkin hâle getirilmesi.

İdeal bir çözeltiye alma işleminde, alaşım elementlerinin çözünürlüğü maksimuma ulaşır ve çökelme sertleşmesi için uygun başlangıç mikroyapısı elde edilir.

Ancak işlem sırasında uygulanacak sıcaklık ve süre parametrelerinin çok dar bir tolerans aralığı vardır. Aksi durumda şu problemlerle karşılaşılabilir:

- Yetersiz sıcaklık/süre: Alaşım elementleri tam olarak çözünmez, çökeltme potansiyeli düşer.
- Aşırı sıcaklık/süre: Tane büyümesi, tane sınırlarında zayıflama ve homojenliğin bozulması görülür.
- Fırın atmosferi uygunsuzluğu: Oksit tabakaları oluşur, yüzey kalitesi ve difüzyon dengesi bozulur.

Uygulamada, çözeltiye alma işlemi çoğunlukla dolaşımli fırınlarda yapılmakta ve numuneler fırına yerleştirilmeden önce ön ısıtma uygulanmaktadır. Fırın içindeki sıcaklık homojenliğinin  $\pm 5$  °C aralığında tutulması önerilir (Durmuş ve ark., 2003).

AA2024 gibi çökeltme sertleşmesi alaşımlarında çözeltiye alma sonrası malzeme, oldukça kırılğan ve gerilimli bir hâlde olur. Bu nedenle, su verme işlemiyle bu yapı hızlıca dondurulmazsa ön çökelti oluşabilir ve yaşlandırma işleminin etkinliği düşer. Dolayısıyla çözeltiye alma işleminin hemen ardından, bekleme yapılmaksızın su verme adımı başlatılmalıdır (Yücel, 2024).

**Tablo 1.3.** Çözeltiye alma parametreleri – AA2024 için önerilen aralıklar (Varol Özkavak ve Bıçaklı, 2018)

Alaşım	Sıcaklık (°C)	Süre (dk)	Atmosfer	Amaç
AA2024	495–505	20–40	Hava (kontrollü)	Aşırı doymuş çözelti oluşturmak

Sonuç olarak, çözeltiye alma işlemi, çökeltme sertleşmesi sürecinin başarıya ulaşmasında temel teşkil eden bir adımdır. Bu işlemde oluşturulan başlangıç mikroyapı, yaşlandırma evresinde oluşacak çökelti boyutunu, dağılımını ve mekanik etkililiğini doğrudan belirleyecektir. Bu nedenle, uygulanacak sıcaklık ve süre parametreleri hassasiyetle belirlenmeli ve işlem ortamı dikkatle kontrol edilmelidir.

### 1.6.3. Su verme

Su verme işlemi, çökeltme sertleşmesi mekanizmasının ikinci aşamasını oluşturur ve çözeltiye alma işlemiyle yüksek sıcaklıkta elde edilen aşırı doymuş katı çözelti yapısının, oda sıcaklığına ani ve hızlı bir şekilde soğutularak sabitlenmesini amaçlar. Bu işlem sırasında çözünmüş alaşım elementlerinin çökelti hâlinde ayrışmasına fırsat verilmeden, atomlar metastabil konumlarında "kilitlenmiş" olur. Böylece yaşlandırma işlemi için uygun bir başlangıç mikroyapısı elde edilir (Afzal ve ark.; Koçdağ, 2019).

AA2024 gibi çökelme sertleşmesine uygun alüminyum alaşımlarında su verme işlemi çoğunlukla su banyosu ile gerçekleştirilir. Su sıcaklığı genellikle 20–60 °C aralığında tutulur. Bu aralık, yeterli soğutma hızını sağlarken termal şok etkisini azaltmak için tercih edilir. Su verme işleminde amaç, yaşlandırma başlamadan önce GP zonlarının kontrolsüz oluşumunu engellemektir. Aksi durumda, su verme sırasında oluşan ön çökeltiler ilerideki yaşlandırma sürecinin etkinliğini düşürür (Akyüz ve Şenaysoy, 2014).

Su verme işleminin temel hedefleri:

- Aşırı doymuş katı çözeltilerin oda sıcaklığında korunması,
- Erken çökelti oluşumunun (GP zonları) önlenmesi,
- Yaşlandırma evresi için atomik düzenin sabitlenmesi,
- Homojen ve kararlı mikroyapı elde edilmesi.

Soğutma Hızının Önemi

Soğutma hızı, çökelme sertleşmesi mekanizması üzerinde doğrudan belirleyici bir role sahiptir. Yetersiz soğutma hızları, alaşım elementlerinin difüzyon yoluyla GP zonları oluşturmasına neden olarak çökeltilerin boyut ve dağılımının kontrolünü zorlaştırır. Ayrıca, matris içerisinde kararsız fazların rastgele yerleşimine yol açarak hem sertlik hem de süneklik üzerinde olumsuz etkilere neden olabilir (Güven ve Delikanlı, 2012).

Öte yandan aşırı hızlı soğutma durumunda, özellikle kalın kesitli parçalar veya karmaşık geometri numunelerde şu riskler ortaya çıkabilir:

- İç gerilmeler: Sıcaklık gradyanlarının yüksek olması nedeniyle hacimsel genleşmeler eşit dağılmaz.
- Çarpılma ve çatlak oluşumu: Malzeme geometrisinin ani soğumaya tepkisi sonucu boyutsal stabilite bozulabilir.
- Yüzey deformasyonları: Soğuma sırasında oluşan çekme gerilmeleri çatlak başlatabilir.

Bu nedenlerle, özellikle hassas uygulamalarda polimer çözeltiler veya yağlı su banyoları gibi modifiye edilmiş su verme ortamları tercih edilebilmektedir. Bunlar daha kontrollü bir soğuma sağlar (Durmuş ve ark., 2003).

AA2024 Alaşımı İçin Önerilen Su Verme Koşulları:

**Tablo 1.4.** AA2024 için su verme parametreleri (Yücel, 2024)

Parametre	Değer / Aralık	Açıklama
Su sıcaklığı	20–60 °C	Daha düşük sıcaklık daha hızlı soğuma sağlar
Soğutma ortamı	Su (karıştırmalı)	Termal homojenlik için karıştırma önemlidir
Süre	10–20 saniye	Numunenin tüm kütlesi oda sıcaklığına ulaşmalı
Bekleme süresi	0 saniye (gecikmesiz)	Çözeltiye alma sonrası doğrudan soğutma yapılmalı

Not: Gecikmesiz geçiş, ön çökeltileri engellemek için hayati önemdedir (Yücel, 2024).

#### Kritik Hususlar

- Numuneler çözeltiye alma fırınından çıkar çıkmaz hemen suya daldırılmalıdır.
- Su banyosunda karıştırma uygulanarak sıcaklık farkları minimize edilmelidir.
- İşlem sonrası numunelerde eğilme, çatlama gibi fiziksel değişimler gözlemlenmeli ve gerekiyorsa düzeltici tedbirler alınmalıdır.

Sonuç olarak, su verme işlemi çökelme sertleşmesinin en hassas aşamalarından biridir. Yanlış uygulanması durumunda, yaşlandırma süreci istenen sertlik ve dayanım artışını sağlayamayabilir. Bu nedenle işlem parametreleri dikkatle belirlenmeli, soğutma ortamı, numune geometrisi ve geçiş süreleri profesyonelce kontrol edilmelidir. Takip eden adım olan yaşlandırma işlemi ise bu yapı üzerine inşa edilecek ve çökeltilerin kontrollü gelişimi sağlanacaktır.

#### 1.6.4. Doğal ve yapay yaşlandırma

Çözeltiye alma ve ardından su verme işlemlerinin tamamlanmasıyla, alaşımın mikroyapısı aşırı doymuş bir katı çözelti hâline gelir. Bu yapı, termodinamik olarak kararsızdır ve zaman içinde atomlar bir araya gelerek ikinci faz çökeltileri oluşturur. İşte bu çökeltilerin oluştuğu, büyüdüğü ve matris içerisinde dağıldığı sürece yaşlandırma adı verilir. Yaşlandırma işlemi, uygulanma sıcaklığına bağlı olarak doğal yaşlandırma ve yapay yaşlandırma olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilir (Avner, 1974; Akyüz ve Şenaysoy, 2014).

Doğal yaşlandırma, çözeltiye alma ve su verme işlemlerinden sonra numunenin oda sıcaklığında bekletilmesiyle gerçekleşir. Bu sıcaklık genellikle 20–25 °C aralığındadır. Süreç birkaç gün ile birkaç hafta arasında devam edebilir. Bu yöntemde atom difüzyonu düşük hızda gerçekleştiğinden, oluşan çökeltiler genellikle çok küçük boyutludur ve çoğunlukla GP zonları şeklindedir. GP zonları, kristal yapıyla tamamen uyumlu olduklarından dislokasyon hareketini etkin biçimde sınırlarlar (Yücel, 2024).

AA2024 gibi Al–Cu–Mg alaşımlarında doğal yaşlandırma ile elde edilen mukavemet artışı sınırlıdır. Doğal yaşlandırmanın avantajları arasında ekipman gerektirmemesi, düşük enerji tüketimi ve düşük sıcaklıklarda stabilite sağlanması bulunurken; sınırlı çökelme yoğunluğu nedeniyle elde edilen mekanik özellikler yapay yaşlandırmaya göre düşüktür.

Yapay yaşlandırma, çökeltilerin oluşumunu yüksek sıcaklıklarda hızlandırmak amacıyla uygulanan ısıl işlemdir. Bu işlem sırasında numune genellikle 160–200 °C aralığında, belirli bir süre (saatler mertebesinde) fırında bekletilir. Bu sıcaklık aralığında atomların difüzyon kabiliyeti artar ve GP zonlarından başlayarak S' ve S fazlarına kadar çökeltme fazları gelişir (Afzal ve ark., 2013).

AA2024 alaşımı için yaygın yapay yaşlandırma sıcaklıkları arasında 190 °C yer almaktadır. Bu tez kapsamında da yapay yaşlandırma işlemi bu sıcaklıkta gerçekleştirilmiş ve süreler 5, 10 ve 15 saat olarak belirlenmiştir. Yapay yaşlandırma sonucunda elde edilen bu durum, alaşımın maksimum sertlik ve mukavemet sunduğu fazdır.

**Tablo 1.5.** Doğal ve yapay yaşlandırmanın karşılaştırılması (Radutoiu ve ark., 2015)

Özellik	Doğal Yaşlandırma	Yapay Yaşlandırma
Sıcaklık Aralığı	20–25 °C	160–200 °C
Süre	Günler ila haftalar	Saatler
Enerji İhtiyacı	Düşük	Yüksek
GP Zonları	Baskın	Başlangıçta oluşur
S' / S Fazları	Oluşmaz	Gelişir ve yoğunlaşır
Sertlik / Mukavemet	Orta	Yüksek

Yapay yaşlandırmanın etkinliği, yaşlandırma süresi ve sıcaklığının doğru seçilmesine bağlıdır. Kısa süreli yaşlandırmalarda çökeltme fazları yeterince oluşmazken, çok uzun süreli uygulamalarda çökeltiler büyür ve “aşırı yaşlanma” adı verilen istenmeyen faz evrimi gerçekleşir. Bu konular 3.5 ve 3.6 başlıklarında ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

AA2024 için Yaşlandırma Koşulları (Bu Tezde Uygulanan)

- Yaşlandırma sıcaklığı: 190 °C
- Yaşlandırma süreleri: 5 saat, 10 saat, 15 saat
- Ortam: Dolaşımli fırın, atmosferik basınçta
- Amaç: Pik sertlik – aşırı yaşlanma geçişini gözlemlemek

Sonuç olarak, yaşlandırma işlemi, çökeltme sertleşmesi sürecinin mikroyapısal gelişimini belirleyen en kritik aşamadır. AA2024 gibi alaşımlarda doğru yaşlandırma parametreleri seçilerek, istenilen mukavemet, süneklik ve sertlik özellikleri arasında optimum denge sağlanabilir. Bu dengenin kontrolü, endüstriyel uygulamalar açısından büyük önem taşır.

### 1.6.5. Yaşlandırma kinetiği

Yaşlandırma kinetiği, çökeltme sertleşmesinin en hassas ve belirleyici aşamalarından biridir. Bu kavram, çökeltilerin oluşumu, büyümesi, kararlılık kazanması ve dağılımı gibi mikroyapısal olayların sıcaklık ve zaman bağımlı evrimini ifade eder. Özellikle çökeltilerin türü, boyutu ve yoğunluğu, yaşlandırma süresi boyunca sürekli değişim gösterdiğinden, mekanik özelliklerde meydana gelen artış veya düşüşler bu kinetik sürece doğrudan bağlıdır (Avner, 1974; Afzal ve ark., 2013).

#### Çökeltme Sürecinin Kinetik Aşamaları:

AA2024 alaşımı özelinde, yaşlandırma işlemi sırasında aşağıdaki mikroyapısal dönüşüm sıralaması gözlemlenir:

- Başlangıç evresi (İndüksiyon fazı):

Su verme işlemiyle elde edilen aşırı doymuş katı çözelti (SSSS), oda sıcaklığına soğutulduktan sonra belli bir süre difüzyon hareketsizliğinde kalır. Bu aşamada gözle görülür bir çökelti oluşumu gerçekleşmez.

- Çekirdeklenme ve GP zonlarının oluşumu:

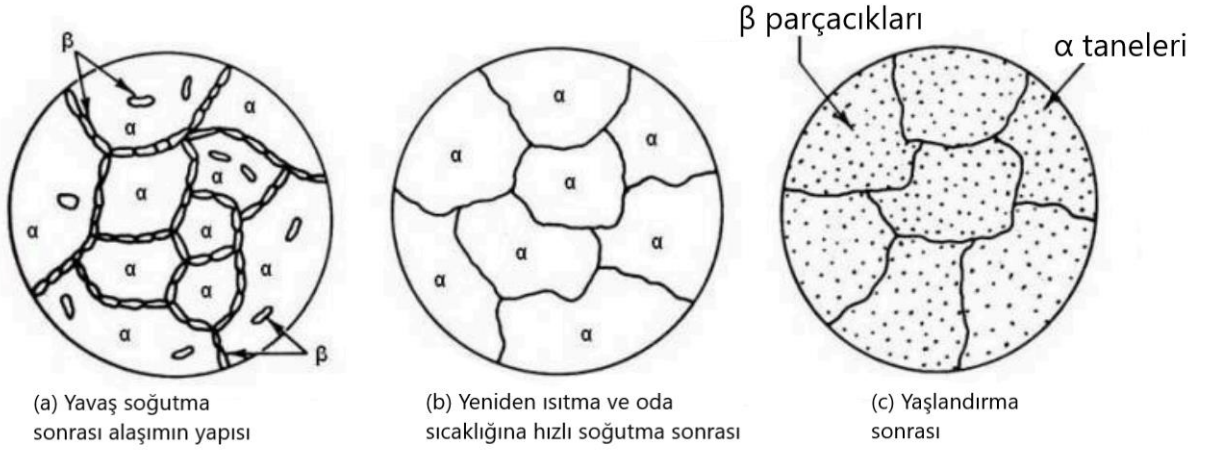
Atomlar, düşük enerjili konumlarda kümelenerek GP bölgelerini oluşturur. Bu küçük, matrisle uyumlu çökeltiler, sertlikte ilk artışı sağlar.

- Büyüme evresi (S' fazı):

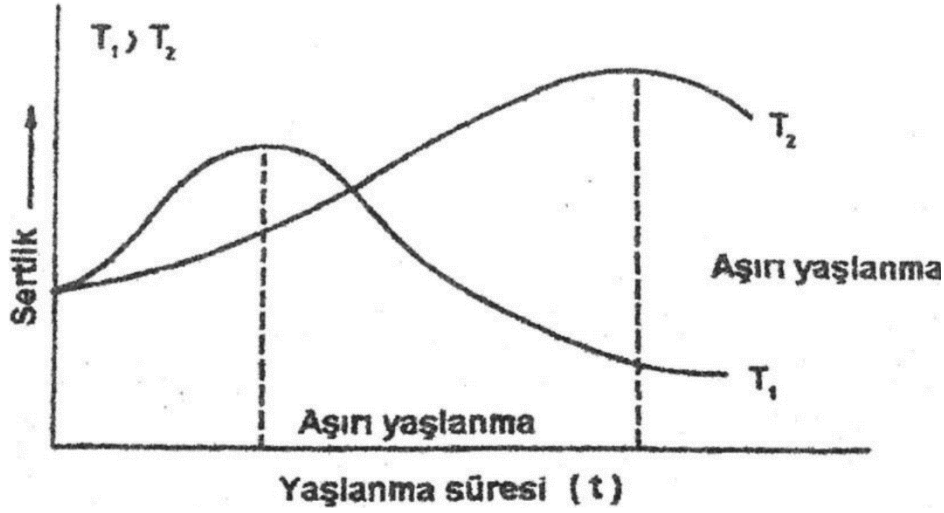
Yaşlandırma sıcaklığı etkisiyle GP zonları büyüyerek yarı kararlı S' fazlarına dönüşür. Bu fazlar, dislokasyonları en etkin şekilde engelledikleri için pik sertlik seviyesine ulaşılır.

- Kararlı faza dönüşüm (S fazı):

Süre uzadıkça S' fazları büyür, kararlı ve daha iri S ( $Al_2CuMg$ ) fazına dönüşür. Bu noktadan sonra çökeltiler dislokasyon hareketini daha az sınırlar; mekanik özelliklerde düşüş başlar.



**Şekil 1.3.** Yaşlandırma öncesi, su verme ve yaşlandırma sonrası mikroyapılar (85A%-15B% alaşımının mikroyapısı) (Avner, 1974)



**Şekil 1.4.** Yaşlandırma (Kayalı, 1991)

Yaşlandırma Sıcaklığı ve Difüzyon:

Yaşlandırma kinetiği büyük ölçüde sıcaklığa bağlıdır çünkü çökeltilerin oluşumu ve büyümesi difüzyon kontrollü bir olaydır. Sıcaklık arttıkça atomların difüzyon kabiliyeti artar ve çökeltiler daha hızlı oluşur. Bu nedenle yüksek sıcaklıklarda pik sertlik daha erken elde edilir, ancak aynı zamanda çökeltiler daha hızlı büyüyerek aşırı yaşlanma daha çabuk gerçekleşir (Güven ve Delikanlı, 2012).

Örnek olarak:

**Tablo 1.6.** Yaşlandırma sıcaklığına bağlı olarak pik sertlik süresi ve aşırı yaşlanma başlangıç süresi (Yücel, 2024)

Yaşlandırma Sıcaklığı	Pik Sertlik Süresi	Aşırı Yaşlanma Başlangıcı
160 °C	~12–15 saat	>25 saat
190 °C	~8–10 saat	>15 saat
200 °C	~5–7 saat	>10 saat

Açıklama: Tablo 1.6, AA2024 ve benzeri çökeltme sertleşmesine uygun alüminyum alaşımlarında yaşlandırma sıcaklığının çökelti oluşum hızına etkisini genel literatür verilerine dayalı olarak göstermektedir. Sıcaklık arttıkça çökelti oluşumu hızlanmakta, ancak aynı zamanda aşırı yaşlanma da daha erken gerçekleşmektedir. Süreler uygulanan fırın, numune geometrisi ve çözeltiye alma kalitesine bağlı olarak değişebilir.

Bu Tezde Uygulanan Kinetik Yaklaşım:

Tez kapsamında AA2024 numunelere uygulanan yaşlandırma işlemleri, 190 °C sıcaklıkta ve 5 saat, 10 saat ve 15 saat sürelerle gerçekleştirilmiştir. Bu parametreler, özellikle şu hedefler doğrultusunda seçilmiştir:

- 5 saat: GP zonlarının baskın olduğu erken evreyi temsil eder.
- 10 saat: S' fazlarının geliştiği ve pik sertliğe ulaşıldığı düşünülen orta evredir.
- 15 saat: S fazlarının baskın hâle geldiği ve aşırı yaşlanmanın başladığı geç evreyi temsil eder.

Bu üç farklı sürede elde edilen sertlik ve çekme dayanımı sonuçları, 6. bölümde deneysel verilerle birlikte analiz edilecektir. Böylece yaşlandırma süresi ile mekanik özellikler arasındaki ilişki hem teorik hem de uygulamalı olarak ortaya konacaktır.

Kinetik Kontrolün Önemi

Yaşlandırma süresi ve sıcaklığı yanlış belirlendiğinde:

- Kısa süre → Yetersiz çökeltme → Düşük sertlik ve dayanım
- Uzun süre → Aşırı yaşlanma → Gevrekleşme ve dayanım kaybı
- Yüksek sıcaklık → Hızlı evrim + kontrolsüz büyüme
- Düşük sıcaklık → Yavaş evrim + uzun işlem süresi

Bu nedenlerle yaşlandırma kinetiği, sadece mikroyapı mühendisliği açısından değil, üretim süreci ve enerji verimliliği gibi pratik açılardan da kritik öneme sahiptir (Siqueira ve ark., 2019; Koçdağ, 2019).

Sonuç olarak, yaşlandırma kinetiği çökeltme sertleşmesinin performansını doğrudan belirleyen, sıcaklık ve zaman ekseninde optimize edilmesi gereken temel bir parametredir. Tezde incelenen 5–10–15 saatlik yaşlandırma süreleri bu bağlamda

sistematik bir değerlendirme için uygun aralıklar sunmakta ve alaşımın mikroyapı-mekanik performans ilişkisini açığa çıkarmaktadır.

#### 1.6.6. Pik sertlik ve aşırı yaşlanma

Çökeltme sertleşmesiyle elde edilen mekanik özelliklerin maksimum düzeye ulaştığı noktaya pik sertlik adı verilir. Bu durum, genellikle S' (yarı kararlı) çökeltilerinin mikroyapı içinde en yoğun ve ideal boyutta bulunduğu aşamaya karşılık gelir. Bu çökeltiler, dislokasyonların hareketini en etkin şekilde sınırlar ve böylece alaşımın çekme dayanımı, akma gerilmesi ve sertliği en yüksek seviyeye ulaşır (Afzal ve ark., 2013; Yücel, 2024).

Ancak yaşlandırma işlemi, pik sertliğin elde edilmesinden sonra da sürdürülürse, çökeltiler büyür, şekil değiştirir ve kararlı S ( $Al_2CuMg$ ) fazına dönüşmeye başlar. Bu durum, aşırı yaşlanma olarak adlandırılır ve mekanik özelliklerde gerilemeye yol açar. Özellikle süneklik azalmaya devam ederken, dayanım ve sertlikte düşüş gözlemlenir (Akyüz ve Şenaysoy, 2014).

Pik Sertlik Aşaması:

Pik sertlik, yaşlandırma sürecinin ideal süresinde ve sıcaklığında elde edilir. Bu evrede:

- S' fazı çökeltiler matrisle yarı uyumlu, ince, yaygın ve homojen şekilde dağılmıştır.
- Dislokasyonlar, bu çökeltiler tarafından kesilmek zorunda kalır, bu da gerilme direncini artırır.
- Matris içinde çökelti-matris ara yüzey enerjisi optimum seviyededir.

Aşırı Yaşlanma Süreci:

Yaşlandırma süresi uzatıldığında, S' fazı çökeltiler büyür, matrisle uyumunu kaybeder ve kararlı S fazlarına dönüşür. Bu büyüme sonucunda çökeltiler:

- Daha seyrek ve düzensiz hâle gelir,
- Dislokasyonlar artık çökeltileri kesmek yerine etraflarından dolaşır (Orowan mekanizması),
- Bu da akma gerilmesi ve sertlikte azalmaya neden olur.

Aşırı Yaşlanmanın Neden Olduğu Mikroyapı Sorunları:

- Dislokasyon engelleme etkinliğinin azalması,
- Mikroyapı içinde çökelti kümelenmesi,
- Matrisle çökelti ara yüzey uyumunun bozulması,

- Çatlak başlama noktalarının artması,
- Yorulma dayanımında azalma.

Yüksek sıcaklıkta ve uzun sürede yaşlandırma uygulandığında, bazı AA2024 uygulamalarında istenmeyen şekilde gevrekleşme eğilimleri gözlemlenmiştir. Bu nedenle özellikle yapısal parçalarda (örneğin uçak bağlantı elemanları, rotor gövdesi gibi) pik sertlik evresinde işlem sonlandırılması önerilmektedir (Siqueira ve ark., 2019).

Bu Tezde Aşırı Yaşlanma Gözlemi:

- 5 saat yaşlandırma: S' fazlarının başlangıcı, mekanik özelliklerde ciddi artış
- 10 saat yaşlandırma: Pik sertlik seviyesine yakın sonuçlar
- 15 saat yaşlandırma: S fazlarının oluşmaya başladığı, aşırı yaşlanma eğiliminin başladığı aşama

Elde edilen veriler, 6. bölümde Brinell sertliği, çekme dayanımı ve SEM incelemeleriyle desteklenerek analiz edilecektir.

Sonuç olarak;

Pik sertlik, çökeltme sertleşmesinin en verimli aşamasını temsil ederken, aşırı yaşlanma kontrolsüz çökelti büyümesi nedeniyle mekanik performansın gerilemesine neden olur. Bu bağlamda, yaşlandırma parametrelerinin doğru belirlenmesi, alaşımın performansını maksimize etmek açısından kritik önem taşımaktadır. Aşırı yaşlanmanın önüne geçilmesi, özellikle yorulma dayanımı ve kırılma tokluğu gibi uzun ömür performans kriterleri açısından da büyük önem taşır (Radutoiu ve ark., 2015; Yücel, 2024).



