

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANAN
STABİLİZASYON ISIL İŞLEMİNİN YAŞLANMA
MEKANİZMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Emre ÇANKAYA

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Danışman

Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ

Şubat, 2024

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMINA UYGULANAN
STABİLİZASYON ISIL İŞLEMİNİN YAŞLANMA
MEKANİZMASINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ**

Emre ÇANKAYA tarafından hazırlanan tez çalışması 29.02.2024 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Malzeme Programı **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ
Yıldız Teknik Üniversitesi
Danışman

Jüri Üyeleri

Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ, Danışman
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Mustafa ÇİĞDEM, Üye
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Ergün KELEŞOĞLU, Üye
Türk Alman Üniversitesi

Danışmanım Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ sorumluluğunda tarafımca hazırlanan “6063 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Stabilizasyon Isıl İşleminin Yaşlanma Mekanizmasına Etkisinin İncelenmesi” başlıklı çalışmada veri toplama ve veri kullanımında gerekli yasal izinleri aldığımı, diğer kaynaklardan aldığım bilgileri ana metin ve referanslarda eksiksiz gösterdiğimi, araştırma verilerine ve sonuçlarına ilişkin çarpıtma ve/veya sahtecilik yapmadığımı, çalışmam süresince bilimsel araştırma ve etik ilkelerine uygun davrandığımı beyan ederim. Beyanımın aksinin ispatı halinde her türlü yasal sonucu kabul ederim.

Emre ÇANKAYA

İmza



Aileme
ve
Sevdiklerime

TEŞEKKÜR

Tez çalışmamda ve meslek hayatıma başlamamda büyük emeği olan, bilgi ve tecrübeleri ile beni yönlendiren ve her şeyden önce manevi olarak kendisini her daim yanımda hissettiğim saygıdeğer danışman hocam Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ'a içtenlikle teşekkür ederim.

Deneyisel çalışmalarım sırasında tüm laboratuvar imkânlarını ve hammadde teminini sağlayan ASAŞ Alüminyum Sanayi ve Tic. A.Ş.'ye, ASAŞ Alüminyum Ar-Ge merkezi müdürü Görkem ÖZÇELİK ve ekstrüzyon Ar-Ge ekibine, tez çalışmam sırasında değerli desteklerini esirgemeyen Mehmet Buğra GÜNER, Anıl Umut ÖZDEMİR ve Barış AKIN'a teşekkürlerimi sunarım.

BİDEB 2210/A bursiyeri olduğum ve yüksek lisans eğitimim süresince maddi ve manevi olarak desteklerini esirgemeyen TÜBİTAK'a teşekkürü borç bilirim.

Son olarak, beni bugüne dek çeşitli zorluklarla yetiştiren ve desteklerini hiçbir zaman esirgemeyen değerli aileme, sevdiklerime ve motivasyon kaynağım Damla İNCAZ'a sonsuz teşekkür ediyorum.

Emre ÇANKAYA

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