## 2. ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Alüminyum alaşımları, sahip oldukları yüksek özgül mukavemet, iyi şekillendirilebilirlik, korozyon direnci ve düşük yoğunluk gibi avantajlar sayesinde otomotiv, havacılık, uzay ve savunma sanayi gibi alanlarda yaygın biçimde kullanılmaktadır. Bu alaşımlar arasında, bakır esaslı ve çökelme sertleşmesine uygun olan AA2024 alüminyum alaşımı, özellikle yüksek mukavemet ve yorulma dayanımı gerektiren uygulamalar için tercih edilmektedir (Güven ve Delikanlı, 2012)

AA2024 alüminyum alaşımının temel güçlenme mekanizması, çökelme sertleşmesi (yaşlandırma) işlemidir. Bu işlem, genellikle üç ana aşamadan oluşur: çözeltiye alma, ani soğutma ve yaşlandırma. Çözeltiye alma sırasında malzeme yüksek sıcaklıkta tek fazlı yapıya getirilir ve ardından hızla soğutulur bu yapı korunur. Yaşlandırma işlemi ise bu süper doymuş katı çözeltide çökeltilerin zamanla oluşmasını sağlar. Yaşlandırma süresi ve sıcaklığı, çökeltilerin morfolojisini ve dağılımını doğrudan etkileyerek mekanik özelliklerde belirgin değişikliklere neden olur (Yücel, 2024).

AA2024 alaşımında genellikle doğal yaşlanma (oda sıcaklığında) ve yapay yaşlandırma (sabit yüksek sıcaklıkta, örn. 160–190 °C aralığında) işlemleri uygulanmaktadır. Doğal yaşlanma uzun sürmesine karşın düşük sıcaklıkta meydana geldiğinden daha küçük ve dağınık çökelti oluştururken; yapay yaşlandırma daha kısa sürede çökelti oluşumunu tamamlayabilir ve daha belirgin mekanik güçlenme sağlayabilir. Ancak, yaşlandırmanın süresi çok uzun tutulduğunda, oluşan çökelti aşırı büyüyebilir ve bu da aşırı yaşlanma denilen olumsuz bir duruma yol açabilir. Aşırı yaşlanma, çekme mukavemeti ve sertlik değerlerinde düşüğe sebep olur (Afzal ve ark., 2013).

Bu bölümde, AA2024 alaşımına uygulanan yaşlandırma işleminin etkilerini ele alan literatür çalışmaları, belirli konu başlıkları altında ayrıntılı biçimde incelenmiştir. Literatürde yer alan önemli deneysel ve teorik çalışmalar aşağıdaki başlıklar altında analiz edilmiştir:

### 2.1. AA2024 Alüminyum Alaşımında Yaşlandırma Sertleşmesi Üzerine Yapılan Temel Çalışmalar

AA2024 alüminyum alaşımı, 2xxx serisi dövme alüminyumlar içerisinde yer alan, esas olarak bakır (Cu) katkılı bir alaşımdır. Bu yapı, çökelme sertleşmesi yoluyla mekanik özelliklerinde ciddi iyileşme sağlayabilen bir sistem sunar. Özellikle yüksek mukavemet

ve yorulma dayanımı gibi gereksinimlerin öne çıktığı havacılık ve savunma sanayi uygulamalarında, AA2024 alaşımı yoğun biçimde tercih edilmektedir (Güven ve Delikanlı, 2012).

Çökeltme sertleşmesi, üç temel aşamadan oluşur: çözeltiye alma, ani soğutma ve yaşlandırma. Çözeltiye alma sırasında alaşım, yüksek sıcaklıkta tek fazlı bir yapıya getirilir ve ardından ani soğutmayla bu yapı korunur. Yaşlandırma süreci boyunca matris içerisinde atomik düzeyde dağılmış olan bakır ve magnezyum gibi katkı elementleri, belirli bir düzenle GP bölgeleri, yarı kararlı S' fazı ve sonunda kararlı S ( $Al_2CuMg$ ) fazı çökeltileri oluşturur. Bu çökeltiler, dislokasyon hareketini zorlaştırarak malzemenin mukavemetini ve sertliğini artırır (Afzal ve ark., 2013).

Atik ve ark. (2001) tarafından yapılan klasikleşmiş bir çalışmada, AA2024 alaşımı önce 492 °C'de 3 saat süreyle çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuş, ardından farklı yaşlandırma sıcaklıklarında (0 °C, 125 °C ve 190 °C) çeşitli sürelerle yaşlandırılmıştır. Özellikle 190 °C'de 8.5 saatlik yaşlandırma süresi sonunda en yüksek sertlik ve çekme mukavemeti değerlerine ulaşıldığı gözlemlenmiştir. Daha uzun sürelerde ise aşırı yaşlanma nedeniyle bu değerlerin azaldığı rapor edilmiştir. Bu çalışma, yaşlandırma süresinin ve sıcaklığının optimizasyonunun gerekliliğini vurgulamaktadır.

Yücel (2024) tarafından yapılan güncel bir yüksek lisans tezinde ise, AA2024 alaşımına farklı ani soğutma ortamları (saf su, metanol, tuzlu su, glikol vb.) uygulanmış ve ardından doğal yaşlanma ile yapay yaşlandırma (170 °C'de kısa süreli ısıtılı şoklarla) karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, kısa süreli yüksek sıcaklık uygulamaları yaşlanma sürecini hızlandırmış ve sertlik ile mukavemette klasik doğal yaşlanmaya kıyasla daha etkili sonuçlar elde edilmiştir. Bu yaklaşım, üretim süresini kısaltmak isteyen endüstriyel uygulamalar için önemli bir çözüm yolu olarak öne çıkmaktadır.

Siqueira ve ark. (2019) tarafından yürütülen başka bir çalışmada, AA2024 alaşımına 415 °C'de süper ısıtılı işlem, ardından 495 °C'de çözeltiye alma işlemi uygulanmış ve numuneler 190 °C'de 2, 4, 6 ve 8 saat yaşlandırılmıştır. Sonuçlar, yaşlandırma süresi arttıkça çekme ve akma dayanımında artış görüldüğünü, ancak 8 saatten sonra çökeltilerin aşırı büyümesiyle mekanik özelliklerde düşüş meydana geldiğini göstermiştir. Bu bulgular, yaşlandırma süresinin yalnızca sertlik değil, aynı zamanda süneklik ve dayanım gibi özellikler üzerinde de doğrudan etkili olduğunu kanıtlamaktadır.

Genel olarak literatür, AA2024 alaşımında çökeltme sertleşmesinin etkinliğini doğrudan yaşlandırma süresi ve sıcaklığı belirlediğini ortaya koymaktadır. Sıcaklık

yükseldikçe difüzyon hızının artması, çökeltilerin daha hızlı oluşmasına ve pik sertliğin daha erken elde edilmesine neden olur. Ancak sıcaklık veya süre aşırı olduğunda, çökeltiler büyüyerek mekanik özelliklerde düşüşe yol açar. Bu bağlamda yaşlandırma işleminin optimize edilmesi, malzemenin performansını maksimize etmek açısından kritik öneme sahiptir.

## **2.2. Yaşlandırma Süresi ve Sıcaklığının AA2024 Alaşımının Mekanik Özelliklerine Etkisi**

Çökeltme sertleşmesine uygun olan AA2024 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri, uygulanan yaşlandırma süresi ve sıcaklığına son derece duyarlıdır. Yaşlandırma işlemiyle matris içinde oluşan GP bölgeleri, yarı kararlı S' fazı ve kararlı S (Al<sub>2</sub>CuMg) fazı gibi çökeltiler, alaşımın dislokasyon hareketine karşı direncini artırır. Ancak bu çökeltilerin oluşum hızı ve büyüklüğü büyük ölçüde yaşlandırma parametrelerine bağlıdır. Bu nedenle, optimum mekanik özelliklere ulaşabilmek için yaşlandırma süresi ve sıcaklığının dikkatle belirlenmesi gerekmektedir (Güven ve Delikanlı, 2012).

Yaşlandırma süresi uzadıkça sertlik ve mukavemet artar, ancak belirli bir noktadan sonra çökeltilerin büyümesi ve matrisle etkileşimin azalması sebebiyle sertlik ve dayanım değerlerinde düşüş meydana gelir. Bu durum, "aşırı yaşlanma" olarak tanımlanır ve genellikle çan eğrisi şeklindeki mekanik özellik–zaman grafiğinde açıkça gözlemlenir (Afzal ve ark., 2013).

Coşkun (2020), AA2024 alaşımını 520 °C'de 2 saat süreyle çözeltiye alma işlemine tabi tutmuş, ardından 190 °C'de 4, 8, 24 ve 72 saat süreyle yaşlandırmıştır. Elde edilen mekanik test sonuçlarına göre; 24 saat yaşlandırma sonunda maksimum akma ve çekme mukavemetine ulaşıldığı, 72 saat sonunda ise aşırı yaşlanma sebebiyle mekanik özelliklerde gerileme olduğu belirlenmiştir. Çalışma, yaşlandırma süresi uzadıkça çökeltilerin boyutlarının arttığını ve bu büyümenin mekanik dayanımı olumsuz etkilediğini göstermiştir.

Benzer şekilde Afzal ve ark. (2013) tarafından yürütülen çalışmada, 190 °C'de gerçekleştirilen yaşlandırmada optimum süre 4 ila 6 saat aralığı olarak tespit edilmiştir. Çekme ve akma mukavemeti bu süre boyunca artarken, 8 saatlik yaşlandırma sonrası aşırı yaşlanmanın başladığı ve sertlik değerlerinde azalma meydana geldiği rapor edilmiştir. SEM analizleriyle çökelti yapısının büyüdüğü ve daha az etkili hale geldiği gözlemlenmiştir.

Atik ve ark. (2001) ise AA2024 alaşımında 492 °C'de 3 saat çözeltiye alma sonrası 0 °C (doğal yaşlanma), 125 °C ve 190 °C'de farklı sürelerle yaşlandırma işlemi uygulamıştır. Çalışmada 190 °C'de yaklaşık 8.5 saatlik yaşlandırma süresi sonunda en yüksek sertlik ve mukavemet değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir. Bu bulgu, 190 °C'nin çökeltme kinetiği açısından verimli bir sıcaklık aralığı olduğunu ve 6–10 saatlik sürelerin optimum performansa karşılık geldiğini göstermektedir.

Yücel (2024) ise, doğal yaşlanmanın zaman alıcı etkisini ortadan kaldırmak amacıyla, kısa süreli yüksek sıcaklık darbesi uygulaması yöntemiyle 170 °C sıcaklıkta 60 saniyelik ısıl şoklar uygulayarak yaşlandırma süresini kısaltmayı hedeflemiştir. Çalışmada, 10 dakikalık doğal yaşlanma sürecinin ardından 170 °C sıcaklıkta uygulanan 11 adet ısıl darbenin, klasik yaşlandırma süresine kıyasla çok daha kısa sürede yüksek sertlik ve mukavemet sağladığı gösterilmiştir. Bu yöntem, yaşlandırma kinetiğinin, ısıl darbe frekansı ve süresiyle optimize edilebileceğini ortaya koymaktadır.

Tüm bu çalışmalar göstermektedir ki, AA2024 alaşımı için 180–190 °C sıcaklık aralığında gerçekleştirilen yaşlandırma işlemleri, uygun sürelerle birleştirildiğinde mekanik performans açısından en başarılı sonuçları vermektedir. Bu bağlamda 6–10 saat aralığı hem pik sertlik hem de maksimum çekme ve akma dayanımı açısından literatürde en sık önerilen süre aralığı olarak öne çıkmaktadır. Ancak yaşlandırma süresi ve sıcaklığının etkisi, çözeltiye alma sıcaklığı, soğutma hızı ve ön işlem geçmişi gibi faktörlere de bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

### **2.3. Sertlik Ölçümleri Üzerine Literatür İncelemesi: Brinell Ölçümleri ve Yorumları**

Sertlik ölçümü, bir malzemenin plastik deformasyona karşı gösterdiği direnci belirlemek amacıyla kullanılan temel mekanik testlerden biridir. Isıl işlem görmüş alaşımlarda, özellikle çökeltme sertleşmesi gibi termal süreçlerin etkisini değerlendirmede Brinell sertlik testi yaygın biçimde tercih edilmektedir. AA2024 gibi çökeltme ile sertleştirilen alüminyum alaşımlarında, yaşlandırma sürecinde oluşan çökeltiler sertlikte doğrudan etkili olmakta; bu nedenle, Brinell sertlik değişimi çökeltme kinetiğini yorumlamak açısından oldukça değerlidir.

Fallah Tafti (2018) gerçekleştirdiği çalışmada, AA2024 alaşımı 493 °C'de çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuş ve ardından farklı sürelerde doğal yaşlandırmaya bırakılmıştır. Mikrosertlik değerleri incelendiğinde, ilk 4 saatlik yaşlandırma sürecinde sertliğin 94% oranında arttığı, 4 saatten sonra ise artış hızının yavaşladığı rapor edilmiştir.

Bu eğilim, çökelti dağılımının artan homojenlik ve koalesans ile denge fazlara evrilmeye başladığını göstermektedir.

Benzer şekilde, Reis (2012), AA2024 numunelerine farklı sıcaklıklarda (190 °C ve 208 °C) uygulanan yapay yaşlandırma işlemleri sonrası Brinell sertlik testleri gerçekleştirmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 505 °C’de çözeltiye alınan ve ardından 208 °C’de 2 saat yaşlandırılan numunede maksimum Brinell sertlik değeri olan 147.7 HB ölçülmüştür. Sertlikteki bu artış, özellikle S’ ve S fazı çökeltilerinin yoğunluğunun ve matrisle etkileşiminin maksimum seviyeye ulaşmasıyla açıklanmıştır.

Siqueira (2019) çalışmasında ise hem yaşlandırma süresi hem de soğuk plastik deformasyonun sertliğe etkisi analiz edilmiştir. Yapılan deneyler sonucunda, yaşlandırma süresi sabit tutulduğunda bile deformasyon oranı arttıkça Vickers sertlik değerinde belirgin artışlar gözlemlenmiştir. Soğuk haddeleme sonrası yaşlandırılan numunelerin, çözeltiye alma sonrası yaşlandırılanlara kıyasla daha kısa sürede daha yüksek sertliğe ulaştığı belirtilmiştir. Bu durum, dislokasyon yoğunluğunun çökelti sertleşmesine katkı sağladığını göstermektedir.

Erdoğan (2014) gerçekleştirdiği doğal yaşlandırma temelli çalışmada, AA2024 numuneleri 530 °C’de çözeltiye alma sonrası farklı sürelerde (1 hafta, 1 ay, 2 ay) doğal yaşlandırmaya bırakılmış ve her süre sonunda sertlik testleri yapılmıştır. Sonuçlar, 1 aylık doğal yaşlandırma sonrası intermetalik FeAl fazlarının artışıyla birlikte en yüksek Vickers sertlik değerlerine ulaşıldığını göstermiştir. Ancak, yaşlandırma süresinin 2 aya uzatılması ile bu fazların yeniden çözünmesi veya kararsız fazlara dönüşmesi nedeniyle sertlikte azalma tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, Brinell ve Vickers gibi sertlik ölçümleri, AA2024 alaşımında yaşlandırma süreci boyunca meydana gelen çökelti evrimini izlemek için kritik öneme sahiptir. Sertlik-süre eğrilerinin çan eğrisi formunda olması, tipik bir çökelti sertleşmesi davranışını yansıtır. Maksimum sertlik noktası, çökeltilerin matris ile yüksek düzeyde koherent olduğu evreyi temsil ederken, daha uzun yaşlandırma süreleri aşırı yaşlanma nedeniyle sertlikte düşüşe neden olmaktadır.

#### **2.4. Çekme Testi Bulguları ile Yaşlandırma Davranışının Karşılaştırmalı Değerlendirilmesi**

Çekme testi, yaşlandırma ısıl işlemlerinin AA2024 gibi çökelti sertleşmesi gösterebilen alüminyum alaşımları üzerindeki etkilerini değerlendirmek için başvurulan temel mekanik testlerden biridir. Bu testler ile elde edilen akma dayanımı, çekme

dayanımı ve uzama gibi parametreler, çökelti oluşumunun mikroyapı üzerindeki yansımalarını doğrudan yansıtır.

Yılmaz (2002) tarafından yürütülen çalışmada, AA2024 (Etial-24) alaşımına 510, 520 ve 540 °C'de çözeltiye alındıktan sonra 150 °C'de 16 saatlik yapay yaşlandırma yapılmış ve çekme testi sonuçları analiz edilmiştir. Elde edilen veriler, çözeltiye alma sıcaklığı arttıkça yaşlandırma sonrası çekme mukavemetinin ve sertliğin arttığını göstermiştir. Özellikle 520 °C'de çözeltiye alınan ve ardından yaşlandırılan numuneler, dengeli çökelti dağılımı sayesinde en yüksek mukavemeti sunmuştur. Bu durum, yüksek sıcaklıkta daha fazla alaşım elementinin matriste çözünebilmesi ve yaşlandırma sırasında daha verimli çökelti oluşumu ile ilişkilendirilmiştir.

Radutoiu (2012), AA2024-T3 alaşımına uygulanan yapay yaşlandırma işlemlerini farklı sıcaklık ve sürelerde inceleyerek, çekme mukavemeti üzerindeki etkilerini ortaya koymuştur. 160 °C'de 10 saat yaşlandırılan numuneler ile 200 °C'de 5 saat yaşlandırılan numuneler karşılaştırıldığında, yüksek sıcaklıkta daha kısa sürede maksimum mukavemet değerlerine ulaşıldığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, 200 °C'de daha uzun sürede uygulanan yaşlandırmaların, çökeltilerin büyümesine ve dolayısıyla çekme mukavemetinde düşüşe neden olduğu saptanmıştır. Bu bulgular, yüksek sıcaklıkta aşırı yaşlanma etkisinin daha erken başladığını göstermektedir.

Alexopoulos (2017) ise AA2024-T3 alaşımına uygulanan fretting aşındırma etkisinin yaşlandırma süreciyle olan etkileşimini araştırmış ve farklı yaşlandırma koşullarında çekme testi sonuçlarını değerlendirmiştir. Özellikle ısıl işlem görmüş AA2024-T3 alaşımı üzerinde yapılan çekme testleri, yaşlandırma sonrası elde edilen mekanik özelliklerin fretting koşullarında nasıl değiştiğini göstermiştir. Çalışmada, yaşlandırma sonrası artan sertlik ve mukavemet değerlerinin, fretting yorgunluğu altında çatlak oluşumunu geciktirdiği; fakat mikroyapısal homojenliğin bozulması durumunda kırılma riskinin arttığı rapor edilmiştir. Bu durum, yaşlandırma işleminin yalnızca dayanımı artırmakla kalmayıp, mikroyapısal kararlılığı da optimize etmesi gerektiğini göstermektedir.

Sonuç olarak, yaşlandırma süresi ve sıcaklığı gibi parametrelerin çekme testinde elde edilen mekanik değerlere doğrudan etkisi vardır. Optimal çökelti boyutu ve dağılımı, belirli bir sıcaklık-süre kombinasyonunda elde edilerek hem mukavemet hem de süneklik açısından dengeli bir yapı sağlanabilir. Ancak yaşlandırma süresinin uzaması ya da sıcaklığın yüksek tutulması halinde aşırı yaşlanma oluşmakta; bu da çekme dayanımı ve uzama değerlerinde düşüşe neden olmaktadır.

## 2.5. Yaşlandırma Sürecinin Mikroyapısal Gelişime Etkisi ve SEM İncelemeleri

AA2024 alüminyum alaşımında yaşlandırma işlemi, yalnızca mekanik özelliklerde değil, aynı zamanda mikroyapısal evrimde de önemli değişikliklere neden olur. Bu değişim, çökeltme sertleşmesinin temelini oluşturan çökelti oluşumu ve dönüşüm süreçleri ile doğrudan ilişkilidir. Yaşlandırma sırasında, önce Cu ve Mg atomlarının difüzyonu ile GPB bölgeleri oluşur; ardından S' (yarı kararlı) ve nihayet kararlı S (Al<sub>2</sub>CuMg) fazları meydana gelir. Bu evrimsel süreç, çökelti boyutu, dağılım yoğunluğu ve morfolojisinde değişimlere yol açar ve dislokasyon hareketliliği üzerinde doğrudan etkili olur (Özkavak ve Bıçaklı, 2018).

SEM yöntemi, yaşlandırma sürecine bağlı olarak mikroyapısal değişimlerin karakterizasyonunda sıklıkla tercih edilen bir araçtır. Guía-Tello ve ark. (2022), yaşlandırma sonrası AA2024 alaşımında gözlenen çift sertleşme pikini GPB-II ve S' çökeltilerinin farklı oluşum zamanlarına bağlamıştır. Ayrıca, deformasyonun çökeltme dizilimini değiştirdiğini belirtmişlerdir.

El Garchani (2023), yaşlandırma sonrası AA2024 numunelerinde mikroyapıda oluşan çökeltileri SEM ile incelemiş, özellikle S ve S' fazlarının yapısal etkilerini detaylandırmıştır. Bu çökeltiler, matrisle yarı uyumlu yapıları sayesinde dislokasyonları sınırlayarak sertliği artırmıştır.

Özkavak ve Bıçaklı (2018) tarafından yürütülen bir başka çalışmada, 160 °C'de 12 saat yaşlandırılan numunelerde ince ve homojen çökeltilerle birlikte eğme dayanımında artış gözlemlenmiş; ısı işlemin süresi uzadıkça aşırı yaşlanma kaynaklı iri çökeltiler oluştuğu rapor edilmiştir.

Zhou (2023), ön yaşlandırma ve kriyo-haddeleme gibi işlemlerin ardından yaşlandırılan AA2024 alaşımlarında çökelti morfolojisini detaylı biçimde analiz etmiş, ön yaşlandırmanın çökeltme hızını artırarak daha ince ve dağınık çökeltiler elde edilmesini sağladığını belirtmiştir.

Roodgari ve Jamaati (2023) ise asimetrik soğuk haddeleme sonrası yaşlandırılan örneklerde yüksek miktarda kayma bandı oluştuğunu ve bu bölgelerde ince çökeltilerin yoğunlaştığını tespit etmiştir. Bu yapı, dislokasyon hareketini kısıtlayarak hem sertlik hem de çekme dayanımında belirgin artış sağlamıştır.

Haghdadi (2024) da benzer şekilde, doğal yaşlandırma sonrası soğuk haddelemeyle elde edilen yarı-uyumlu S' çökeltilerinin sertliği ve akma dayanımını artırdığını, SEM görüntülerinde bu çökeltilerin deformasyon bantları ile birlikte daha yoğun gözlemlendiğini belirtmiştir.

Özetle, SEM analizleri, yaşlandırma işleminin çökelti morfolojisi ve mikroyapı üzerindeki etkilerini ortaya koymada kritik bir araç olup; mekanik özelliklerdeki değişimin mikroskobik temellerini anlamada anahtar rol oynamaktadır.

### 3. MATERYAL VE METOT

Bu bölümde, AA2024 alüminyum alaşımı üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmaların tüm aşamaları detaylı bir şekilde açıklanmıştır. Öncelikle malzeme temini ve özellikleri belirtilmiş; ardından numune hazırlama süreci, uygulanan ısıtım işlem parametreleri, mekanik testler ve mikroyapı analizleri sistematik olarak sunulmuştur.

Uygulanan deneysel yöntemler, yaşlandırma işleminin AA2024 alaşımının mekanik ve mikroyapısal özellikleri üzerindeki etkilerini incelemeye yöneliktir. Çalışmada çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma gibi ısıtım işlem basamakları uygulanmış; sonrasında Brinell sertlik testi, çekme testi ve taramalı SEM ile karakterizasyon gerçekleştirilmiştir.

Her test aşamasında uluslararası kabul görmüş standartlar (özellikle ISO 9220, ASTM E10 ve ASTM E8M) temel alınmış, test cihazlarının kalibrasyonları üretici katalogları ve deney protokollerine göre doğrulanmıştır. Elde edilen veriler, yaşlandırma süresi ve sıcaklığı ile mekanik özellikler arasındaki ilişkiyi ortaya koymak amacıyla grafik ve tablo formatında değerlendirilmiştir.

#### 3.1. Materyal

##### 3.1.1. Malzeme özellikleri

Bu tez çalışmasında kullanılan deney malzemesi, havacılık ve savunma sanayiinde yaygın olarak tercih edilen AA2024 alüminyum alaşımıdır. Alüminyum (Al) matrisi içinde yer alan bakır (Cu), magnezyum (Mg) ve mangan (Mn) alaşım elementleri sayesinde bu alaşım; yüksek dayanım/ağırlık oranı, optimum yorulma dayanımı ve yeterli işlenebilirlik gibi özellikler sunmaktadır.

Kullanılan malzeme, Seykoç Alüminyum firmasından 200 mm x 40 mm x 15 mm ebatlarında düz plaka formunda tedarik edilmiştir. (Bkz. EK-1 SEYKOÇ – AA2024 Malzeme Sertifikası).

Malzemenin üretici sertifikasına göre kimyasal bileşimi ve fiziksel /mekaniksel özellikleri sırasıyla Tablo 3.1 ve Tablo 3.2’de sunulmuştur:

**Tablo 3.1.** AA2024 alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi (% Ağırlıkça) (Bkz. Ek 1: Seykoç alüminyum firması – AA2024 malzeme sertifikası, Ek 2: Altınay savunma firması– yakma yöntemi ile elde edilen kimyasal analiz sonuçları)

Element	Standart Minimum (%)	Standart Maksimum (%)	Test Sonucu (%)
Alüminyum (Al)	–	REM.	93.19
Bakır (Cu)	3.8	4.9	4.522
Magnezyum (Mg)	1.2	1.8	1.5548
Manganez (Mn)	0.3	0.9	0.7763
Demir (Fe)	–	0.5	0.101
Çinko (Zn)	–	0.25	0.0747
Silisyum (Si)	–	0.5	0.037
Titanyum (Ti)	–	0.15	0.0328
Kurşun (Pb)	–	–	0.0059
Lityum (Li)	–	–	0.0051
Nikel (Ni)	–	–	0.0049
Kalsiyum (Ca)	–	–	0.002
Krom (Cr)	–	0.1	0.0019
Berilyum (Be)	–	–	0.0007

**Tablo 3.2.** AA2024 alaşımının fiziksel ve mekanik özellikleri (Bkz. Ek 1: Seykoç – AA2024 Malzeme Sertifikası)

Özellik	Değer
Brinell Sertliği	134.7 HB
Akma Dayanımı	317 MPa
Çekme Dayanımı	476 MPa
Uzama (%ε)	23.5%

Bu özellikler, yaşlandırma işlemleriyle karşılaştırma yapabilmek adına başlangıç parametresi olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca kullanılan malzeme, çökeltme sertleşmesi mekanizması açısından ideal bir mikroyapıdadır ve literatürde benzer içeriklerle sıklıkla referans alınmaktadır.

### 3.1.2. Numune hazırlama

Kullanılan AA2024 alüminyum alaşımı, 200 mm × 40 mm × 15 mm ebatlarında düz plaka formunda Seykoç Alüminyum firmasından temin edilmiştir.

Bu çalışmada uygulanacak çekme testi (ASTM E8M-23), Brinell sertlik testi (ASTM E10) ve SEM mikroyapı analizleri için numune hazırlama süreci, ilgili uluslararası test standartlarına uygun şekilde gerçekleştirilmiştir. Numune hazırlığı sırasında uygulanan işlemler, yüzey kalitesini ve ölçüm doğruluğunu artırmak amacıyla frezeleme, taşlama ve parlatma işlemlerini içermektedir.

Brinell sertlik testleri için ise ASTM E10 standardı, çekme testleri için ASTM E8M (2023) standardında belirtilen ölçü ve toleranslara uygun şekilde tasarım yapılmıştır. Ayrıca mikroyapı analizleri için ASTM E3 ve E112 esas alınmıştır.

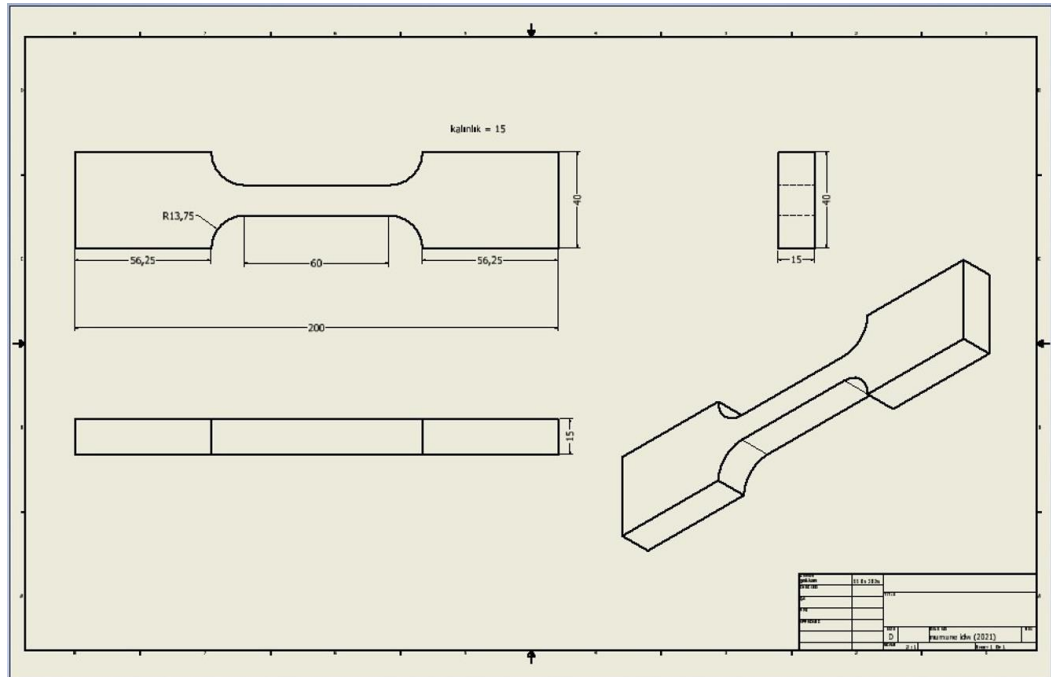
**Tablo 3.3.** Numune hazırlığında dikkate alınan test türleri ve uygulanan standartlar

Test Türü	Uygulanan Standartlar
Brinell Sertlik Testi	ASTM E10, ISO 6506
Çekme Testi	ASTM E8M, ISO 6892-1
SEM Analizi	ASTM E3, ASTM E112, ISO 4967

**Tablo 3.4.** ASTM E10 ve E8M standardına uygun çekme testi numune ölçüleri

Özellik	Seçilen Değer (Toleranslı)	Gerekeç
<b>Kalınlık (t)</b>	15 mm $\pm$ 0.1 mm	ASTM E10 standardına göre $\geq 10$ mm gereklidir.
<b>Paralel Genişlik (W)</b>	12.5 mm $\pm$ 0.05 mm	ASTM E8M standardına göre düz numuneler için önerilen genişliktir. Paralel test bölgesidir.
<b>Ölçüm Uzunluğu (L<sub>o</sub>)</b>	50 mm $\pm$ 0.5 mm	ASTM E8M standardında düz numuneler için ölçüm uzunluğudur. Deformasyon değerlendirmesi içindir.
<b>Paralel Bölge (L<sub>c</sub>)</b>	60 mm $\pm$ 1.0 mm	ASTM E8M standardına göre $\geq 60$ mm gereklidir. Uzatılmış bölgede homojenlik sağlar.
<b>Toplam Uzunluk (L)</b>	200 mm $\pm$ 2.0 mm	ASTM E8M standardında önerilen toplam numune uzunluğudur. Kavrama kolaylığı için önerilen uzunluktur.
<b>Kavrama Genişliği (B)</b>	40 mm $\pm$ 0.5 mm	ASTM E8M standardında önerilen kavrama genişliği ölçüsüdür. Tutucu ile uyumlu ölçüdür.
<b>Omuz Yarıçapı (r)</b>	13.75 mm $\pm$ 0.25 mm	Diğer ölçülere göre omuz geçişi için uygun yarıçap değeri hesaplanmıştır. Gerilim yığılmasını önlemek içindir.

Hazırlanan teknik çizim, AutoCAD Inventor programı kullanılarak oluşturulmuştur. (Bkz. Ek-4 – Numune Ölçüleri (Autocad Inventor)).



**Şekil 3.1.** Çekme testi numunesi teknik çizimi

Numuneler, Arslan CNC Freze ve Tel Erezyon firmasında CNC yöntemiyle hassas toleranslarla işlenmiştir. Kesim sonrası yüzeyler frezelenmiş, ardından taşlama ve el ile parlatma işlemlerine tabi tutularak çekme, sertlik ve SEM analizleri için uygun hâle getirilmiştir. (Bkz. Ek-5 – ARSLAN CNC – ASTM E8M/E10’a Uygun Numune Fotoğrafı).

### **3.1.3. Numune sayıları**

Brinell sertlik testi, geniş yüzeyli ve homojen yapılarda sıkça kullanılan bir yöntemdir. ASTM E10 ve ISO 6506 standartlarına göre, ortalama bir sertlik değeri elde edebilmek için farklı bölgelerden en az üç ölçüm yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada her numune üzerinde beş farklı bölgeden Brinell sertlik ölçümü yapılmıştır. Bu uygulama, yüzey homojenliğini değerlendirmek ve sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla tercih edilmiştir.

Çekme testi, malzemenin mekanik dayanım özelliklerinin (çekme dayanımı, akma dayanımı, uzama ve kopma değeri) belirlenmesinde kullanılan temel yöntemlerden biridir. ASTM E8M ve ISO 6892-1 standartlarına göre, güvenilir veri elde edilmesi için asgari üç adet numune kullanılması önerilmektedir. Bu çalışma kapsamında da her yaşlandırma grubu için üç numune hazırlanmış ve test edilmiştir.

Numuneler, ısıtma işlem koşullarına göre sınıflandırılmış, numaralandırılmış ve etiketlenmiştir. Bu sistematik sınıflandırma hem elde edilen verilerin karşılaştırılmasında hem de mikroyapı–mekanik özellik ilişkisinin değerlendirilmesinde tutarlılık sağlamıştır.

## **3.2. Metot**

### **3.2.1. Isıl işlem prosedürü**

DeneySEL çalışmalarda, AA2024 alüminyum alaşımı numunelerine üç aşamalı bir ısıtma işlem uygulanmıştır: çözeltiye alma, su verme ve yapay yaşlandırma. Bu işlemler, laboratuvar tipi kontrollü atmosfer fırınlarında ve sabit sıcaklıkta tutulan su tanklarında gerçekleştirilmiştir.

Çözeltiye alma işlemi, tüm numuneler için  $500 \pm 5$  °C sıcaklıkta 2 saat boyunca uygulanmıştır. Bu işlem sırasında kullanılan Alser Teknik – HLF190 marka tav fırınları, 1300 °C'ye kadar ısıtma kapasitesine sahip olup, 10 °C hassasiyetle sıcaklık kontrolü sağlayabilmektedir. Fırınlardan biri 187 litre ( $50 \times 50 \times 80$  cm<sup>3</sup>), diğeri ise 12 litre ( $20 \times 20 \times 30$  cm<sup>3</sup>) iç hacme sahiptir. Programlanabilir sıcaklık-zaman kontrol sistemi

sayesinde, numunelere uygulanan çözeltiliye alma işlemi süresince sıcaklık, PID kontrollü termokupl sistemi ile sabit tutulmuştur. Bu sayede matris içinde alaşım elementlerinin homojen dağılımı sağlanmış ve çökeltme sertleşmesi için gerekli olan aşırı doymuş katı çözeltili yapısı elde edilmiştir.



**Şekil 3.2.** Alser Teknik – HLF190 marka tav fırını

Su verme işlemi, çözeltiliye alma süresinin sonunda numunelerin vakit kaybetmeden 25 °C sıcaklıktaki durgun suya daldırılması ile gerçekleştirilmiştir. Bu ani soğutma işlemi, atomların matris içinde çökeltme başlamadan mevcut konumlarında kalmasını sağlamış ve yaşlandırma için uygun mikroyapı oluşturulmuştur. Kullanılan sistemler, hava, su ve yağda hızlı soğutmaya imkân tanıyan altyapıya sahip olup, kritik geçiş sıcaklıkları için hassas ısı işlem uygulamalarına elverişlidir.

Yapay yaşlandırma işlemi ise su verilmiş numunelere 190 °C sıcaklıkta, üç farklı süre uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler aşağıdaki şekilde gruplandırılmıştır:

- 190 °C – 5 saat
- 190 °C – 10 saat
- 190 °C – 15 saat

Yaşlandırma işlemi sonunda numuneler fırından çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Her yaşlandırma grubu için ayrı ayrı Brinell sertlik ölçümü, çekme testi ve SEM analizleri yapılmıştır.

**Tablo 3.5.** Uygulanan ısıtma işlem parametreleri

Çözeltiye Alma	Su Verme	Yaşlandırma Süresi	Yaşlandırma Sıcaklığı
500 °C – 2 saat	Su (25 °C)	-	–
500 °C – 2 saat	Su (25 °C)	5 saat	190 °C
500 °C – 2 saat	Su (25 °C)	10 saat	190 °C
500 °C – 2 saat	Su (25 °C)	15 saat	190 °C

Bu işlem parametreleri, literatürde yer alan çalışmalar doğrultusunda belirlenmiş ve optimum mekanik performansın elde edilmesi amacıyla uygulanmıştır.

### 3.2.2. Sertlik testi (brinell)

AA2024 alüminyum alaşımı numunelerinde, yaşlandırma süresine bağlı olarak mekanik sertlikte meydana gelen değişimleri belirlemek amacıyla Brinell sertlik testi uygulanmıştır. Bu yöntem, geniş baskı yüzeyi sayesinde özellikle homojen yapıya sahip metalik malzemelerde ortalama sertlik değerlerinin güvenilir şekilde ölçülmesi için tercih edilmektedir.

Sertlik ölçümleri için kullanılan cihaz Bulut Makina – Unibul marka Universal Sertlik Ölçüm Cihazıdır. Bu cihaz; Rockwell, Brinell ve Vickers yöntemleriyle sertlik ölçümü yapabilmekte, 3–187.5 kgf aralığında yükleme imkânı sunmaktadır. Cihaz, tam otomatik tabla kontrollü ölçüm, 2.5X, 5X ve 10X objektif seçenekleri ile donatılmış olup, yazılım kontrollü otomatik pozisyonlama, test ucu seçimi ve optik odaklama gibi özelliklere sahiptir. Bu sayede ölçümlerde insan hatası en aza indirilmiş ve yüksek tekrarlanabilirlik sağlanmıştır.



**Şekil 3.3.** Bulut Makina – Unibul marka universal sertlik ölçüm cihazı

Testler, ASTM E10 ve TS EN ISO 6506-1 standartlarına uygun olarak yürütülmüştür. Deneylede 2.5 mm çapında bilye uçlu baskı elemanı ve 62.5 kgf yük uygulanmış, yükleme süresi 15 saniye olarak belirlenmiştir. Çalışmada uygulanan kuvvet, aşağıdaki formül ile hesaplanmıştır:

$$F_{\text{uyg}} = d^2 \cdot C \quad (5.4)$$

Burada;

$F_{\text{uyg}}$ : Uygulanan kuvvet (kgf)

d: Bilye çapı (mm)

C: Sabit katsayı (bu çalışmada 25 olarak alınmıştır)

Denklem (1)'e göre, 2.5 mm bilye çapı için uygulanan kuvvet 62.5 kgf olarak hesaplanmıştır.

Her bir numune üzerinde beş farklı noktadan ölçüm alınmış, bu değerlerin ortalaması alınarak Brinell sertlik (HB) değeri hesaplanmıştır. Kabul edilen maksimum tekrarlanabilirlik sınırı  $\pm 5\%$  olarak belirlenmiş olup, tüm numunelerde elde edilen sapma bu sınırın altında kalmıştır (maksimum gözlenen sapma:  $\pm 2.51\%$ ).

Yüzey hazırlığı aşamasında numunelere taşlama ve parlatma işlemleri uygulanmış; düzgün yüzeyler sayesinde optik iz çapı ölçümlerinde hassasiyet artırılmıştır.

**Tablo 3.6.** Sertlik testi parametreleri

Parametre	Uygulanan Değer	Standart Referansı
Bilya çapı	2.5 mm	ASTM E10
Uygulanan yük	62.5 kgf (0.613 kN)	ASTM E10
Yükleme süresi	15 saniye	TS EN ISO 6506-1
Ölçüm sayısı	5 nokta/numune	ASTM E10 – Ortalama
Kabul edilen sapma	≤ 5% (tekrarlılık)	ASTM E10

Bu testler sonucunda elde edilen veriler, yaşlandırma süresine bağlı olarak AA2024 alaşımında meydana gelen çökeltme sertleşmesi mekanizmasının değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Brinell yöntemi, özellikle pik sertlik değerinin belirlenmesi ve aşırı yaşlanma etkilerinin başlangıcının tayin edilmesi açısından kritik bir öneme sahiptir.

### 3.2.3. Çekme testi

AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan yaşlandırma işlemlerinin mekanik dayanım üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Testler, TS EN ISO 6892-1 ve E8M standartlarına uygun olarak yürütülmüştür. Numunelerin mekanik özellikleri — özellikle akma dayanımı ( $R_{p0.2}$ ), çekme dayanımı ( $R_m$ ) ve kopma uzaması (%) bu testlerle ölçülmüştür.

Çekme testleri, Zwick 2500E marka universal test cihazı ile yapılmıştır. Bu cihaz, yüksek kapasiteli yük hücresi ve tam otomatik kontrol sistemi ile donatılmış olup, özellikle metalik malzemelerin hassas mukavemet ölçümleri için tasarlanmıştır.



Şekil 3.4. Zwick 2500E marka üniversal test cihazı

Cihazın teknik özellikleri:

- Maksimum kapasite: 2500 kN (250 ton)
- Numune ölçü aralığı: 1–100 mm (yassı), 6–100 mm (yuvarlak)
- Hassasiyet sınıfı: Class 0.5
- Temaslı metal ekstansometre ile uzama ölçümü
- Test parametreleri: akma yükü, kopma yükü, maksimum yük, kopma uzaması

Her yaşlandırma süresi için 3 çekme numunesi test edilmiştir. Numuneler, ASTM E8M standardına göre hazırlanmış, paralel test bölgesi genişliği 12.5 mm, ölçüm uzunluğu 50 mm olacak şekilde tasarlanmıştır.

**Tablo 3.7.** Uygulanan çekme testi parametreleri

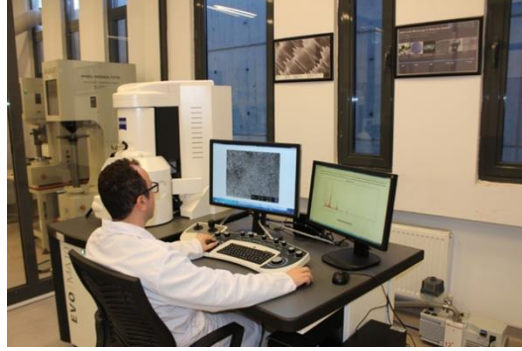
Parametre	Uygulanan Değer	Standart
Cihaz	Zwick 2500E	–
Yüklemeye hızı	1 mm/dk	ASTM E8M
Numune tipi	Düz omuzlu (ölçüm uzunluğu: 50 mm)	ASTM E8M
Numune sayısı	3/grup	ASTM E8M, ISO 6892-1
Ölçülen değerler	R <sub>p0.2</sub> , R <sub>m</sub> , % uzama	ASTM E8M

Test sonucunda elde edilen mühendislik gerilme–şekil değiştirme eğrileri, yaşlandırma süresine göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiş ve ilgili grafiklerle analiz edilmiştir. Bu sayede yaşlandırma işleminin akma ve çekme mukavemeti üzerine etkileri net biçimde ortaya konmuştur.

### 3.2.4. SEM görüntüleme

Yaşlandırma işleminin AA2024 alüminyum alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkilerini analiz etmek amacıyla SEM yöntemi kullanılmıştır. Bu analiz, özellikle çökeltilerin boyutu, dağılımı ve matris ile etkileşimlerinin değerlendirilmesi açısından kritik öneme sahiptir. SEM yöntemiyle elde edilen mikroyapısal veriler, çökeltme sertleşmesi mekanizmasının evrimsel sürecini doğrudan görselleştirme imkânı sunar.

SEM analizleri, Carl Zeiss – EVO MA 10 model cihaz ile gerçekleştirilmiştir. Bu cihaz; yüksek çözünürlüklü görüntüleme, faz ayrımı ve elementel analiz gibi çok yönlü görüntüleme özelliklerine sahiptir. SEM analizlerinde, hem ikincil elektron (SE) hem de geri saçılan elektron (BSE) dedektörleri kullanılarak detaylı morfolojik ve yapısal değerlendirmeler yapılmıştır.



Şekil 3.5. Carl Zeiss – EVO MA 10 marka SEM cihazı

Numune hazırlığı şu şekilde gerçekleştirilmiştir:

- Numune ebatları: 10 x 10 x 5 mm<sup>3</sup>
- Yüzey taşlama: 320 – 1200 kum zımpara kademeli
- Parlatma: 1 µm elmas süspansiyon ile
- Dağlama: Keller reaktifi ile 15 dakika

SEM cihazının teknik özellikleri:

- Elektron kaynağı: Tungsten filaman
- Gerilim: 20 kV (ivme voltajı)
- Görüntüleme büyütmesi: 1000x – 5000x
- Tarama alanı: maksimum 25 mm<sup>2</sup>
- EDS (Enerji Dağılımlı Spektroskopi) ile noktasal/alan kimyasal analiz
- VP ((Değişken Basınç) modu ile kaplamasız analiz imkânı

Her yaşlandırma süresi için birer adet numune SEM analizine tabi tutulmuştur. Gözlemler sırasında özellikle çökelti yapılarının boyut, şekil ve yoğunluğu değerlendirilmiş; aşırı yaşlanmaya bağlı çökelti büyümeleri ve matris içi çözeltilerin durumu analiz edilmiştir. Mikroyapıdaki bu değişimlerin çökeltme sertleşmesi üzerindeki etkileri, yaşlandırma parametreleri ile doğrudan ilişkilendirilmiştir.



#### 4. BULGULAR VE TARTIŞMA

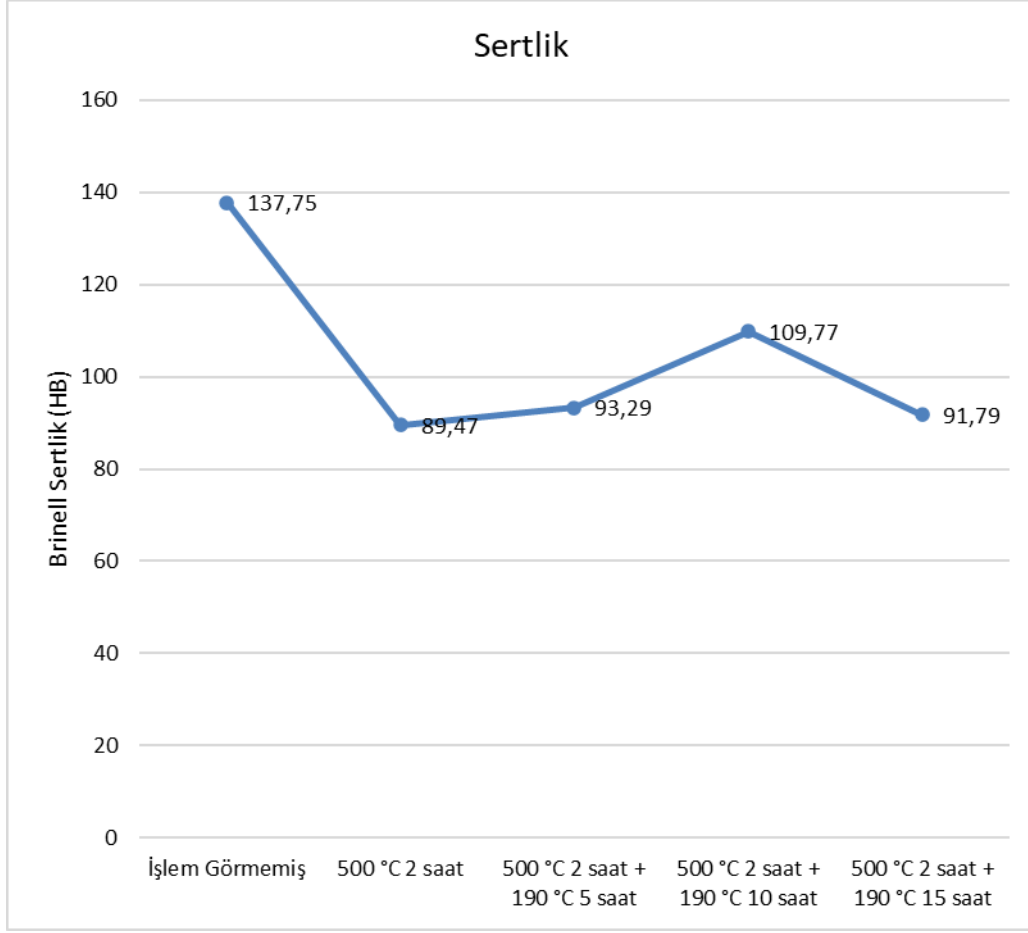
Bu bölümde, AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan farklı yaşlandırma sürelerinin (5, 10 ve 15 saat) Brinell sertliği, çekme dayanımı ve mikroyapı üzerindeki etkileri incelenmiş olup elde edilen veriler tablo ve grafiklerle de ifade edilmiştir. Burada elde edilen deneysel bulgular, literatürde yer alan benzer çalışmalarla karşılaştırılarak tartışılmış ve yaşlandırma süresinin mekanik özelliklerle olan ilişkisi açıklanmıştır.

##### 4.1. Sertlik Sonuçları

Brinell sertlik testinden elde edilen sonuçlar, yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte sertlik değerlerinde belirgin bir değişim olduğunu göstermektedir. Çözeltiye alınmış durumda 89.47 HB civarında olan sertlik, 5 saat yaşlandırma sonrasında 93.29 HB'ye yükselmiş, 10 saatlik yaşlandırmada 109.77 HB ile en yüksek değerine ulaşmıştır. 15 saatlik yaşlandırma sonrası ise sertlik 91.79 HB'ye gerilemiş, bu da aşırı yaşlanma etkisinin başladığını göstermiştir.

**Tablo 4.1.** Brinell sertlik değerleri HB (dan/mm<sup>2</sup>) (Bkz. Ek 6 – Sertlik Testi Sonuçları)

Isıl İşlem	Brinell Sertlik (HB)	± HB (%)
İşlem Görmemiş	137.75	±0.64 (±0.47 %)
500 °C 2 saat	89.47	±0.37 (±0.41 %)
500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat	93.29	±0.21 (±0.23 %)
500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat	109.77	±1.50 (±1.37 %)
500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat	91.79	±1.10 (±1.20 %)



**Şekil 4.1.** Yaşlandırma süresine bağlı sertlik değişimi

Elde edilen veriler, yaşlandırmanın ilk saatlerinde çökeltilerin yoğunlaştığını, mikroyapının dislokasyon hareketine daha fazla direnç gösterdiğini ortaya koymaktadır. Ancak 10 saatin ardından çökeltilerin irileştiği ve matrisle uyumunun azaldığı düşünülmektedir. Bu durum, sertlik değerlerinde azalmaya yol açmaktadır.

#### 4.2. Çekme Testi Sonuçları

Çekme testi ile elde edilen veriler, yaşlandırma süresinin AA2024 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerinde önemli etkiler oluşturduğunu ortaya koymuştur. Özellikle çekme dayanımı, akma dayanımı ve uzama değerlerinde yaşlandırma süresine bağlı olarak belirgin değişimler gözlemlenmiştir.

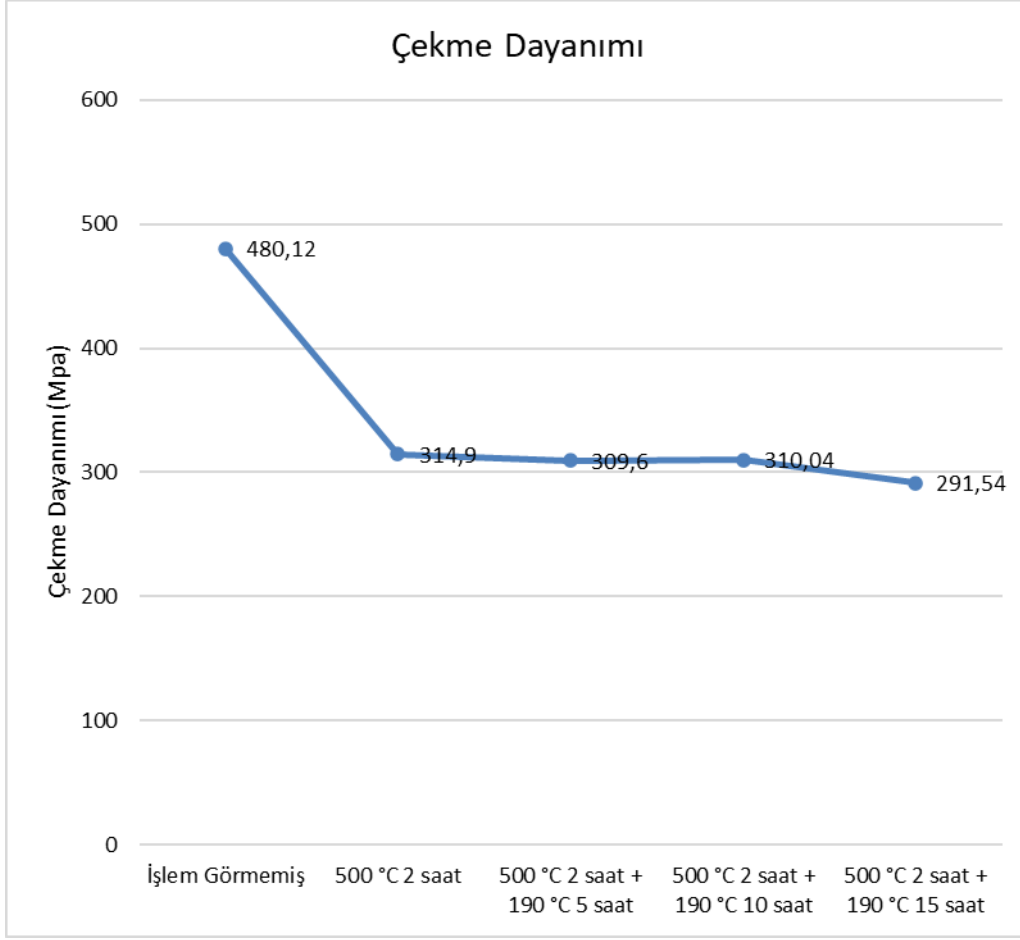
Çözeltiye alma işlemi sonrasında ölçülen çekme dayanımı 314.90 MPa iken, 190 °C'de 10 saat süreyle yaşlandırılan numunede bu değer 310.04 MPa olarak tespit edilmiştir. Yaşlandırma süresinin 15 saate çıkarılması durumunda ise çekme dayanımının 291.54 MPa 'ya gerilediği görülmektedir.

Benzer şekilde, çözeltiye alma işlemi sonrası akma dayanımı 124.57 MPa olarak belirlenmiş, 10 saatlik yaşlandırma sonucunda bu değer 170.34 MPa 'ya yükselmiştir. Ancak 15 saatlik yaşlandırma uygulamasında akma dayanımı hafif bir düşüşle 165.40 MPa seviyesine gerilemiştir. Bu durum, yaşlandırmanın optimum süresinin 10 saat civarında olabileceğine işaret etmektedir.

Uzama değerlerinde ise yaşlandırma süresiyle ters orantılı bir değişim gözlenmiştir. Çözeltiye alma işleminden sonra elde edilen 14.63%'lük uzama değeri, 10 saatlik yaşlandırmada 12.43%'e düşmüştür. Ancak 15 saatlik yaşlandırmada bu değer beklenmedik şekilde artarak 15.14% olarak ölçülmüştür. Bu durum, uzun süreli yaşlandırmanın çökelti morfolojisinde yumuşama veya faz dönüşümü kaynaklı sünekliği artırıcı etkiler oluşturabileceğini düşündürmektedir.

**Tablo 4.2.** Çekme testi sonuçları (Bkz. Ek 7 – Çekme Testi Sonuçları)

İşlem	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
İşlem Görmemiş	381.87	480.12	20.48
Çözeltiye Alma	124.57	314.90	14.63
Çözeltiye Alma + 190 °C 5 saat	150.66	309.60	12.22
Çözeltiye Alma + 190 °C 10 saat	170.34	310.04	12.43
Çözeltiye Alma + 190 °C 15 saat	165.40	291.54	15.14



**Şekil 4.2.** Yaşlandırma süresine bağlı çekme dayanımı değişimi

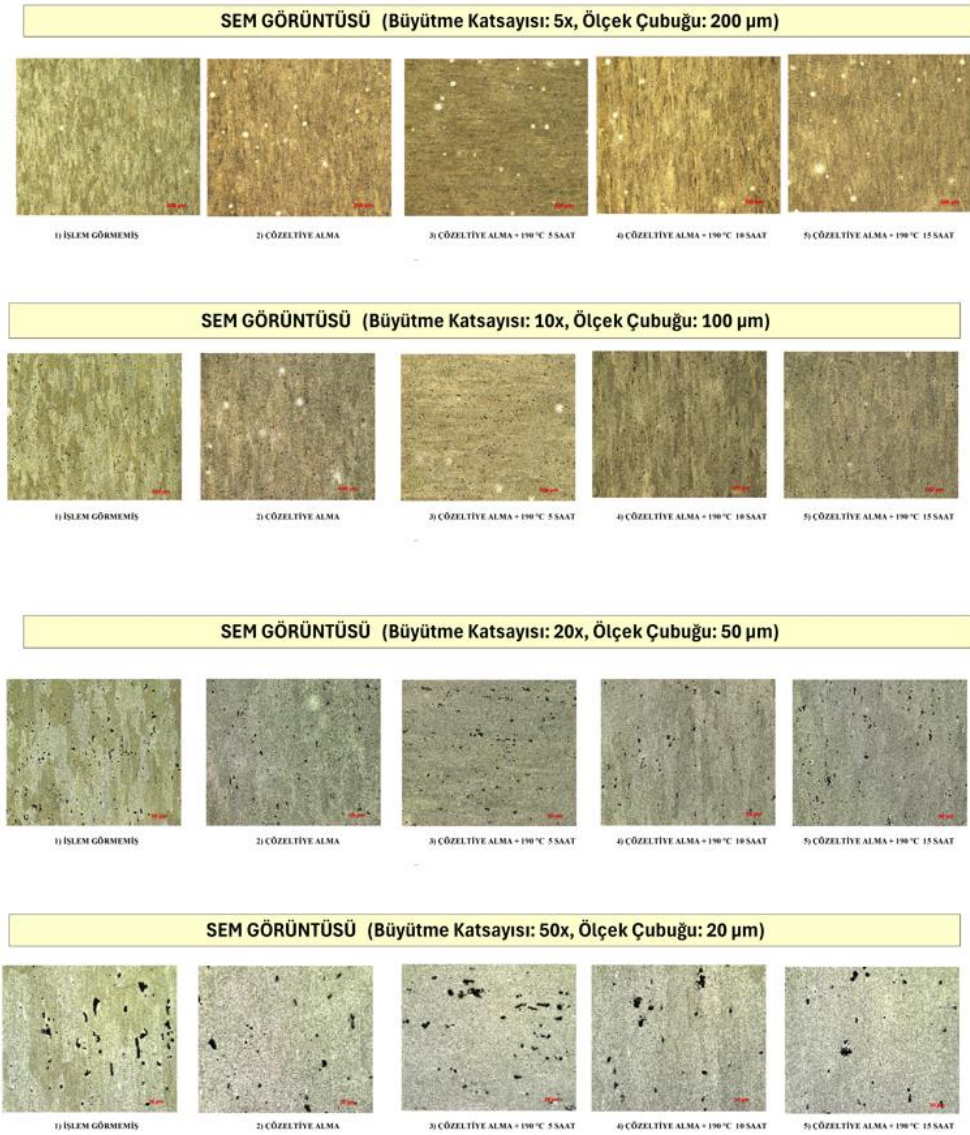
Bu bulgular, 10 saatlik yaşlandırmanın optimum mekanik özellikleri sağladığını, 15 saatten sonra ise aşırı yaşlanma nedeniyle çökelti fazlarının irileşip mukavemeti olumsuz etkilediğini göstermektedir.

### 4.3. SEM Mikroyapı İncelemeleri

Bu bölümde, AA2024 alüminyum alaşımına uygulanan farklı yaşlandırma sürelerinin mikroyapısal etkilerini değerlendirmek amacıyla SEM ile yapılan incelemelere yer verilmiştir. SEM analizleri, çökelti sertleşmesi sürecinin mikroyapı üzerindeki evrimini ortaya koymak için kritik öneme sahiptir.

Çalışmada kullanılan SEM görüntüleri; 5x (200  $\mu\text{m}$ ), 10x (100  $\mu\text{m}$ ), 20x (50  $\mu\text{m}$ ) ve 50x (20  $\mu\text{m}$ ) büyütme oranlarında alınmış ve her birinde mikron seviyesinde çözünürlük sunan ölçek çubuğu görselin alt kısmında yer almıştır. Görüntüler, doğrudan cihazdan alınmış orijinal halleriyle kullanılmıştır. Bu durum, mikroyapının net şekilde incelenmesine olanak sağlamış ve karşılaştırmalı analizlerde güvenilirlik yaratmıştır.

SEM görüntülerine ait mikroyapısal gözlemler aşağıda ayrıntılı olarak sunulmuştur.



**Şekil 4.3.** SEM görüntüleri (Bkz. Ek 9 – SEM Görüntüleri)

1.Görüntü - İşlem Görmemiş (AA2024-T351): T351 temperindeki numunede, fabrika çıkışı doğal yaşlanma etkisiyle oluşmuş düzensiz dağılmış ikinci faz partikülleri gözlemlenmiştir. Bu partiküller matrisle uyumsuz yapıda olup, çoğunlukla tane sınırlarında yoğunlaşmıştır. Matris içinde dislokasyon yoğunluğu belirgindir ve plastik şekil değişimi izleri taşımaktadır. Bu yapı, yaşlandırma öncesi başlangıç mikroyapısını temsil eder ve özellikle çökelti yoğunluğu açısından referans durum olarak değerlendirilir (Coşkun, 2020; Yücel, 2024)

2.Görüntü - 500 °C 2 Saat Çözeltiye Alma:

Bu işlem sonrasında numunede önceki çökeltiler büyük ölçüde çözünmüş, yapı homojen hâle gelmiştir. Matris içerisinde belirgin bir çökelti izine rastlanmamıştır. Bu aşama, aşırı doymuş katı çözelti (SSSS) durumunu ifade eder ve çökeltme sertleşmesi sürecinin başlangıcını oluşturur. Dislokasyonlar daha seyrek ve rastlantısaldır. Tane sınırları belirgin şekilde izlenebilir (Fakıoğlu, 2012).

3.Görüntü - 500 °C 2 Saat + 190 °C 5 Saat Yaşlandırma:

Bu süre sonunda yapı içerisinde GP (Guinier–Preston) zonları oluşmaya başlamış; matris içinde ince ve düzgün dağılmış, ancak tam ayırt edilemeyen noktalar hâlinde görülmüştür. GP zonları, matrisle uyumlu yapılar olduğundan kontrast farklılığı düşüktür. Sertlik artışı başlamış; mikroyapı mekanik olarak güçlenme eğilimi göstermeye başlamıştır.

4.Görüntü - 500 °C 2 Saat + 190 °C 10 Saat Yaşlandırma:

Bu numune, çökeltme sertleşmesinde “pik sertlik” durumunu temsil etmektedir. S' (Al<sub>2</sub>CuMg) çökeltileri, matris boyunca homojen şekilde ince ve yoğun olarak dağılmıştır. Çökeltiler dislokasyon hareketini sınırlayacak şekilde yerleşmiştir. Bu yapı, maksimum mekanik özelliklerin gözlemlendiği optimum yaşlandırma süresine karşılık gelir. Matris ile çökeltiler arasında kısmi uyum gözlemlenmiştir.

5.Görüntü - 500 °C 2 Saat + 190 °C 15 Saat Yaşlandırma:

Yaşlandırma süresinin uzatılması sonucunda çökeltiler büyümüş ve bir miktar koagülasyon eğilimi göstermiştir. Mikroyapıda heterojen bir yapı gözlemlenmiş, çökeltilerin matrisle olan uyumu azalmıştır. Bu durum “aşırı yaşlanma” olarak tanımlanmakta ve genellikle mekanik özelliklerde (sertlik, dayanım) düşüşe yol açmaktadır. Tane sınırlarında daha iri fazlar, tane içlerinde ise dağınık çözülmüş yapılar görülmüştür.

Yukarıda sunulan mikroyapısal analizler, Brinell sertlik testleri ve çekme deneyleri ile elde edilen verilerle birlikte değerlendirildiğinde; yaşlandırma süresi arttıkça çökeltme mekanizmasının yoğunluğu ve karakterinin değiştiği, bunun da mekanik performansa doğrudan yansıdığı anlaşılmaktadır. Mikroyapıdaki evrimsel değişiklikler, özellikle optimum yaşlandırma süresinde (10 saat) en dengeli ve güçlü yapının elde edildiğini göstermektedir.

#### **4.4. Yaşlandırma Süresi – Mekanik Özellik İlişkisi**

Yaşlandırma süresi ile mekanik özellikler arasında doğrudan ve doğrusal olmayan bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Özellikle 5 saat ile 10 saat arası yaşlandırmalarda

sertlik ve dayanım değerlerinde hızlı artışlar gözlenmiş; 10 saat sonrası ise eğriler yataylamış, 15 saatte ise azalma eğilimi başlamıştır.

Bu ilişki, çökeltilerin büyüme ve matrisle etkileşim mekanizmasına dayanmaktadır. Pik sertlik ve dayanım 10 saatlik sürede elde edilmiş olup, bu süre aşılırsa çökelti büyür, matrisle bağ uyumu bozulur ve dislokasyon engelleme kabiliyeti azalır. Bu da aşırı yaşlanma olarak tanımlanır.

#### **4.5. Sonuçların Literatürle Karşılaştırılması**

Elde edilen bulgular, mevcut literatürle büyük oranda uyum göstermektedir. Siqueira ve ark. (2019) çalışmasında, 190 °C'de 8 saatlik yaşlandırma ile maksimum sertlik ve dayanım değerlerine ulaşıldığı, bu sürenin uzaması hâlinde aşırı yaşlanma etkisinin ortaya çıktığı bildirilmiştir. Afzal ve ark. (2013) ise 135 °C ve 195 °C'de 2 saat yaşlandırma ile maksimum dayanım ve sertlik elde edildiğini, 165 °C'de ise çökeltilerin matris içinde çözünerek mekanik özelliklerde düşüşe neden olduğunu raporlamıştır. Benzer şekilde, Güven ve Delikanlı (2012) tarafından yapılan çalışmada 190 °C'de yapılan yaşlandırma işlemlerinin mekanik özellikleri artırdığı, özellikle 6 saatlik uygulamalarda en yüksek Brinell sertlik değerlerine ulaşıldığı belirtilmiştir. Bu çalışma da benzer sonuçlara ulaşmış, 10 saatlik yaşlandırmanın AA2024 alaşımı için en uygun parametre olduğu ortaya konmuştur.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu tez çalışmasında, çökelme sertleşmesi mekanizmasına sahip AA2024 alüminyum alaşımının farklı yaşlandırma süreleri (5, 10 ve 15 saat) boyunca yapay yaşlandırmaya tabi tutulması sonucunda malzemenin mekanik özelliklerinde ve mikroyapısında meydana gelen değişiklikler detaylı olarak değerlendirilmiştir. Çalışma kapsamında gerçekleştirilen ısı işlemler sonucunda elde edilen Brinell sertlik verileri, çekme testleri ve SEM analizleri bir bütün olarak ele alınarak yaşlandırma süresinin performans üzerindeki etkileri ortaya konmuştur. Bu bölümde elde edilen genel sonuçlar, önerilen ısı işlem parametreleri ve gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler sırasıyla sunulmaktadır.

### 5.1. Genel Sonuçlar

1 - Sertlik Özellikleri Açısından:

- Çözeltiye alma sonrası düşük sertlik göstermiş (89.47 HB), yaşlandırma ile birlikte bu değer 109.77 HB'ye kadar yükselmiştir.
- 10 saatlik yaşlandırma süresi, en yüksek sertlik değerinin elde edildiği süre olarak belirlenmiştir.
- 15 saatlik yaşlandırma sonucunda sertlikte düşüş gözlenmiş ve bu durum, çökeltilerin büyümesiyle aşırı yaşlanma etkisine bağlanmıştır.

2 - Çekme Özellikleri Açısından:

- Çözeltiye alma sonrası akma dayanımı 124.57 MPa iken, yaşlandırma ile birlikte bu değer 170.34 MPa 'ya kadar artmıştır.
- 10 saatlik yaşlandırma, çekme açısından optimum mekanik performansı sağlamıştır.

3 - Mikroyapı Açısından:

- SEM analizleri, çökelme sürecinin mikroyapısal evrimini net şekilde ortaya koymuştur.
- 10 saatlik yaşlandırmada çökelti homojen dağılmış ve matrisle iyi bir uyum göstermiştir.
- 15 saatlik yaşlandırma sonrası büyümüş, düzensiz çökelti mikroyapının bütünlüğünü zayıflatmıştır.

4 - Literatürle Uyumluluk:

- Elde edilen bulgular, mevcut bilimsel literatürdeki verilerle büyük ölçüde örtüşmektedir.
- En yüksek sertlik ve dayanım değerlerinin 8–10 saatlik yaşlandırma süresinde elde edildiği yönündeki literatür verileri bu çalışmayla desteklenmiştir (Güven ve Delikanlı, 2012; Afzal ve ark., 2013; Siqueira ve ark., 2019).

### 5.2. Önerilen Çökelme Sertleşmesi Parametreleri

Çalışma sonucunda elde edilen bulgular doğrultusunda, AA2024 alaşımının çökelme sertleşmesiyle optimum mekanik özelliklerine ulaşabilmesi için aşağıdaki ısıtma işlem parametreleri önem arz eder.

**Tablo 5.1.** Çökelme sertleşmesi parametreleri

Aşama	Parametre
Çözeltiye Alma	500 °C ±5 °C / 2 saat
Su Verme	25 °C durgun suya ani daldırma
Yapay Yaşlandırma	190 °C / 10 saat

Bu parametrelerle uygulanan yaşlandırma işleminin; maksimum sertlik, yüksek çekme dayanımı ve yeterli süneklik kombinasyonunu sağlayarak, AA2024'ün havacılık ve savunma sanayi gibi yüksek performans gerektiren uygulamalar için uygun hâle geldiği belirlenmiştir.

### 5.3. Gelecek Çalışmalar İçin Öneriler

Bu tez çalışmasında ulaşılan bulgular, AA2024 alaşımı üzerine yapılan ısıtma işlem uygulamaları ve performans analizlerine katkı sağlamaktadır. Ancak aşağıda belirtilen geliştirmeler ve genişletmeler, gelecekteki akademik ve endüstriyel çalışmalara ışık tutabilir:

- Yaşlandırma Sıcaklığı Değişkeni: Bu çalışmada sabit yaşlandırma sıcaklığı kullanılmıştır. Farklı sıcaklık aralıklarında (160 °C, 180 °C, 200 °C gibi) yapılacak çalışmalar, sıcaklık-süre etkileşimini daha detaylı ortaya koyabilir.
- Doğal Yaşlandırma – Yapay Yaşlandırma Karşılaştırması: Sadece yapay yaşlandırma ele alınmıştır. Doğal yaşlandırma ile mukayese yapılarak daha geniş bir değerlendirme yapılabilir.
- Yorulma ve Darbe Testleri: Bu çalışmada statik testler gerçekleştirilmiştir. AA2024'ün yorulma dayanımı ve darbe tokluğu gibi dinamik yükler altındaki davranışları da ayrıca araştırma konusudur.

- Çökelti Morfolojisinin TEM (Geçirimli Elektron Mikroskobu) ile Analizi: SEM analizleri, çözünürlük açısından sınırlı kalabilir. Gelecek çalışmalarda çökelti boyutu ve aralıklarının daha detaylı analiz edilebilmesi için TEM kullanılması önerilmektedir. TEM, numunenin iç yapısını atomik düzeyde inceleyebilen yüksek çözünürlüklü bir mikroskoptur.
- Korozyon Direnci İncelemesi: Yüksek bakır içeriği nedeniyle AA2024'ün korozyon davranışları da yaşlandırma sonrası mutlaka değerlendirilmeli; yüzey koruyucu işlemlerle kombine edilerek uygulama güvenliği artırılmalıdır.



## KAYNAKLAR

- Abbass, M. K. (2012). Effect of aging time on the mechanical properties of friction stir spot welding of Al-alloy (AA2024). *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(3), 1366–1374. <https://www.researchgate.net/publication/286459144>
- Acar, B., ve Dağ, K. (2021). EN AC 46000 (AlSi9Cu3) alüminyum alaşımının T6 ısıtılmasında yaşlandırılması ve mekanik özelliklerinin incelenmesi. *İmalat Teknolojileri ve Uygulamaları*, 2(3), 1–9. <https://doi.org/10.52795/mateca.963144>
- Afzal, N., Shah, T., ve Ahmad, R. (2013). Microstructural features and mechanical properties of artificially aged AA2024. *Strength of Materials*, 45(6), 684–692. <https://doi.org/10.1007/s11223-013-9504-4>
- Alexopoulos, N. D., Proiou, A., Examilioti, T., Kashaev, N., Riekehr, S., ve Kourkoulis, S. K. (2016). Effect of artificial aging on the mechanical performance of (Al-Cu) 2024 and (Al-Cu-Li) 2198 aluminum alloys. *Procedia Structural Integrity*, 2, 3782–3783. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2016.06.470>
- Alexopoulos, N. D., Velonaki, Z., Stergiou, C. I., ve Kourkoulis, S. K. (2017). Effect of ageing on precipitation kinetics, tensile and work hardening behavior of Al-Cu-Mg (2024) alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 700, 457–467. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.05.090>
- Akyüz, B., ve Şenaysoy, S. (2014). Alüminyum alaşımlarında yaşlandırma işleminin mekanik özellikler ve işlenebilirlik üzerindeki etkisi. *Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 18–30.
- Atik, E., Meriç, C., ve Şahan, A. (2001). TIG kaynak yöntemiyle birleştirilmiş 2024 alüminyum alaşımının kaynak bölgesinin çökelme sertleşmesi bakımından incelenmesi. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(3), 75–83.
- Avner, S. H. (1974). *Introduction to physical metallurgy* (2nd ed.). McGraw-Hill.
- Aydoğan, F. (2019, Kasım). AlSi10Mg alaşımlı döküm parçalar için ısıtılma işlemi prosesinde optimizasyon çalışmaları. *Ulusal Bir Konferans Sunumu*. <https://www.researchgate.net/publication/344508390>

- Çarboğa, C., ve Dal, S. (2014). Malzeme Laboratuvarı-I dersi deney föyü [Ders notu]. Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.
- Coşkun, A. (2020). Yaşlandırılan AA 2024 alüminyum alaşımının soğuk, ılık ve sıcak deformasyon kabiliyetinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Durmuş, H. K., Okur, A., ve Meriç, C. (2003). AA 2014 ve AA 2024 alüminyum alaşımlarında soğutma koşullarının sertliğe etkisinin incelenmesi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 9(1), 9–13.
- El Garchani, F. E., Lgaz, H., Kaya, S., Lee, H. S., Ibrahim, S. M., Chafiq, M., Ko, Y. G., ve Kabiri, M. R. (2023). Effects of heat treatment on the corrosion behavior and mechanical properties of aluminum alloy 2024. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 1355–1363. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.278>
- Erdoğan, M., Güneş, İ., ve Erçetin, A. (2014). AA2024 alüminyum alaşımının doğal yaşlandırma yöntemi ile mekaniksel özelliklerinin incelenmesi. *Proceedings of the 15th International Materials Symposium (IMSP'2014)*, 451–459.
- Fakıoğlu, A. (2012). Yaşlandırılan AA7075 alüminyum alaşımlarının yorulma davranışlarının incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Fallah Tafti, M., Sedighi, M., ve Hashemi, R. (2018). Effects of natural ageing treatment on mechanical, microstructural and forming properties of Al 2024 aluminum alloy sheets. *Iranian Journal of Materials Science ve Engineering*, 15(4), 1–9. <https://doi.org/10.22068/ijmse.15.4.1>
- Guía-Tello, J. C., Garay-Reyes, C. G., Rodríguez-Cabriales, G., Medrano-Prieto, H. M., Ruiz-Esparza-Rodríguez, M. A., García Hernández, L. J., ... ve Martínez-Sánchez, R. (2022). Effect of plastic deformation on the precipitation sequence of 2024 aluminum alloy. *Journal of Materials Science*, 57(4), 2180–2193. <https://doi.org/10.1007/s10853-021-06689-1>
- Güven, Ş. Y., ve Delikanlı, Y. E. (2012). AA2024 alüminyum alaşımında çökelme sertleşmesinin mekanik özelliklere etkisi. *SDÜ Teknik Bilimler Dergisi*, 2(4), 13–20.
- Haghdadi, F., Jamaati, R., ve Hosseinipour, S. J. (2024). Achieving high strength in AA2024 alloy by natural aging and asymmetric cold rolling. *Results in Engineering*, 24, 103488. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103488>

- Koçdağ, N. (2019). 6013 alüminyum alaşımının özelliklerine ısıl işlem ve deformasyon parametrelerinin etkileri [Yüksek lisans tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Onur, A. (2014). AA6XXX serisi alüminyum alaşımlarının yaşlandırma işlemine bağlı olarak işlenebilirliğinin incelenmesi [Yüksek lisans tezi, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi]. YÖK Ulusal Tez Merkezi.
- Radutoiu, N., Alexis, J., Lacroix, L., Petit, J.-A., Abrudeanu, M., Rizea, V., ve Vulpe, S. (2012). Effect of the over-ageing treatment on the mechanical properties of AA2024 aluminum alloy. *Revista de Chimie*, 63(10), 1042–1045.
- Radutoiu, V., Mihail, M., ve Simion, C. (2015). Influence of the artificial aging on mechanical properties of aluminum alloys. *Procedia Manufacturing*, 3, 3940–3947.
- Reis, D. A. P., Couto, A. A., Domingues Jr., N. I., Hirschmann, A. C. O., Zepka, S., ve Moura Neto, C. (2012). Effect of artificial aging on the mechanical properties of an aerospace aluminum alloy 2024. *Defect and Diffusion Forum*, 326–328, 193–198. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.326-328.193>
- Roodgari, M. R., ve Jamaati, R. (2023). A technique to achieve an excellent strength–ductility balance in AA2024 alloy. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23(12). <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00553-y>
- Siqueira, M. L., da Silva, A., de Lourdes Noronha Motta Melo, M., ve Rodrigues, G. (2019). Mechanical properties analysis of Al2024 alloy submitted to different aging time and different cold plastic deformation degree. *Materials Research*, 22(4), e20180598. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2018-0598>
- Şam Parmak, E. D., ve Küçükelyas, B. (2017). Çökeltme sertleşmesi (yaşlandırma) deney föyü. Bursa Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü.
- Varol Özkavak, H., ve Bıçaklı, E. E. (2018). Tam yoğun ve toz metal 2024 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine yaşlandırma işleminin etkisi. *Journal of Engineering Sciences and Design*, 6(4), 650–658. <https://doi.org/10.21923/jesd.428150>
- Yılmaz, B. (2002). Alüminyum alaşımlarında faz yapılarının mekanik özelliklere etkisi [Yüksek lisans tezi, YÖK Tez Merkezi]. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/289610>
- Yücel, İ. (2024). Effects of quenching and aging conditions on the hardening behavior of 2024 Al alloy [Master's thesis, Atılım University].


Zhou, Y., Xiong, H., Jiang, J., Yang, S., Tan, Z., Kong, C., ve Yu, H. (2023). Effect of pre-aging on microstructure and mechanical properties of cryorolled AA2024 sheets. JOM, 75(8), 2935–2949. <https://doi.org/10.1007/s11837-022-05616-2>

# EKLER

## EK-1

### Seykoç – AA2024 Malzeme Sertifikası

 "TÜRKİYE'NİN İZİP ALÜMİNYUM TEDARİKÇİSİ"	<b>UYGUNLUK SERTİFİKASI</b> (Certificate of Conformity)	Document No : FR.061 Publishing Date : 01.10.2016 Revision Date : 15.03.2018 Revision No : 2 Page No : 1/1
---	--	--

<b>Sertifika No</b> (Certificate Number)	202411013	<b>Tarih</b> (Date)	29.10.2024								
<b>Genel Bilgi (General Information)</b>											
<b>Formu</b> (Form)	PLAKA	<b>Lot No</b> (Lot/Batch No)	BG77231								
<b>Ölçüleri</b> (Dimensions)	15X1520X3020	<b>Miktar (Kg)</b> (Quantity)	-								
<b>Alaşım</b> (Alloy)	2024	<b>Adet</b> (Pieces)	-								
<b>Temper</b> (Temper)	T351	<b>Standartlar</b> (Standards)	EN 485-1 -2 -3 EN 515 EN 573-3								
<b>Kimyasal Analiz (Chemical Analysis)</b>											
<b>DEĞERLER</b> (VALUES)	<b>ELEMENTLER (%) (Elements)</b>										
<b>STANDART</b> (STANDARD)	Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Cu	Mg	Zn	Each	Total	Al
<b>Min.</b>	-	-	0,30	-	-	3,8	1,2	-	-	-	-
<b>Max.</b>	0,50	0,50	0,90	0,10	0,15	4,9	1,8	0,25	0,05	0,15	REM.
<b>TEST SONUÇLARI (%) (Test Results)</b>											
	0,0785	0,0370	0,7763	0,0019	0,0328	4,5220	1,5548	0,0747			REM.
<b>Mekanik Özellikler (Mechanical Properties)</b>											
1 Mpa = 1 N/mm <sup>2</sup> = 0.145 ksi = 0.102 kgf/mm <sup>2</sup>											
<b>STANDART</b> (STANDARD)	<b>Çekme Dayanımı (MPa)</b> (Tensile Strength)		<b>Akma Dayanımı (MPa)</b> (Yield Strength)			<b>Uzama (%)</b> (Elongation)		<b>Sertlik (HB)</b> (Hardness)			
<b>Min.</b>	430		290			11		122			
<b>Max.</b>											
<b>TEST SONUÇLARI (%) (Test Results)</b>											
	475,9		317,9			23,5		134,7			
<b>Ultrasonik Muayene (Ultrasonic Inspection)</b>											
<b>Uygulandı</b> (Done)	Uygulandı İse, Standartı (If Done, Standards)			Uygulanmadı (Not Done)				X			
<b>Onay (Approval)</b>											
<p>Seykoç Alüminyum bu uygunluk sertifikası ile, müşteriye teslim edilen ve yukarıda özellikleri tanımlanan ürünlerin; müşteri sipariş şartlarına sağladığını, raporlarında belirtilen teknik değerlerin doğruluğunu ve uluslararası standart şartlarına uygunluğunu beyan ve taahhüt eder.</p> <p>Seykoç Alüminyum with this conformity certificate, the products delivered to the customer and defined above features; customer order conditions, the accuracy of the technical values stated on the report and compliance with international standard requirements.</p> <p>Bu Uygunluk Sertifikası, TS EN 10204 standardının 3.1 formatına uygun olarak hazırlanmıştır.</p> <p>This Conformity Of Certificate was prepared in format 3.1 in accordance with TS EN 10204 standart</p> <p>Bu Uygunluk Sertifikası, üretici firmamızın orijinal sertifikası bilgilerini içermektedir.</p> <p>This Conformity of Certificate contains the information of the manufacturer's original certificate.</p>											
<p style="text-align: right;">Kalite Kontrol Departmanı (Quality Control Department)</p> <p style="text-align: right;">Şahin ARSLAN</p> <p style="text-align: right;"></p>											
<p style="text-align: center;">Seykoç Alüminyum Pazarlama Ve Sanayi Ticaret Ltd. Şti. Akse Mahallesi Nazım Hikmet Caddesi 536. Sokak No:7 Çayırova KOCAELİ TÜRKİYE Tel: +90 262 743 88 88 Pbx Faks: +90 262 743 11 11 Web: seykoç.com.tr E-Mail: seykoç@seykoç.com.tr</p>											

## EK-2

### Altınay – AA2024 Kimyasal Analiz Sonuçları

AI|AL\_T\_000 - Al-Genel AlüminyumÜVT PA Analiz Sayacı: 4915 | 6258 CPU: 0/0 14:46:07

Numune: 835,05 | 5083 | 1120KK | 8759 | 21/05/2025 | 242793 | 1 | Onur KELES

**Found Grade 2024 (100,0%)**

Element	↓	Ortalama	↑	SD	Analiz 1
Al	[%]	<b>93,19</b>			93,19
Si	[%]	0,0000	<b>0,0147</b>	0,500	0,0147
Fe	[%]	0,0000	<b>0,101</b>	0,500	0,101
Cu	[%]	3,80	<b>4,01</b>	4,90	4,01
Mn	[%]	0,300	<b>0,802</b>	0,900	0,802
Mg	[%]	1,20	<b>1,64</b>	1,80	1,64
Zn	[%]	0,0000	<b>0,0503</b>	0,250	0,0503
Cr	[%]	0,0000	<b>0,0080</b>	0,100	0,0080
Ni	[%]		<b>0,0049</b>		0,0049
Ti	[%]	0,0000	<b>0,0405</b>	0,150	0,0405
Be	[%]		<b>0,0007</b>		0,0007
Ca	[%]		<b>0,0020</b>		0,0020
Li	[%]		<b>0,0051</b>		0,0051
Pb	[%]		<b>0,0059</b>		0,0059

File Edit View Print Copy Paste Undo Redo Refresh Home Search Close

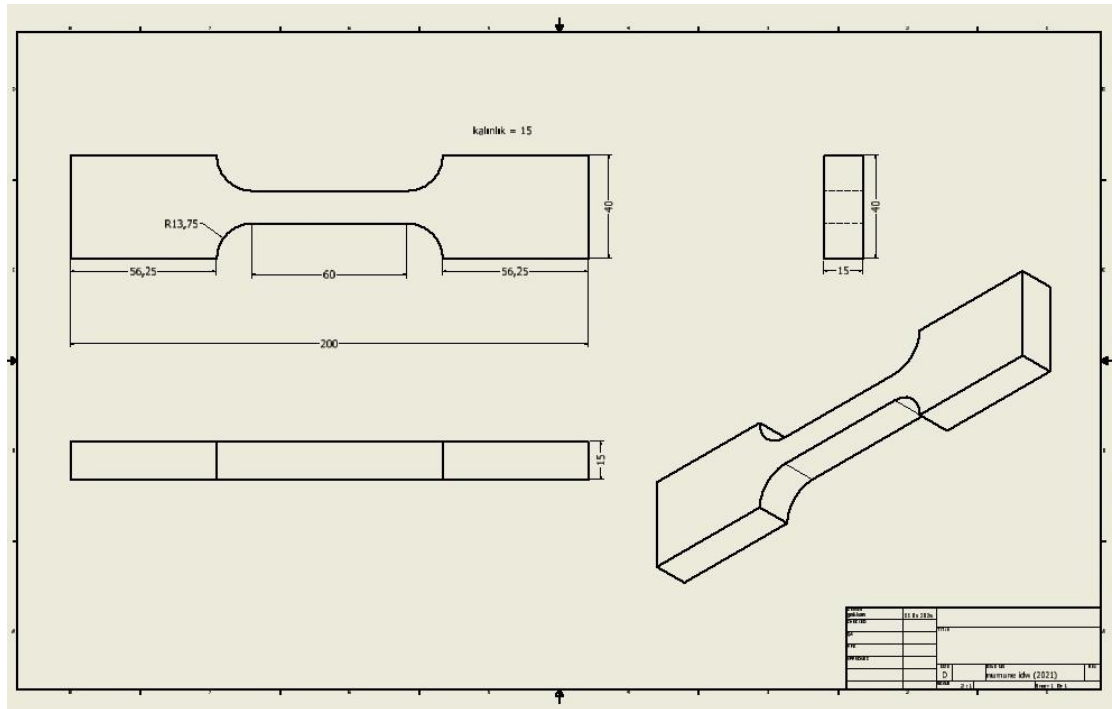
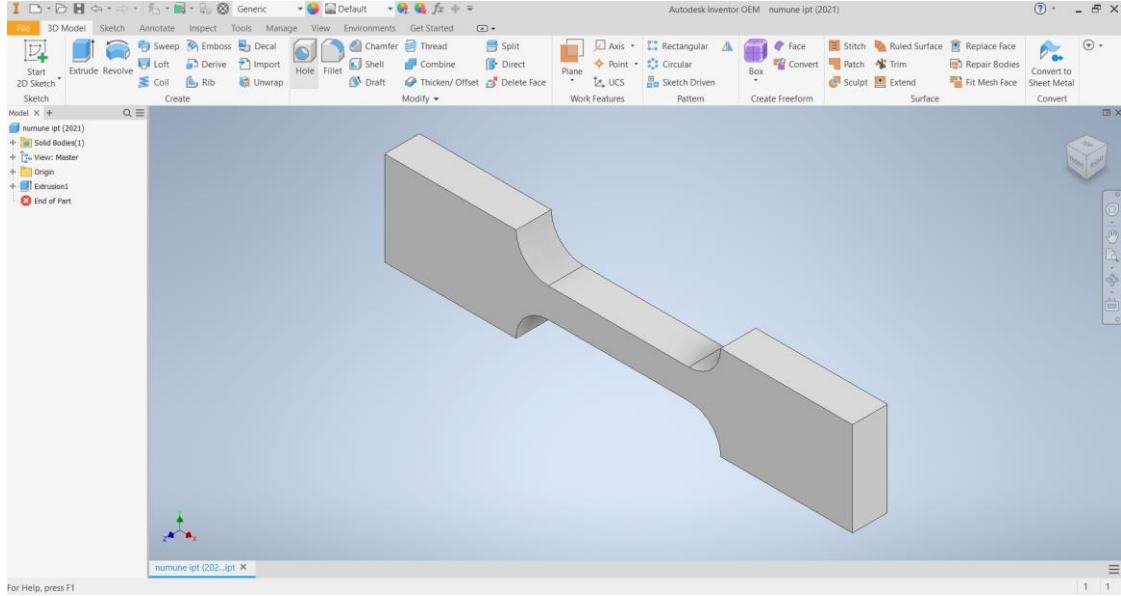
### **EK-3**

Seykoç – AA2024 Alüminyum Görseli



## EK-4

### Numune Ölçüleri (Autocad Inventor)



**EK-5**

Arslan Cnc – ASTM E8M/E10'a Uygun Numune Fotoğrafi



## EK-6

### Brinell Sertlik Sonuçları

Numune	1.ölçüm (HB)	2.ölçüm (HB)	3.ölçüm (HB)	4.ölçüm (HB)	5.ölçüm (HB)	Ortalama (HB)	Tolerans ± (HB)	Tolerans %
İşlem Görmemiş (1.numune)	136.73	137.22	139.41	136.6	138.15	<b>137.62</b>	<b>±1.17</b>	<b>±0.85</b> %
İşlem Görmemiş (2.numune)	138.01	137.88	138.33	137.51	138.2	<b>138</b>	<b>±0.29</b>	<b>±0.21</b> %
İşlem Görmemiş (3.numune)	136.95	138.12	137.4	138.09	137.66	<b>137.64</b>	<b>±0.45</b>	<b>±0.33</b> %
<b>Ortalama</b>						<b>137.75</b>		
<b>Tolerans (±)</b>							<b>±0.64</b>	<b>±0.47</b> %

Numune	1.ölçüm (HB)	2.ölçüm (HB)	3.ölçüm (HB)	4.ölçüm (HB)	5.ölçüm (HB)	Ortalama (HB)	Tolerans ± (HB)	Tolerans %
500 °C 2 saat (4.numune)	90.1	89.11	88.61	89.6	90.04	<b>89.49</b>	<b>±0.63</b>	<b>±0.70</b> %
500 °C 2 saat (5.numune)	89.35	89.42	89	88.87	89.55	<b>89.24</b>	<b>±0.26</b>	<b>±0.29</b> %
500 °C 2 saat (6.numune)	89.7	89.81	89.33	89.58	89.91	<b>89.67</b>	<b>±0.21</b>	<b>±0.23</b> %
<b>Ortalama</b>						<b>89.47</b>		
<b>Tolerans (±)</b>							<b>±0.37</b>	<b>±0.41</b> %

Numune	1.ölçüm (HB)	2.ölçüm (HB)	3.ölçüm (HB)	4.ölçüm (HB)	5.ölçüm (HB)	Ortalama (HB)	Tolerans ± (HB)	Tolerans %
500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat (7.numune)	92.91	93.19	93.19	93.72	93.14	<b>93.23</b>	<b>±0.30</b>	<b>±0.32</b> %
500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat (8.numune)	93.11	93.26	92.94	93.05	93.37	<b>93.15</b>	<b>±0.17</b>	<b>±0.18</b> %
500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat (9.numune)	93.58	93.44	93.31	93.75	93.39	<b>93.49</b>	<b>±0.17</b>	<b>±0.18</b> %
<b>Ortalama</b>						<b>93.29</b>		
<b>Tolerans (±)</b>							<b>±0.21</b>	<b>±0.23</b> %

Numune	1.ölçüm (HB)	2.ölçüm (HB)	3.ölçüm (HB)	4.ölçüm (HB)	5.ölçüm (HB)	Ortalama (HB)	Tolerans ± (HB)	Tolerans %
500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat (10.numune)	104.69	110.53	111.9	109.91	108.83	<b>109.17</b>	<b>±2.74</b>	<b>±2.51</b> %
500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat (11.numune)	110.25	109.7	111.55	110.95	108.92	<b>110.27</b>	<b>±0.97</b>	<b>±0.88</b> %
500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat (12.numune)	108.85	109.3	110.42	109.8	111.02	<b>109.88</b>	<b>±0.79</b>	<b>±0.72</b> %
<b>Ortalama</b>						<b>109.77</b>		
<b>Tolerans (±)</b>							<b>±1.50</b>	<b>±1.37</b> %

Numune	1.ölçü m (HB)	2.ölçü m (HB)	3.ölçü m (HB)	4.ölçü m (HB)	5.ölçü m (HB)	Ortalama ma (HB)	Tolerans ± (HB)	Tolerans %
500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat (13.numune)	93.72	90.1	90.1	92.15	93.72	<b>91.96</b>	<b>±1.81</b>	<b>±1.97</b> %
500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat (14.numune)	92.88	91.05	90.4	92.42	91.85	<b>91.72</b>	<b>±0.93</b>	<b>±1.01</b> %
500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat (15.numune)	90.95	91.55	92.1	92.45	91.33	<b>91.68</b>	<b>±0.57</b>	<b>±0.62</b> %
<b>Ortalama</b>	<b>91.79</b>							
<b>Tolerans (±)</b>							<b>±1.10</b>	<b>±1.20</b> %

Not:

Kullanılan bilye çapı: 2.5 mm

Uygulanan yük: 62.5 kgf kilogram kuvvet

Tolerans ± (HB): Her numunenin beş ölçümünden hesaplanan standart sapma ( $\sigma$ ) değeridir.

Genel Tolerans: 3 numunenin standart sapmalarının ortalamasıdır ( $\approx (1.17 + 0.29 + 0.45) / 3 = 0.64$ ).

Tolerans %:  $\pm (\sigma / \text{Ortalama}) \times 100$  formülüyle hesaplanmıştır.  $0.64 / 137.75 \times 100 = 0.47\%$

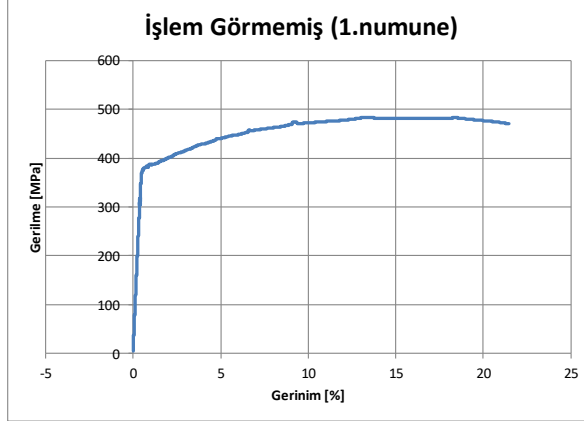
## EK-7

### Çekme Testi Verileri ve Gerilme–Gerinim Eğrileri

#### 1. İşlem Görmemiş

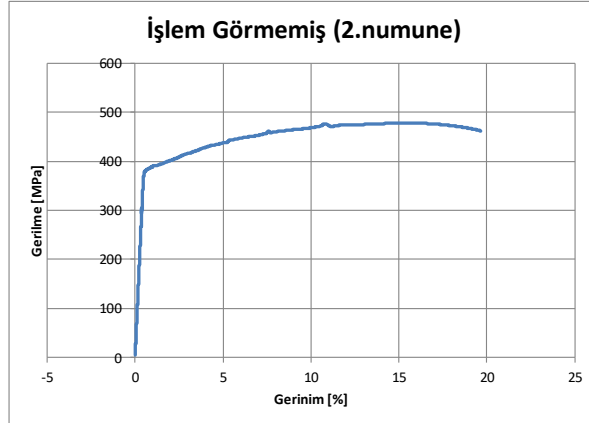
İşlem Gör İşlem Görmemiş (1.numune)  
Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

0	5,291
9,01E-05	5,293104
1,86E-09	5,292506
3,49E-10	5,292007
-0,00018	5,291676
3,49E-10	5,295685
-9,1E-05	5,295159
9,01E-05	5,296418
-0,00036	5,297406
-0,00027	5,295128
-0,00018	5,291675
-9E-05	5,289414
-0,00045	5,285531
-0,00027	5,285984
-0,00045	5,286573
-0,00063	5,289763
-0,00072	5,292523
-0,0009	5,295183
-0,00117	5,295631
-0,00108	5,295991
-0,00117	5,294147
-0,00108	5,293338
-0,00126	5,292412
-0,00153	5,294941



İşlem Gör İşlem Görmemiş (2.numune)  
Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

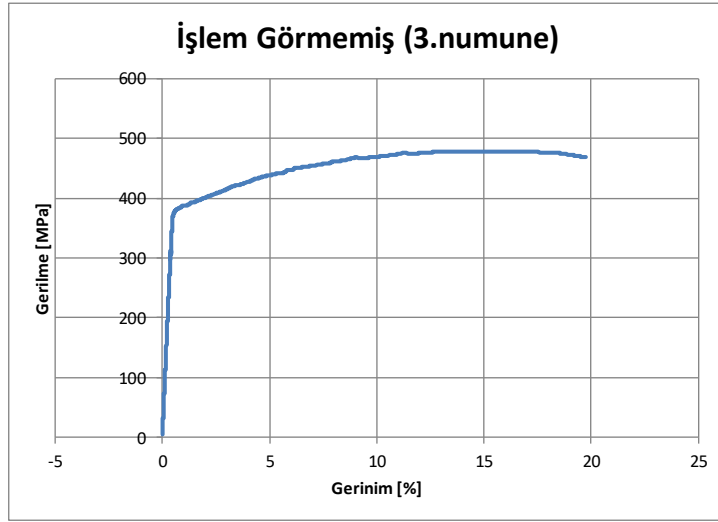
0	5,360891
-0,00018	5,359451
8,96E-05	5,360868
-9,2E-05	5,360144
-0,00045	5,361089
-0,00036	5,360929
-0,00027	5,361478
-9,1E-05	5,36089
-0,00036	5,361687
-0,00036	5,362192
-0,00045	5,364453
-0,00036	5,366075
-0,00036	5,367482
-0,00036	5,366441
-0,00036	5,365502
-0,00036	5,367236
-0,00036	5,368517
-0,00036	5,370357
-0,00045	5,373325
-0,00036	5,3737
-0,00036	5,37403
-0,00027	5,373224
-0,00036	5,371579
-0,00045	5,368824



İşlem Görmüş İşlem Görmemiş (3.numune)

Gerinim Standart Kuvvet

%	MPa
0	5,315294
-4,5E-05	5,315625
4,47E-05	5,316034
-4,6E-05	5,315423
-0,00031	5,31573
-0,00018	5,31765
-0,00018	5,317661
-2,8E-07	5,317997
-0,00036	5,318887
-0,00031	5,318003
-0,00031	5,317408
-0,00023	5,317089
-0,00041	5,315854
-0,00031	5,31556
-0,0004	5,315385
-0,00049	5,317842
-0,00054	5,319859
-0,00063	5,322104
-0,00081	5,323809
-0,00072	5,324176
-0,00076	5,32342
-0,00067	5,322615
-0,00081	5,321332
-0,00099	5,321219

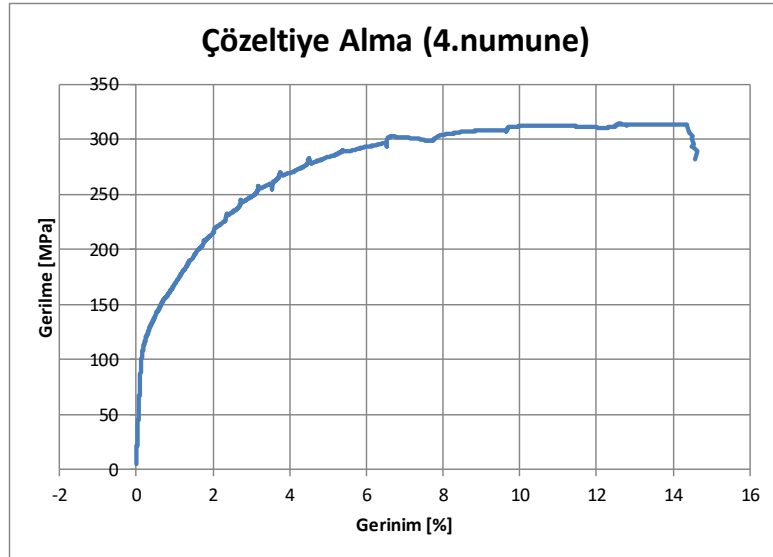


## 2. Çözeltiyeye Alma

Çözeltiyeye / Çözeltiyeye Alma - 1

Gerinim Standart Kuvvet

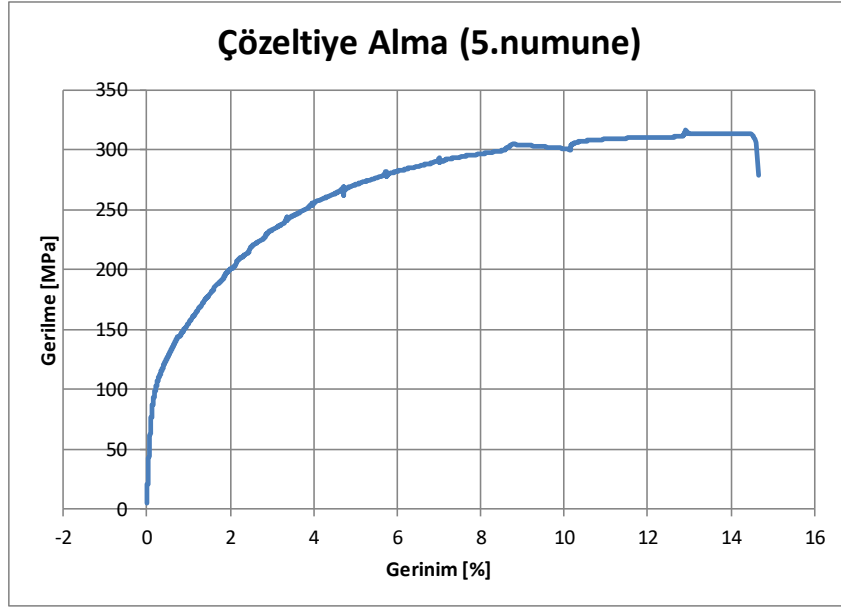
%	MPa
0	5,335386
0,000181	5,336354
0,00054	5,33915
3,72E-09	5,339909
9,15E-05	5,340171
0,00018	5,339859
0,00018	5,339484
0,000178	5,338136
-9,1E-05	5,33934
9,57E-07	5,338102
9,05E-05	5,339387
0,00027	5,3404
0,000358	5,340284
-9,1E-05	5,342021
9,57E-07	5,345494
3,72E-09	5,346339
0,000269	5,348117
0,000269	5,348054
-0,00018	5,347579
-9E-05	5,346829
-9E-05	5,344211
0,00054	5,344768
0,000178	5,347242
-0,00036	5,346131



Çözeltiliye / Çözeltiliye Alma - 2

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

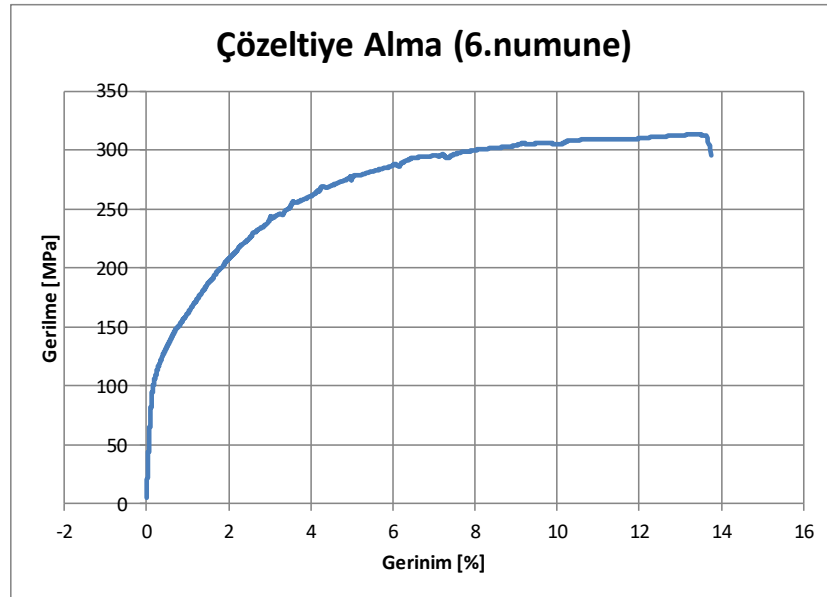
0	5,364772
-9E-05	5,363977
4,64E-07	5,36763
0,00018	5,372341
9,01E-05	5,3735
8,91E-05	5,37319
5,82E-11	5,375472
5,82E-11	5,373831
5,63E-11	5,368536
9,01E-05	5,367022
9,01E-05	5,366045
9,01E-05	5,364599
5,63E-11	5,363799
-9E-05	5,366389
8,86E-05	5,366824
0,00018	5,367941
7,5E-09	5,367618
-9E-05	5,368843
0,00018	5,369009
0,00018	5,367826
9,01E-05	5,368037
-9E-05	5,367951
-9E-05	5,368889
0,00018	5,368941



Çözeltiliye / Çözeltiliye Alma - 3

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

0	5,339379
4,52E-05	5,339465
0,00027	5,342683
8,99E-05	5,345412
9,06E-05	5,346122
0,000134	5,345811
8,99E-05	5,346763
8,89E-05	5,345271
-4,5E-05	5,34323
4,54E-05	5,341857
9,01E-05	5,342011
0,00018	5,341794
0,000179	5,341338
-9E-05	5,343497
4,47E-05	5,345447
8,99E-05	5,346425
0,000134	5,347152
8,94E-05	5,347732
-4,8E-07	5,347577
4,47E-05	5,346613
-6,2E-09	5,345412
0,000225	5,345647
4,4E-05	5,347349
-9E-05	5,346821

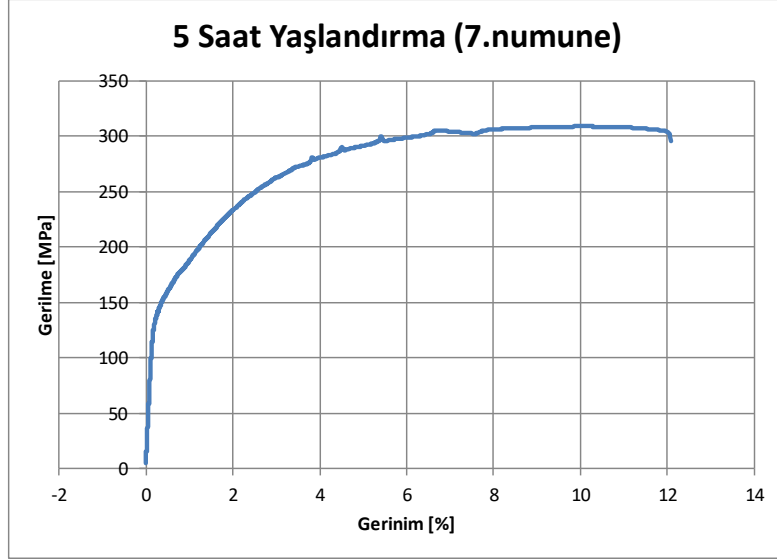


### 3. 5 saat Yaşlandırma Sonrası

5 Saat Yaşlı 5 Saat Yaşlandırma - 1

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

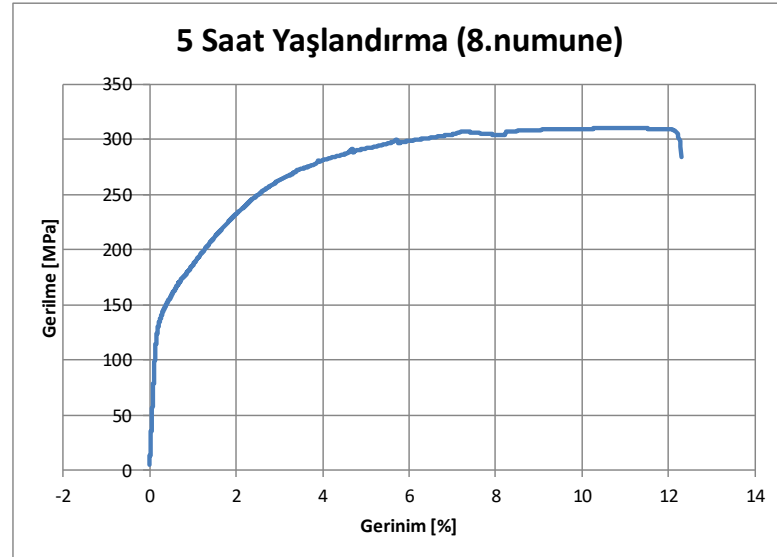
0	5,142809
0	5,145432
-0,00018	5,148694
-9E-05	5,151333
8,87E-05	5,148864
0	5,146772
-0,00018	5,146044
-0,00018	5,144341
-9E-05	5,142337
-2,6E-08	5,144263
-0,00018	5,14719
-0,00027	5,146686
-9E-05	5,146853
-9,2E-05	5,147357
-0,00036	5,146883
-0,00045	5,146656
-0,00036	5,146131
-0,00036	5,14578
-0,00063	5,14377
-0,00081	5,143938
-0,00072	5,141897
-0,00081	5,141168
-0,00081	5,141961
-0,0009	5,143578



5 Saat Yaşlı 5 Saat Yaşlandırma - 2

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

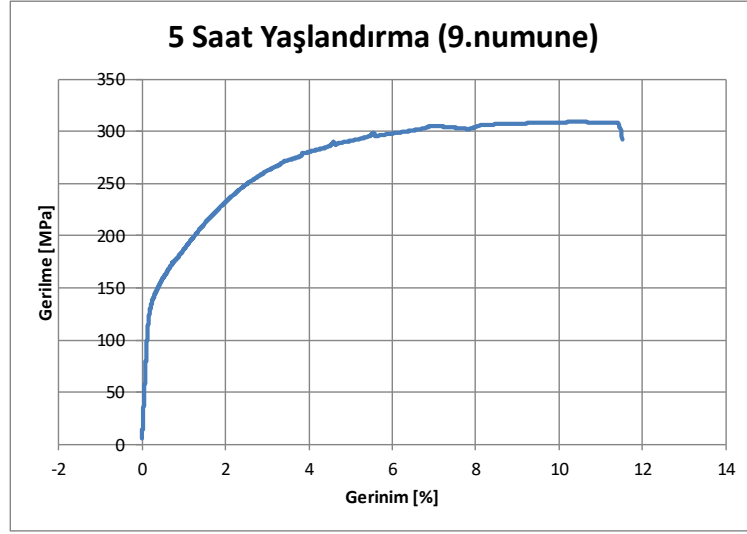
0	5,177306
8,94E-05	5,175607
0,000359	5,176167
0,000359	5,175668
8,94E-05	5,175643
8,94E-05	5,17803
0,000359	5,179876
0,000268	5,181704
8,94E-05	5,183628
-9E-05	5,183547
9,54E-07	5,182172
0,000268	5,180913
0,000179	5,180154
8,94E-05	5,178598
8,94E-05	5,176713
8,94E-05	5,17836
0,000269	5,180088
-9,4E-07	5,180639
-8,9E-05	5,181537
8,94E-05	5,183841
-4,6E-07	5,183732
0,000179	5,184067
0,000179	5,183748
-4,9E-07	5,182795



#### 5 Saat Yaşlı 5 Saat Yaşlandırma - 3

Gerinim Standart Kuvvet

%	MPa
0	5,149738
4,46E-05	5,150199
8,92E-05	5,152106
0,000134	5,153173
8,88E-05	5,151929
4,46E-05	5,152076
8,92E-05	5,152634
4,36E-05	5,152696
-3,8E-07	5,152656
-4,5E-05	5,153577
-8,9E-05	5,154352
-1,1E-06	5,153472
4,47E-05	5,153177
-1,1E-06	5,152652
-0,00014	5,151475
-0,00018	5,152183
-4,6E-05	5,152783
-0,00018	5,152883
-0,00036	5,152328
-0,00036	5,153561
-0,00036	5,152489
-0,00032	5,152292
-0,00032	5,152529
-0,00045	5,15286

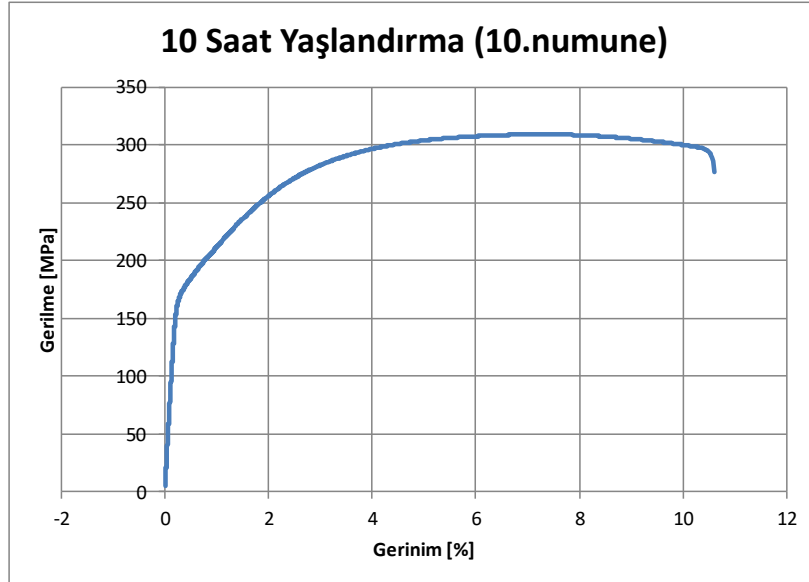


#### 4. 10 Saat Yaşlandırma Sonrası

#### 10 Saat Ya 10 Saat Yaşlandırma - 1

Gerinim Standart Kuvvet

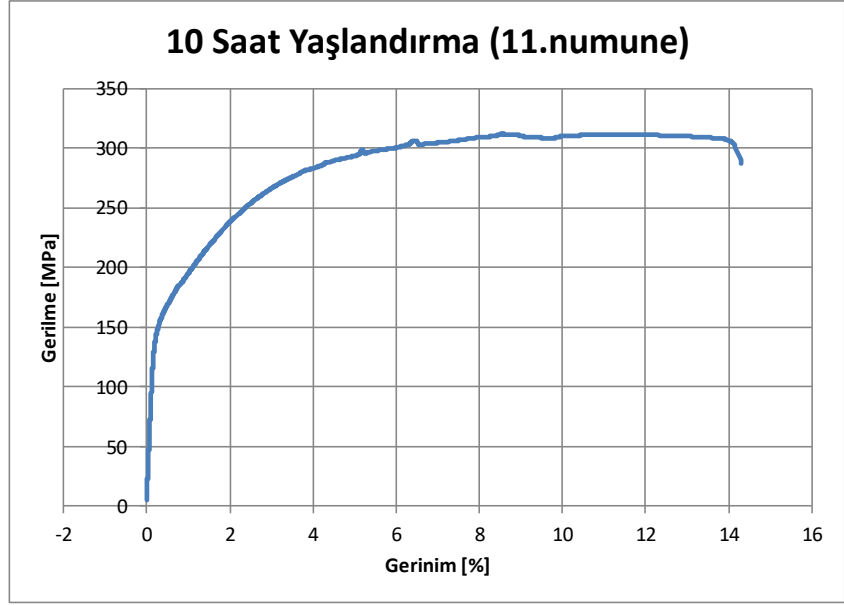
%	MPa
0	5,167858
0	5,167072
0	5,167902
0,00018	5,169996
-4,7E-11	5,172135
-4,7E-11	5,172733
-4,7E-11	5,174151
0,00027	5,173601
8,96E-05	5,172914
-0,00036	5,172516
-0,00018	5,172425
-1,5E-06	5,172743
-9E-05	5,173985
-0,00036	5,173378
-0,00054	5,172972
-0,00027	5,173966
-0,00045	5,172967
-0,00072	5,172046
-0,00054	5,172632
-0,0009	5,172093
-0,00099	5,172547
-0,0009	5,17239
-0,0009	5,172547
-0,00135	5,174143



10 Saat Ya 10 Saat Yaşlandırma - 2

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

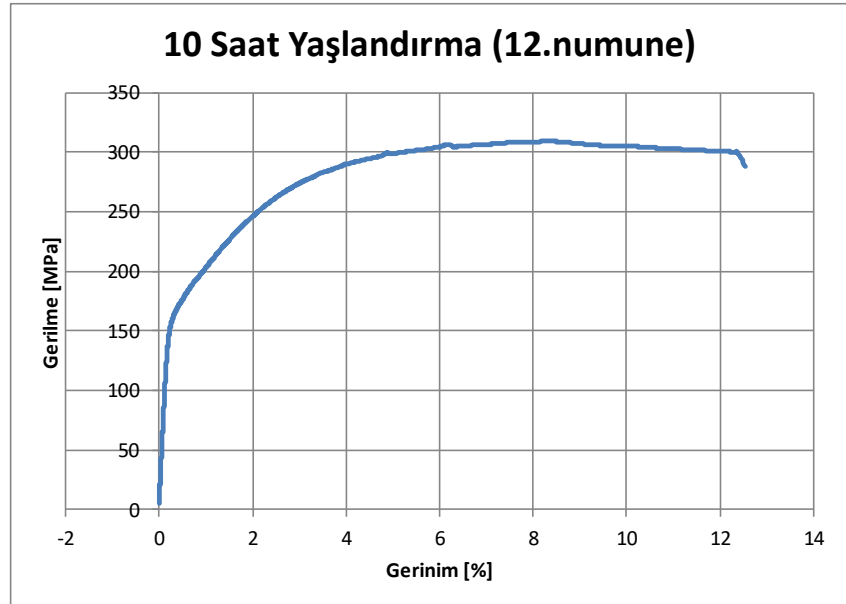
0	5,188727
1,17E-12	5,189056
8,97E-05	5,187627
1,17E-12	5,187166
8,97E-05	5,184946
-9E-05	5,187638
9,02E-05	5,186975
8,93E-05	5,187674
8,93E-05	5,188847
-0,00018	5,190009
-8,8E-05	5,188271
1,39E-08	5,187942
-1,9E-06	5,189675
-0,00027	5,190598
-0,00045	5,190087
-0,00036	5,19013
-0,00018	5,18925
-0,00054	5,185858
-0,00072	5,182072
-0,00063	5,182782
-0,00072	5,184608
-0,00108	5,18703
-0,00117	5,189252
-0,00144	5,18988



10 Saat Ya 10 Saat Yaşlandırma - 3

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

0	5,167936
5,86E-13	5,167708
4,48E-05	5,167409
8,99E-05	5,168224
4,48E-05	5,168183
-4,5E-05	5,169825
4,5E-05	5,170202
0,000179	5,170276
8,92E-05	5,170519
-0,00027	5,1709
-0,00013	5,169987
-7,2E-07	5,169982
-4,6E-05	5,171466
-0,00031	5,171624
-0,00049	5,171166
-0,00031	5,171684
-0,00032	5,170747
-0,00063	5,168594
-0,00063	5,166997
-0,00076	5,167083
-0,00085	5,16822
-0,00099	5,169351
-0,00103	5,170538
-0,00139	5,171647

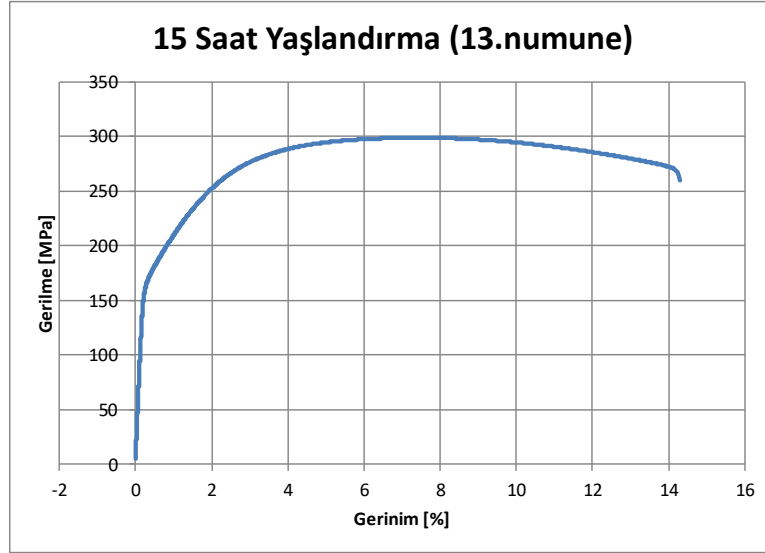


## 5. 15 Saat Yaşlandırma Sonrası

15 Saat Ya 15 Saat Yaşlandırma - 1

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

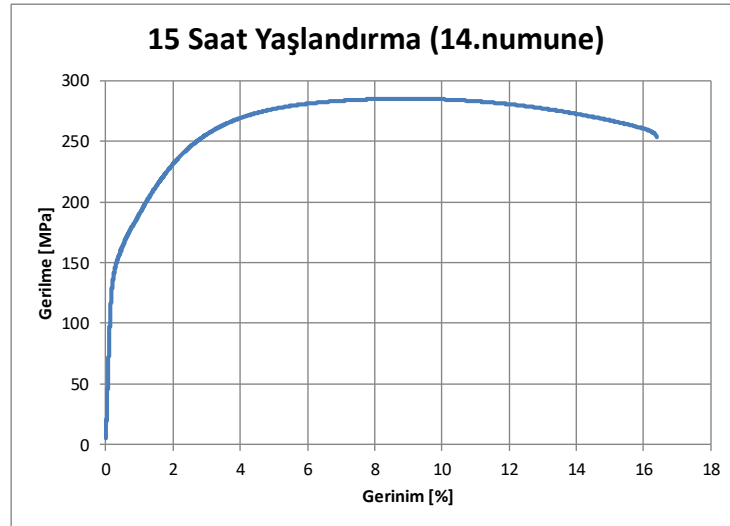
0	5,195274
0,000269	5,195566
0,000179	5,193193
8,94E-05	5,19276
-8,9E-05	5,192473
-0,00018	5,189771
-9,1E-05	5,189359
-0,00036	5,190494
-0,00036	5,190598
-0,00018	5,190963
-0,00018	5,193989
-9,1E-05	5,195674
-0,00054	5,195499
-0,00045	5,193999
-0,00045	5,194046
-0,00045	5,192779
-0,00045	5,192919
-0,00036	5,193051
-0,00045	5,193828
-0,00027	5,193268
-0,00045	5,193432
-0,00036	5,192533
-0,00054	5,194139
-0,00054	5,195859
-0,00045	5,19695



15 Saat Ya 15 Saat Yaşlandırma - 2

Gerinim Standart Kuvvet  
% MPa

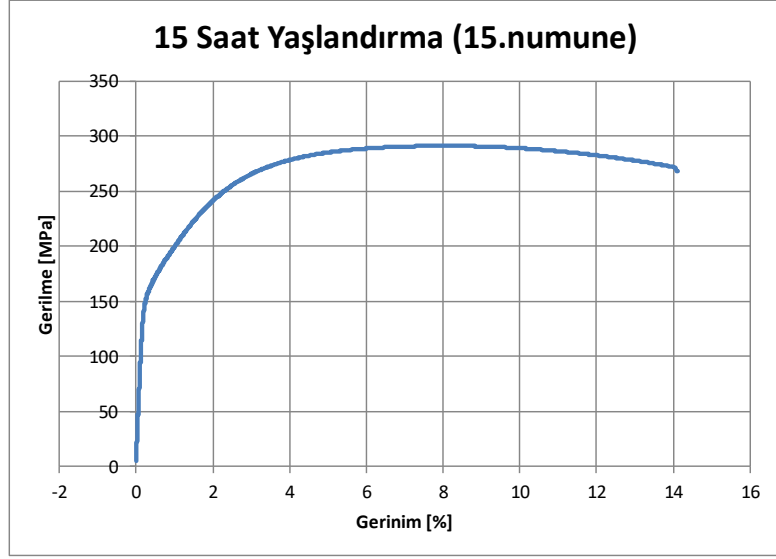
0	5,194169
0,001341	5,192788
0,001077	5,19047
0,000539	5,190112
0,000897	5,189368
0,000716	5,190938
0,000449	5,192878
0,000449	5,190865
0,000538	5,191489
0,001254	5,192919
0,000897	5,191485
0,000719	5,191693
0,00063	5,195073
0,000629	5,196029
0,000716	5,195136
0,000717	5,194896
0,000538	5,196061
0,00072	5,196273
0,000897	5,198137
0,001075	5,197724
0,000627	5,19911
0,00045	5,197681
0,000627	5,196395
0,000717	5,194476
0,000807	5,194653



15 Saat Ya 15 Saat Yaşlandırma - 3

Gerinim Standart Kuvvet

%	MPa
0	5,184332
0,000803	5,183789
0,000627	5,181448
0,000314	5,181053
0,000403	5,180539
0,000268	5,179974
0,000178	5,180736
4,4E-05	5,180298
8,86E-05	5,180661
0,000536	5,181557
0,000358	5,182351
0,000313	5,183296
4,46E-05	5,184895
8,89E-05	5,184624
0,000133	5,184202
0,000133	5,183449
4,37E-05	5,184101
0,00018	5,184273
0,000223	5,185591
0,000402	5,185105
8,82E-05	5,185878
4,43E-05	5,184717
4,33E-05	5,184876
8,83E-05	5,184777
0,000178	5,18541



## EK-8

### Çekme Testi Sonuçları

Numune	a <sub>0</sub> (m m)	b <sub>0</sub> (m m)	S <sub>0</sub> (m m <sup>2</sup> )	R <sub>p0.2</sub> (MP a)	R <sub>m</sub> (MP a)	Agt (corr.) (%)	At (corr.) (%)	Ama nual (%)	E (GPa )	F <sub>m</sub> (kN)	L <sub>0</sub> (m m)	L <sub>u</sub> (m m)	R <sub>m</sub> / R <sub>p0.2</sub>
İşlem Görmemiş (1.numune)	15. 01	124	186 .12 4	380.1 7543 73	483.4 4933 18	13.319 5198	21.50 12389 7	23	78.88 8442 58	89.98 1523 44	50	61. 5	1.271 6479 93
İşlem Görmemiş (2.numune)	15. 05	12. 5	188 .12 5	383.2 4135 69	478.4 3122 92	15.687 83462	19.64 70570 4	20.6	78.36 3846 92	90.00 4875	50	60. 3	1.248 3810 02
İşlem Görmemiş (3.numune)	15. 02	12. 4	186 .24 8	382.1 7722 82	478.4 6845 55	14.553 67721	20.29 93042 6	21.9	78.63 6144 75	89.11 3792 9	50	60. 8	1.251 9543 82
<b>Ortalama</b>	-	-	-	<b>381.8 7</b>	<b>480.1 2</b>	<b>14.52</b>	<b>20.48</b>	<b>21.83</b>	<b>78.63</b>	<b>89.7</b>	-	<b>60. 87</b>	<b>1.257 3</b>
<b>Tolerans (±)</b>	-	-	-	±1.56	±2.89	±1.02	±0.91	±1.20	±0.27	±0.47	-	±0. 49	±0.01 09
<b>Tolerans (%)</b>	-	-	-	±0.41 %	±0.60 %	±7.00 %	±4.44 %	±5.49 %	±0.34 %	±0.52 %	-	±0. 81 %	±0.87 %

Numune	a <sub>0</sub> (m m)	b <sub>0</sub> (m m)	S <sub>0</sub> (m m <sup>2</sup> )	R <sub>p0.2</sub> (MP a)	R <sub>m</sub> (MP a)	Agt (corr.) (%)	At (corr.) (%)	Aman ual (%)	E (GPa )	F <sub>m</sub> (kN)	L <sub>0</sub> (m m)	L <sub>u</sub> (m m)	R <sub>m</sub> / R <sub>p0.2</sub>
500 °C 2 saat (4.numune )	15. 06	12. 36	186 .14 16	129.7 9970 51	314.5 3534 99	12.609 74279	14.57 32351 3	16.6	74.26 7827 37	58.54 8113 28	50	58. 3	2.423 2362 44
500 °C 2 saat (5.numune )	15. 04	12. 46	187 .39 84	117.2 9441 57	316.3 9696 58	12.934 60139	14.67 50684 6	17.4	60.45 3124 25	59.29 2285 16	50	58. 7	2.697 4597 55
500 °C 2 saat (6.numune )	15. 06	12. 4	186 .74 4	126.6 1063 46	313.7 6809 53	12.722 17209	14.63 55684 6	16.9	67.38 0475 81	58.59 4309 19	50	58. 6	2.478 2128 01
<b>Ortalama</b>	-	-	-	<b>124.5 7</b>	<b>314.9</b>	<b>12.75</b>	<b>14.63</b>	<b>16.97</b>	<b>67.37</b>	<b>58.81</b>	-	<b>58. 53</b>	<b>2.533</b>
<b>Tolerans (±)</b>	-	-	-	±6.50	±1.35	±0.16	±0.05	±0.40	±6.91	±0.37	-	±0. 20	±0.14
<b>Tolerans (%)</b>	-	-	-	±5.22 %	±0.43 %	±1.23 %	±0.34 %	±2.36 %	±10.2 6%	±0.62 %	-	±0. 34 %	±5.43 %

Numune	a <sub>0</sub> (m m)	b <sub>0</sub> (m m)	S <sub>0</sub> (m m <sup>2</sup> )	R <sub>p0.2</sub> (MP a)	R <sub>m</sub> (MP a)	Agt (corr. ) (%)	At (corr. ) (%)	Ama nual (%)	E (GP a)	F <sub>m</sub> (kN)	L <sub>0</sub> (m m)	L <sub>u</sub> (m m)	R <sub>m</sub> / R <sub>p0.2</sub>
500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat (7.numune)	15. 04	12. 6	189 .50 4	151. 6044 751	309. 2832 143	9.941 66926 3	12.10 2091 07	15.4	79.6 0614 813	58.6 1040 625	50	57. 7	2.04 0066 522
500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat (8.numune)	15. 04	12. 4	186 .49 6	149. 7075 345	310. 4833 264	11.00 42108 7	12.31 3506 04	15	80.5 7741 373	57.9 0389 844	50	57. 5	2.07 3932 534
500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat (9.numune)	15. 03	12. 5	187 .87 5	150. 6751 304	309. 0173 087	10.54 29400 7	12.24 9304 26	15.3	80.0 4178 093	58.0 5662 687	50	57. 5	2.05 0884 628
<b>Ortalama</b>	-	-	-	<b>150. 66</b>	<b>309. 6</b>	<b>10.49</b>	<b>12.22</b>	<b>15.23</b>	<b>80.0 8</b>	<b>58.1 9</b>	-	<b>57. 57</b>	<b>2.05 56</b>
<b>Tolerans (±)</b>	-	-	-	±0.9 5	±0.7 8	±0.53	±0.12	±0.20	±0.4 9	±0.3 6	-	±0. 12	±0.0 173
<b>Tolerans (%)</b>	-	-	-	±0.6 3 %	±0.2 5 %	±5.02 %	±0.96 %	±1.31 %	±0.6 1 %	±0.6 2 %	-	±0. 21 %	±0.8 4 %

Numune	a <sub>0</sub> (m m)	b <sub>0</sub> (m m)	S <sub>0</sub> (m m <sup>2</sup> )	R <sub>p0.2</sub> (MP a)	R <sub>m</sub> (MP a)	Agt (corr. ) (%)	At (corr. ) (%)	Ama nual (%)	E (GP a)	F <sub>m</sub> (kN)	L <sub>0</sub> (m m)	L <sub>u</sub> (m m)	R <sub>m</sub> / R <sub>p0.2</sub>
500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat (10.numune)	15. 05	12. 44	187 .22 2	180. 0374 769	309. 0203 408	7.278 16812 1	10.62 7169 32	13.6	78.7 8559 925	57.8 5540 625	50	56. 8	1.71 6422 304
500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat (11.numune)	15. 05	12. 51	188 .27 55	160. 6579 936	311. 7988 998	8.566 58334 6	14.31 6637 25	16.6	82.2 6022 703	58.7 0409 375	50	58. 3	1.94 0761 818
500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat (12.numune)	15. 04	12. 45	187 .24 8	170. 3100 587	309. 2858 909	8.012 37573	12.35 6433 88	15.2	80.4 8291 314	57.9 1316 45	50	57. 6	1.81 6016 583
<b>Ortalama</b>	-	-	-	<b>170. 34</b>	<b>310. 04</b>	<b>7.95</b>	<b>12.43</b>	<b>15.13</b>	<b>80.5 1</b>	<b>58.1 6</b>	-	<b>57. 57</b>	<b>1.82 44</b>
<b>Tolerans (±)</b>	-	-	-	±9.6 9	±1.5 3	±0.65	±1.88	±1.50	±1.7 4	±0.4 2	-	±0. 74	±0.1 122
<b>Tolerans (%)</b>	-	-	-	±5.6 9 %	±0.4 9 %	±8.18 %	±15.1 1 %	±9.93 %	±2.1 6 %	±0.7 3 %	-	±1. 28 %	±6.1 5 %

Numune	a <sub>0</sub> (m m)	b <sub>0</sub> (m m)	S <sub>0</sub> (m m <sup>2</sup> )	R <sub>p0.2</sub> (MP a)	R <sub>m</sub> (MP a)	Agt (corr.) (%)	At (corr.) (%)	Ama nual (%)	E (GP a)	F <sub>m</sub> (kN)	L <sub>0</sub> (m m)	L <sub>u</sub> (m m)	R <sub>m</sub> / R <sub>p0.2</sub>
500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat (13.numune)	15. 05	12. 44	187 2	175. 921	298. 499	7.526 6	14.30 53		80.9 0309	55.9 1088			1.70 3389 525
500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat (14.numune)	15. 04	12. 45	187 8	155. 4571 205	284. 9583 173	8.966 56468 6	16.41 1072 52		79.7 6301 75	53.3 5787 5		59. 4	1.83 3034 835
500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat (15.numune)	15. 05	12. 43	187 15	165. 4229 125	291. 0408 578	8.216 33046	14.70 7652 44		80.3 5305 377	54.4 4544 983		58. 8	1.75 9374 523
<b>Ortalama</b>	-	-	-	<b>165. 4</b>	<b>291. 54</b>	<b>8.24</b>	<b>15.14</b>	<b>17.43</b>	<b>80.3 4</b>	<b>54.5 7</b>	-	<b>58. 73</b>	<b>1.76 53</b>
<b>Tolerans (±)</b>	-	-	-	±9.9 3	±6.8 5	±0.72	±1.27	±1.40	±0.5 7	±1.2 7	-	±0. 70	±0.0 650
<b>Tolerans (%)</b>	-	-	-	±6.0 1%	±2.3 5%	±8.79 %	±8.38 %	±8.03 %	±0.7 1%	±2.3 3%	-	±1. 19 %	±3.6 8%

## EK-9

### Çekme Testi Formülleri

1. Başlangıç Kesit Alanı ( $S_0$ ):  $S_0 = a_0 \times b_0$

Burada,  $a_0$ : numunenin kalınlığı (mm),  $b_0$ : numunenin genişliği (mm)

2. Akma Dayanımı ( $R_{p0.2}$ ):  $R_{p0.2} = F_{0.2} / S_0$

$F_{0.2}$ : 0.2% plastik şekil değişimi esnasında ölçülen kuvvet (N)

3. Çekme Dayanımı ( $R_m$ ):  $R_m = F_m / S_0$

$F_m$ : Numunenin kopmadan önce maruz kaldığı maksimum kuvvet (N)

4. Üniiform Uzama ( $A_{gt}$ ):  $A_{gt} = [(L_{gt} - L_0) / L_0] \times 100$

$L_{gt}$ : üniiform uzamanın sona erdiği boy;  $L_0$ : başlangıç boyu

5. Toplam Uzama ( $A_t$ ):  $A_t = [(L_u - L_0) / L_0] \times 100$

$L_u$ : kopma sonrası boy;  $L_0$ : başlangıç boyu

6. Elle Hesaplanan Uzama ( $A_{manual}$ ):  $A_{manual} = [(L_u - L_0) / L_0] \times 100$

Kopma sonrası boyun elle ölçülmesi durumudur.

7. Elastik Modül ( $E$ ):  $E = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon$

Malzemenin elastik davranış gösterdiği doğrusal bölgedeki gerilme/şekil değiştirme oranıdır.

8. Gerilme Oranı ( $R_m / R_{p0.2}$ ):  $R_m / R_{p0.2} = \text{Çekme Dayanımı} / \text{Akma Dayanımı}$

9. Ortalama Değer ( $\bar{x}$ ):  $\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$

$n$ : veri sayısı

10. Tolerans ( $\pm$ ):  $\text{Tolerans} (\pm) = \sqrt{[\sum(x_i - \bar{x})^2 / (n - 1)]}$

Bu formül standart sapmayı ifade eder. 3 numune için hesap yapılırken kullanılabilir.

Alternatif:  $\text{Tolerans} (\pm) = (\text{maksimum} - \text{minimum}) / 2$

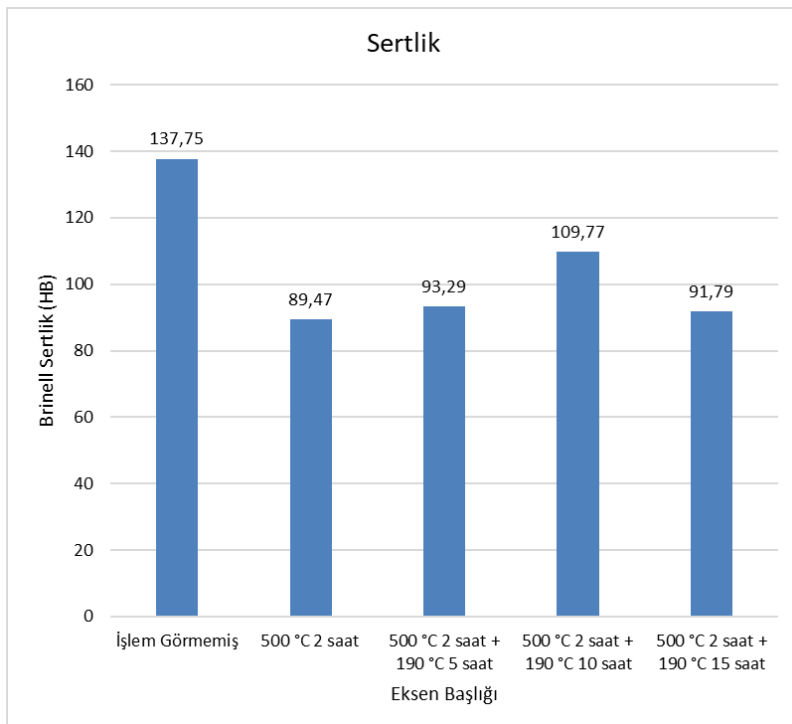
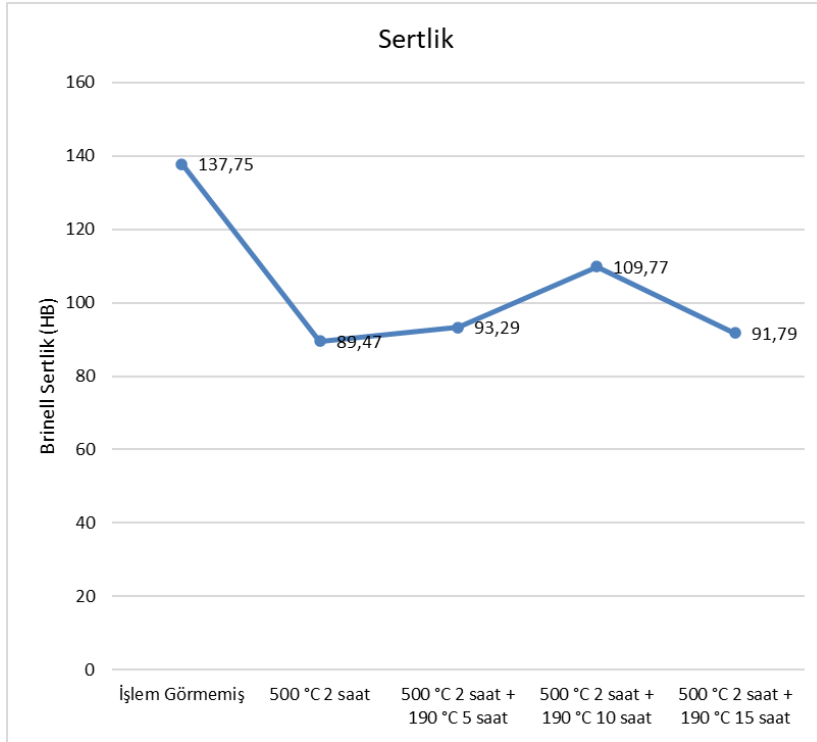
Üçlü ölçüm setleri için pratik bir yaklaşımdır.

11. Tolerans (%) (Görelî Tolerans):  $\text{Tolerans} (\%) = [\text{Tolerans} (\pm) / \text{Ortalama}] \times$

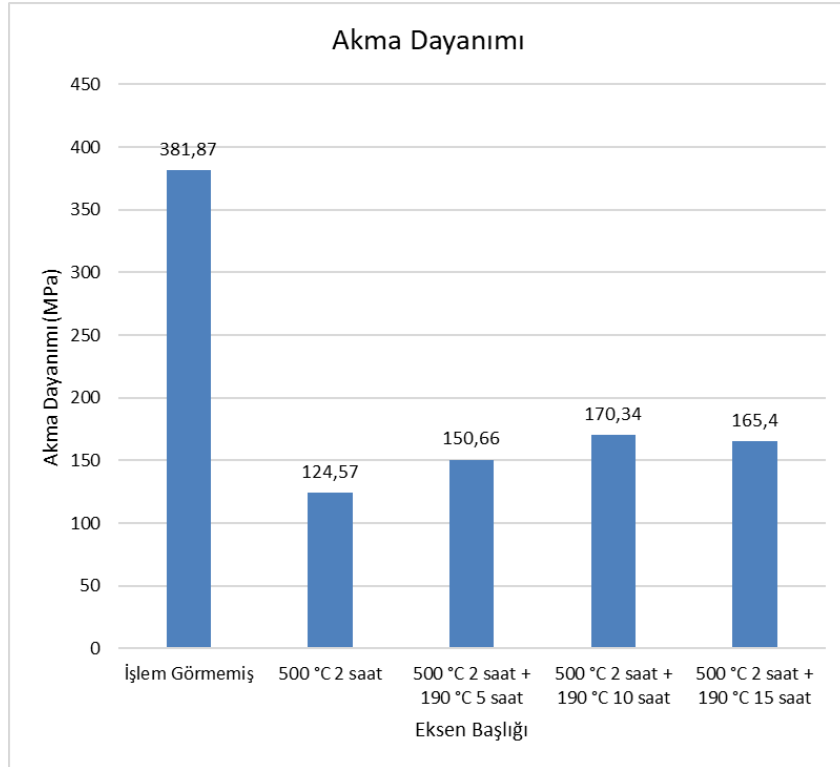
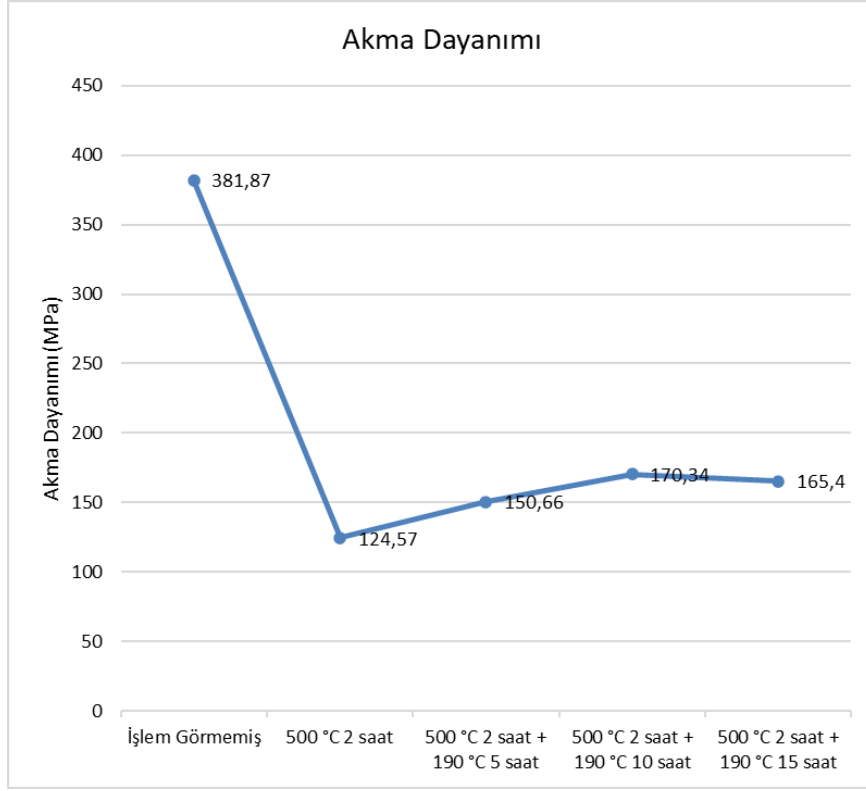
## EK-10

### Mekanik Özellik Grafikleri

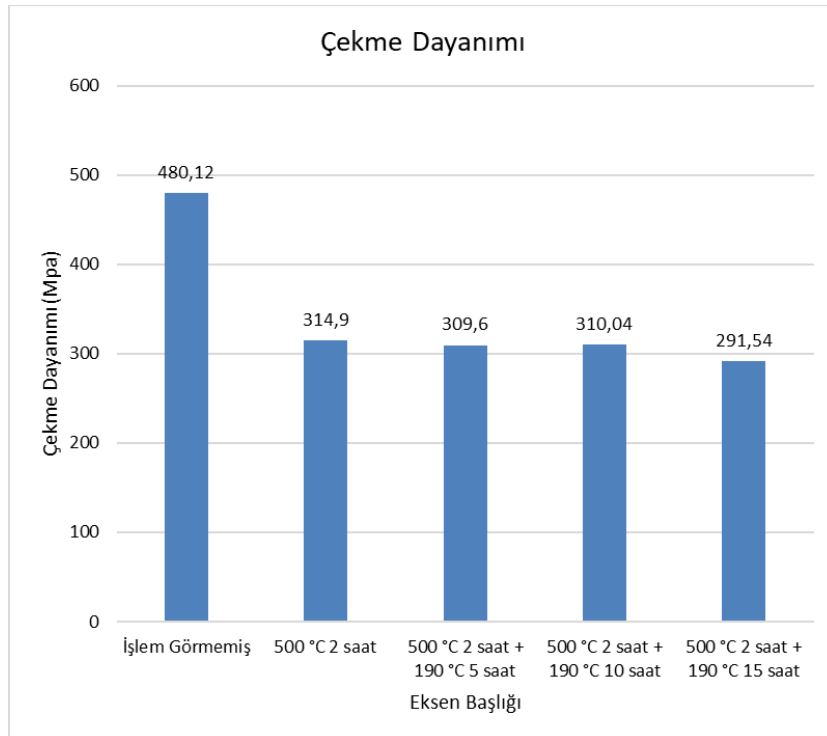
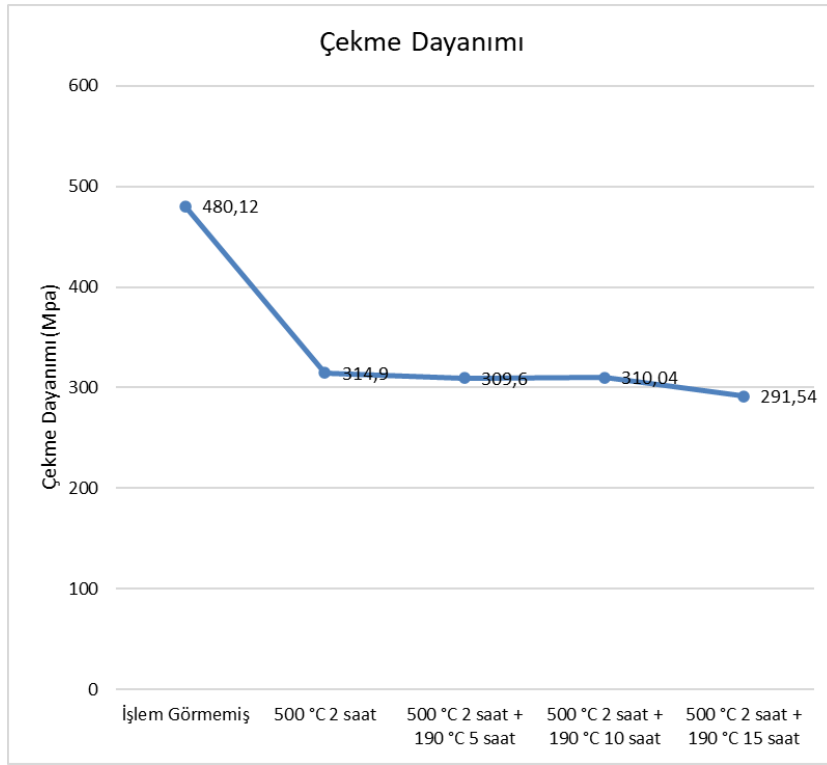
#### 1. Sertlik



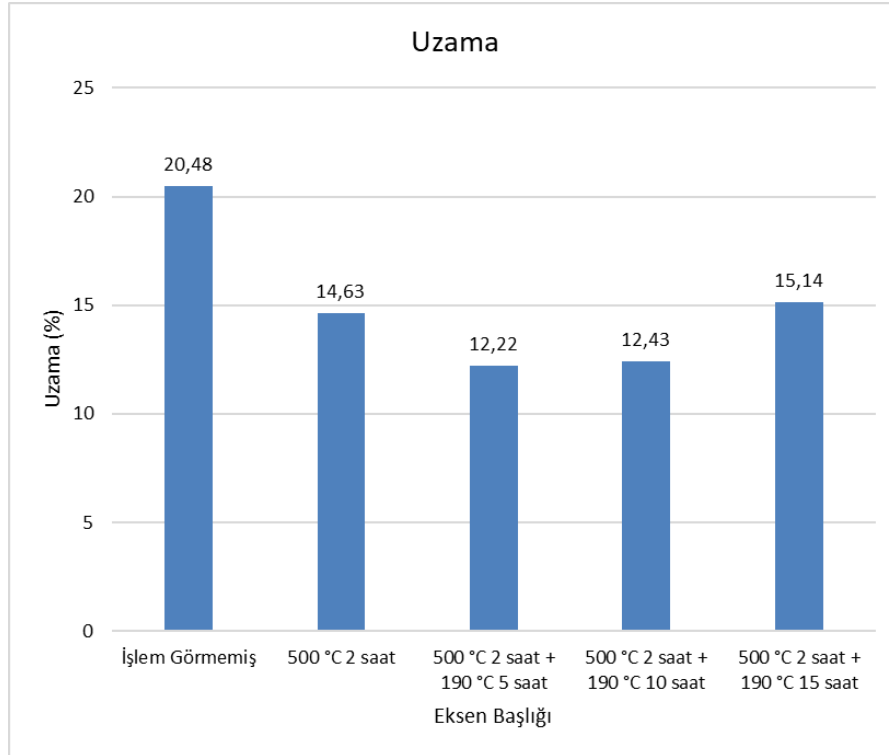
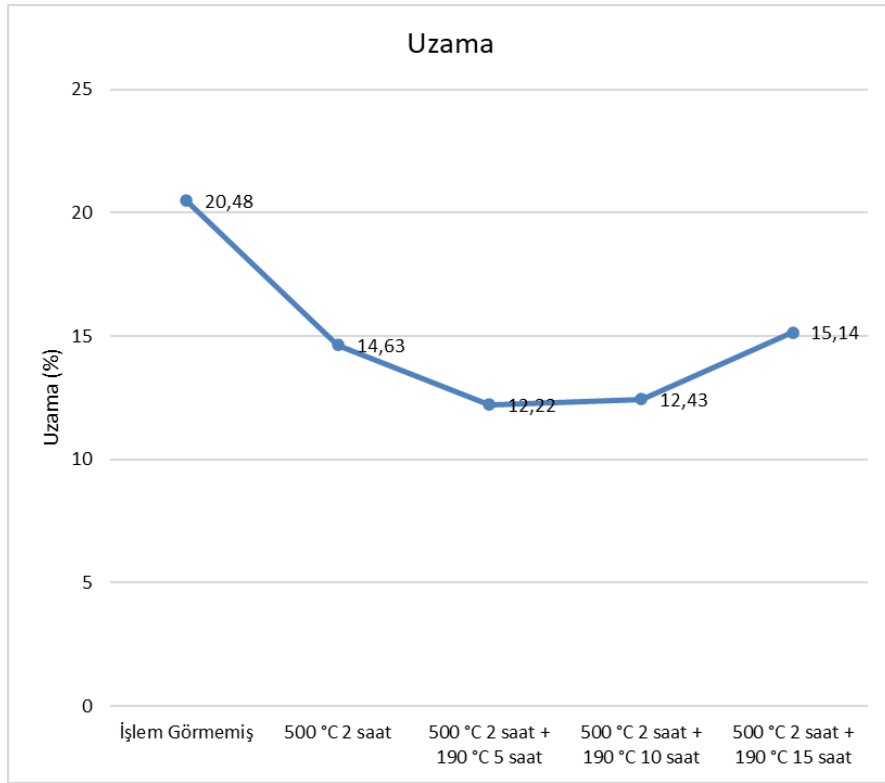
## 2. Akma Dayanımı



### 3. Çekme Dayanımı



#### 4. Uzama



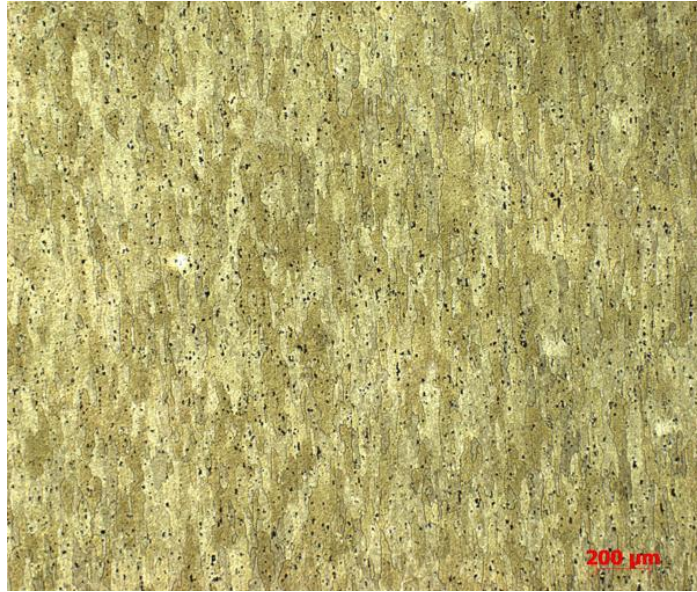
## EK-11

### SEM Mikroyapı Görüntüleri

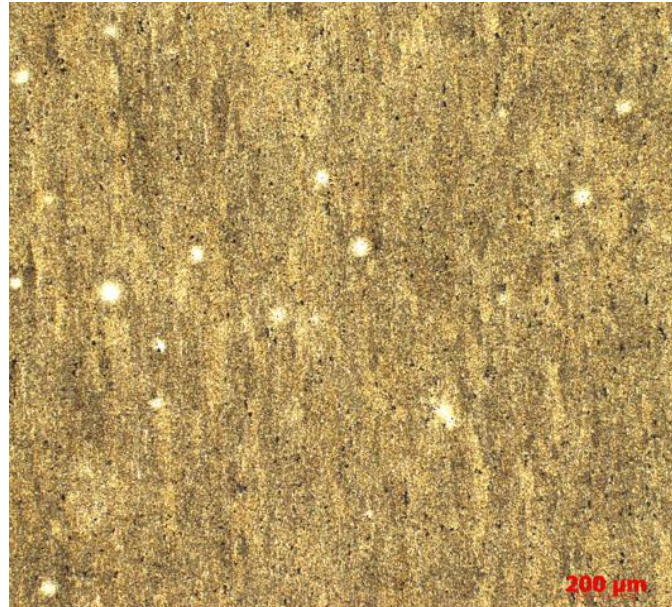
Büyütme Katsayıları ve Ölçek Çubukları sırasıyla: 5x 200  $\mu\text{m}$ , 10x 100  $\mu\text{m}$ , 20x 50  $\mu\text{m}$ , 50x 20  $\mu\text{m}$

1. Büyütme Katsayısı: 5x, Ölçek Çubuğu: 200  $\mu\text{m}$

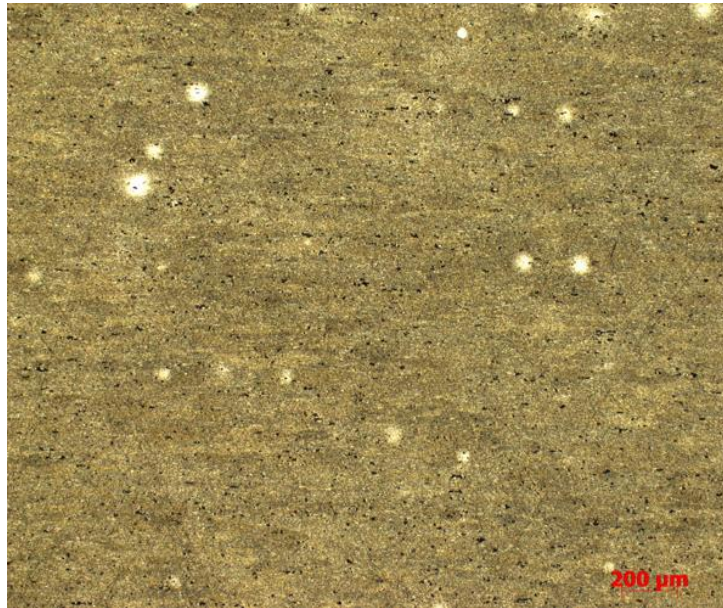
- İşlem Görmemiş



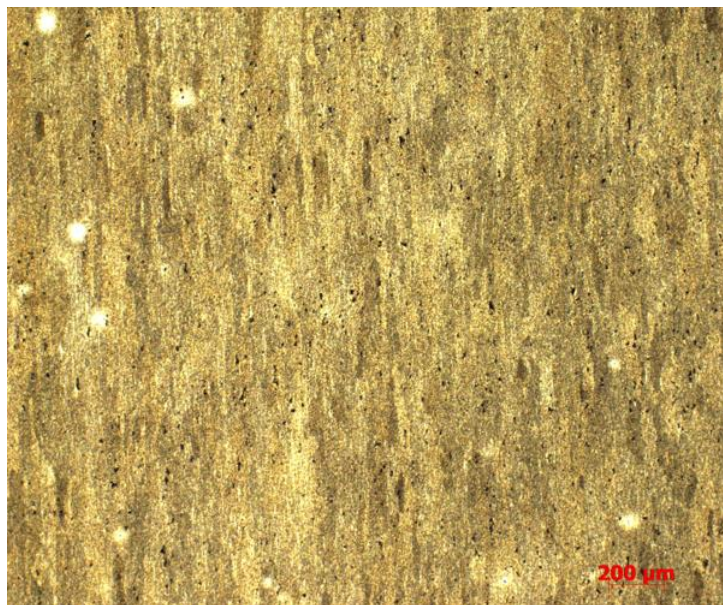
- 500 °C 2 saat



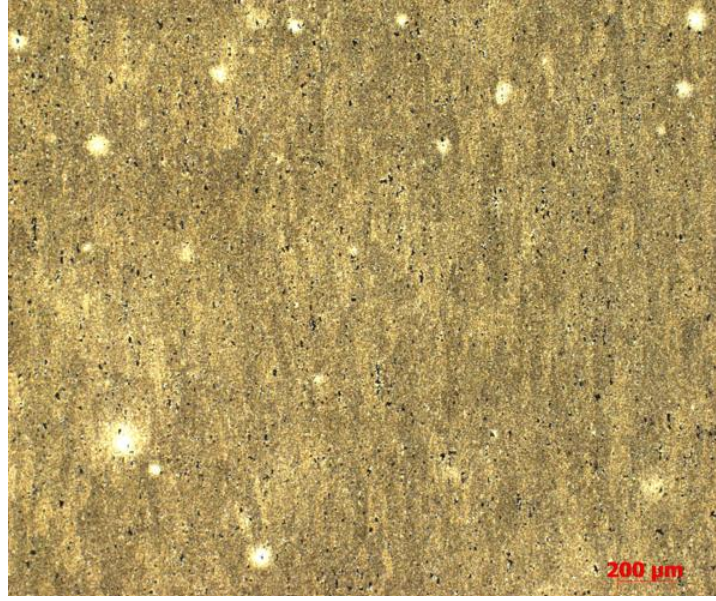
- 500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat



- 500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat



- 500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat

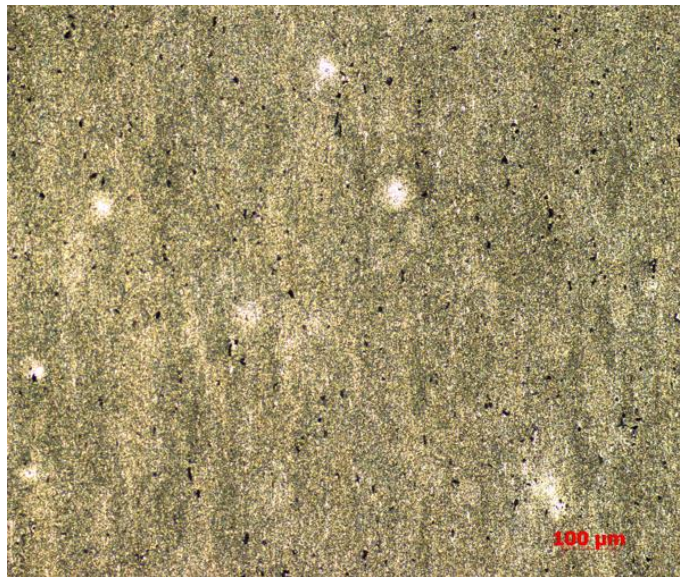


2. Büyütme Katsayısı: 10x, Ölçek Çubuğu: 100 μm

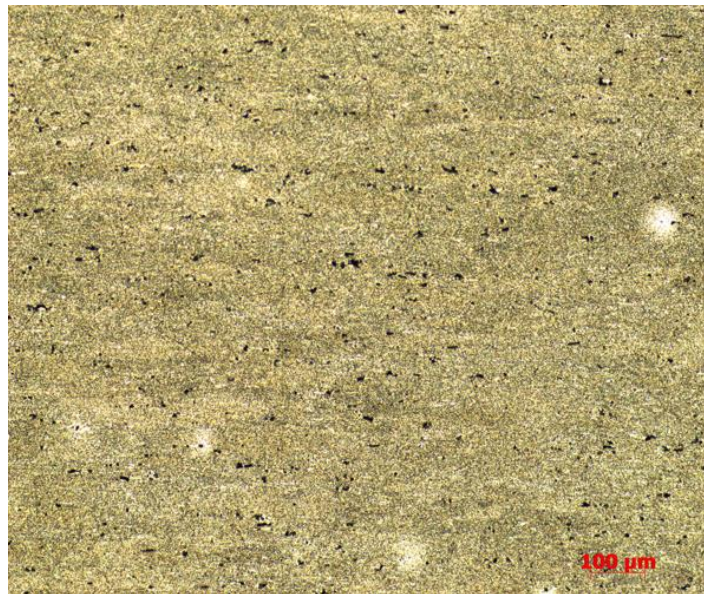
- İşlem Görmemiş



- 500 °C 2 saat



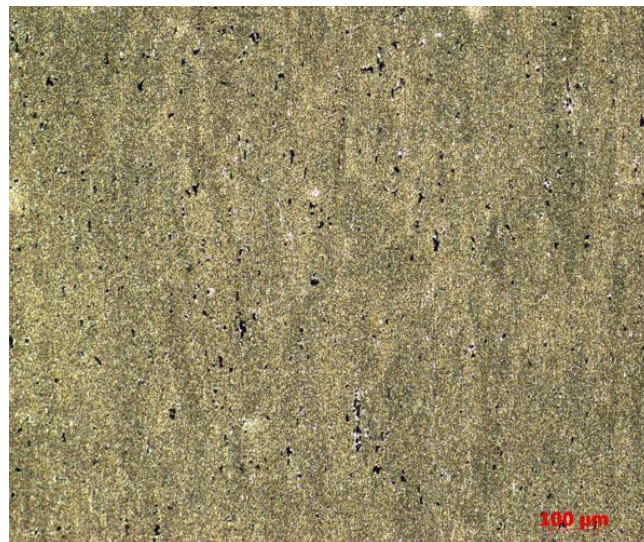
- 500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat



- 500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat

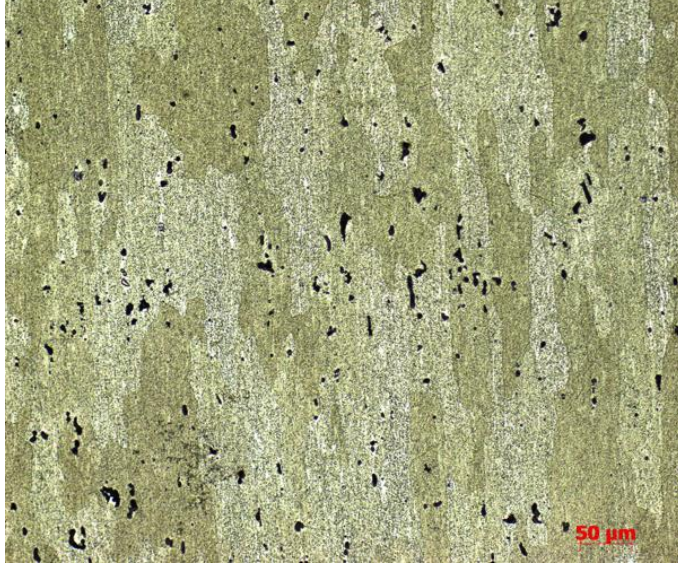


- 500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat

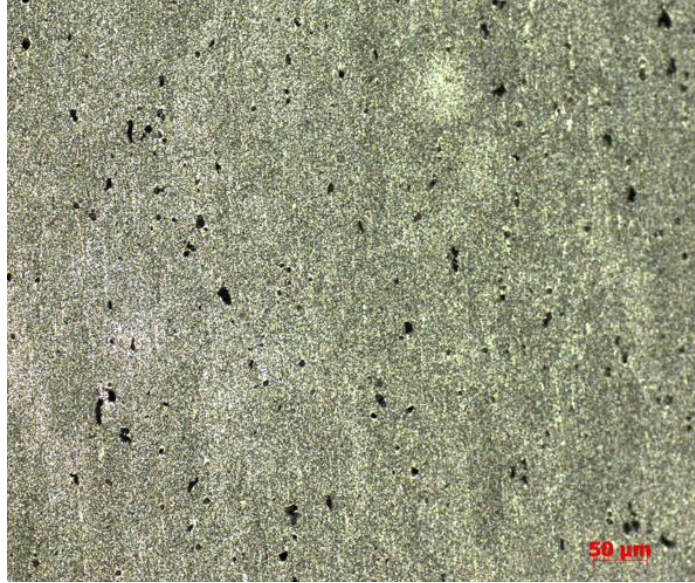


3. Büyütme Katsayısı: 20x, Ölçek Çubuğu: 50  $\mu\text{m}$

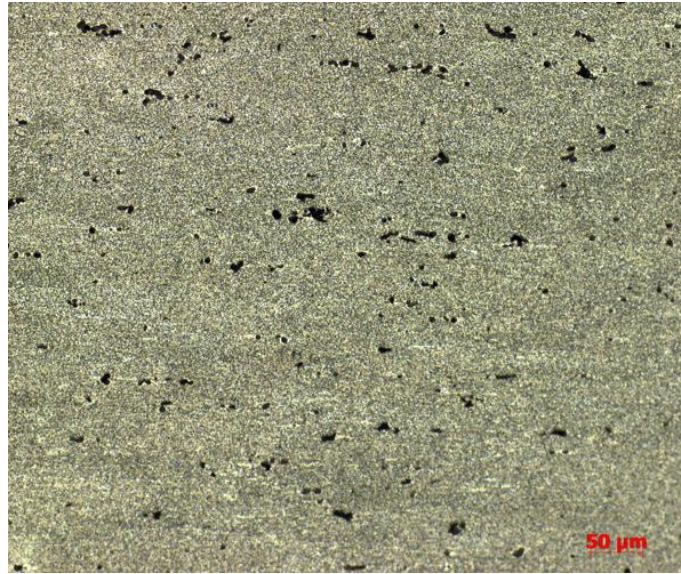
- İşlem Görmemiş



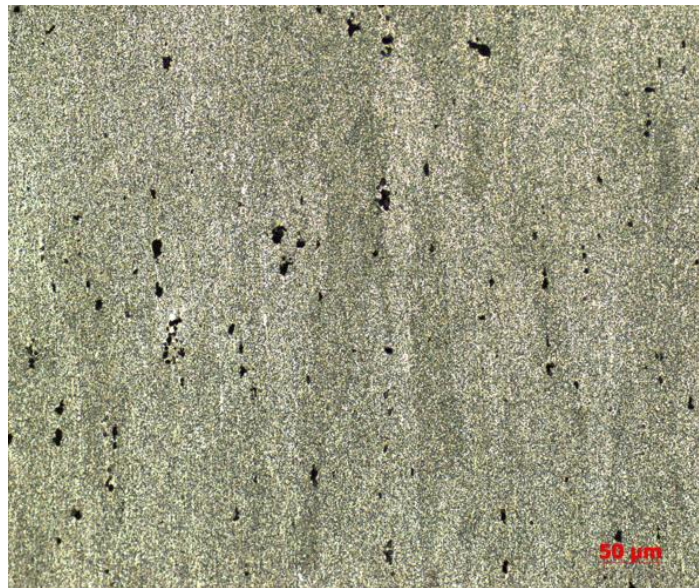
- 500 °C 2 saat



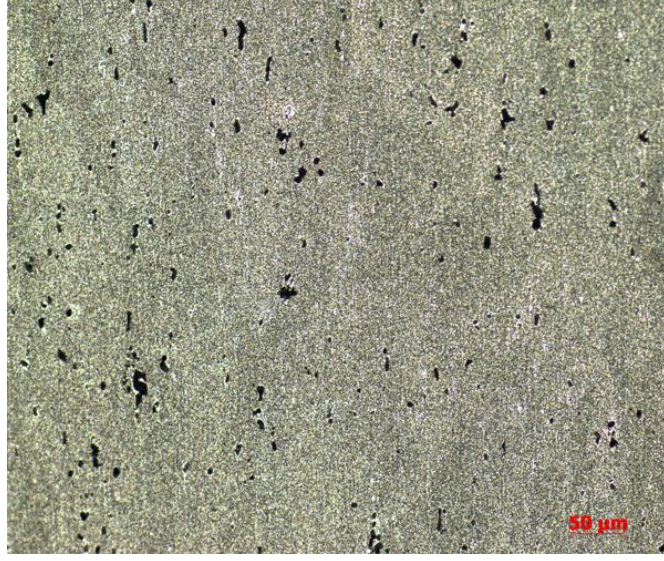
- 500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat



- 500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat

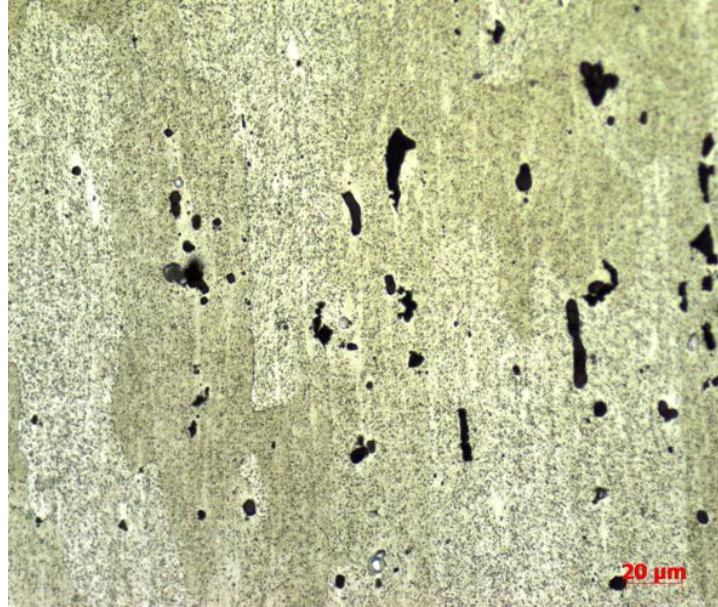


- 500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat

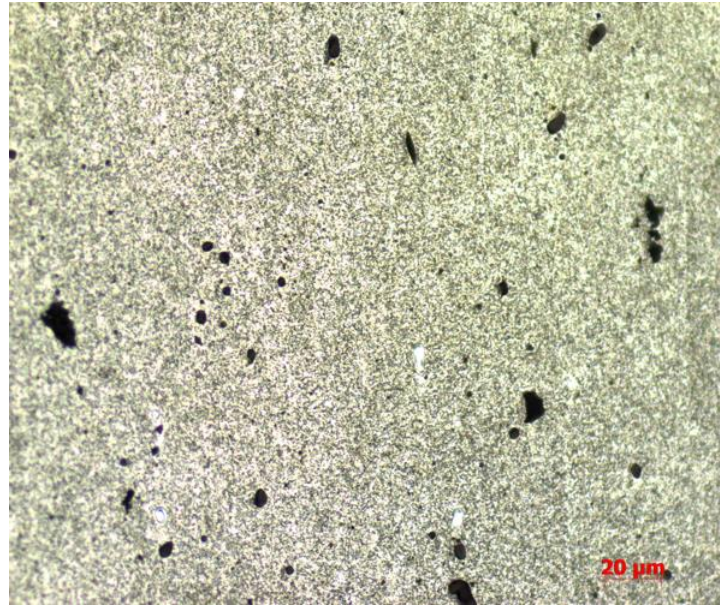


4. Büyütme Katsayısı: 50x, Ölçek Çubuğu: 20 μm

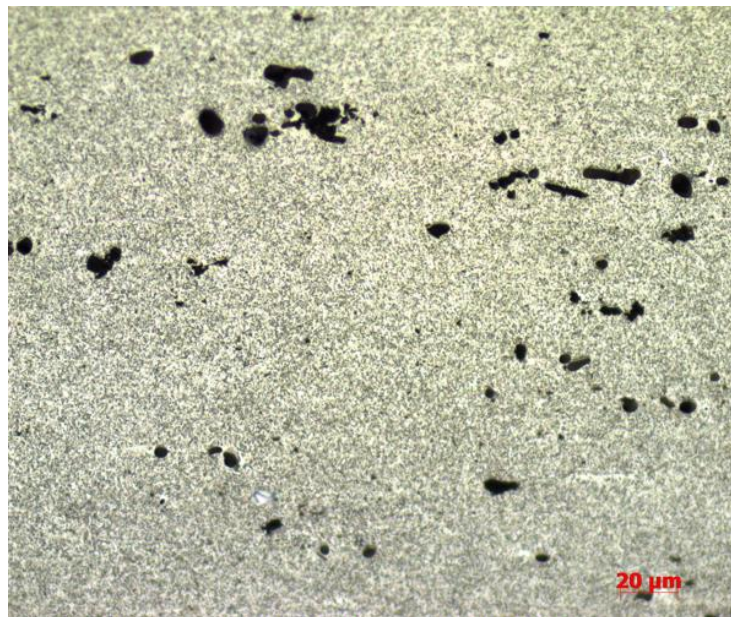
- İşlem Görmemiş



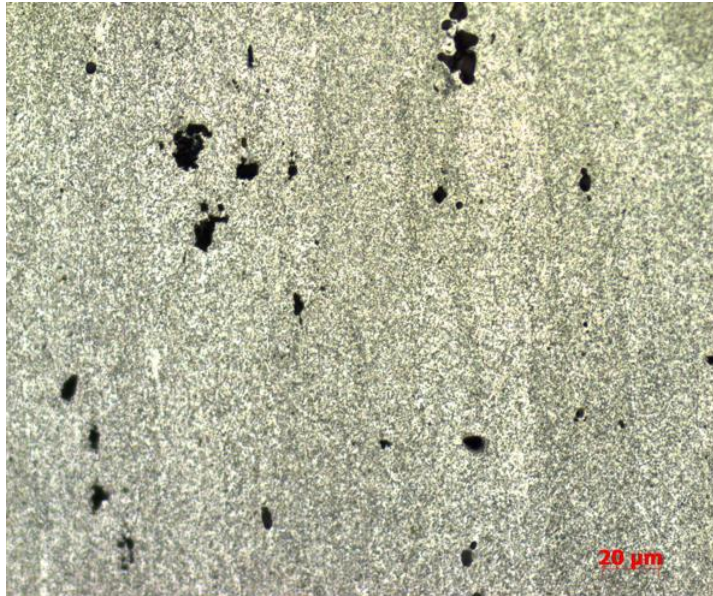
- 500 °C 2 saat



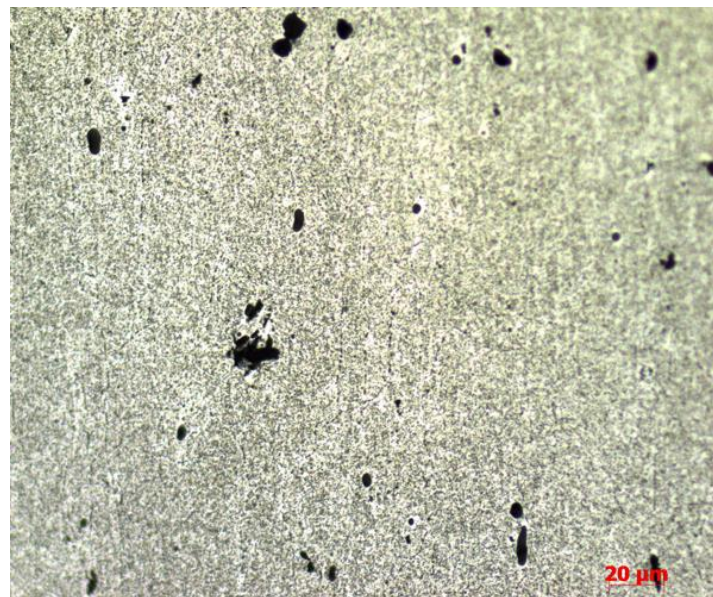
- 500 °C 2 saat + 190 °C 5 saat



- 500 °C 2 saat + 190 °C 10 saat



- 500 °C 2 saat + 190 °C 15 saat





## ÖZGEÇMİŞ

<b>KİŞİSEL BİLGİLER</b>	
<b>Adı Soyadı</b>	Gökhan AKÖZ
<b>Uyruğu</b>	T.C.
<b>Orcid Numarası</b>	0009-0007-2686-1270

<b>EĞİTİM BİLGİLERİ</b>	
<b>Lisans</b>	
<b>Üniversite</b>	ODTÜ Kuzey Kıbrıs Kampusu
<b>Fakülte</b>	Mühendislik Fakültesi
<b>Bölümü</b>	Makine Mühendisliği (İngilizce)
<b>Mezuniyet Yılı</b>	2017
<b>Yüksek Lisans</b>	
<b>Üniversite</b>	Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi
<b>Enstitü</b>	Fen Bilimleri Enstitüsü
<b>Anabilim Dalı</b>	Makine Mühendisliği (Tezli)
<b>Mezuniyet Yılı</b>	2025

<b>Tezden Üretilen Makaleler ve Bildiriler</b>
Aköz, G., Tuna, B., ve Kurban, A. O. (2025, July 12–13). Suni yaşlandırma prosesinin alüminyumun sertlik ve mikroyapı üzerindeki etkisinin araştırılması. 7. BİLSEL International Truva Scientific Researches and Innovation Congress, Çanakkale, Türkiye.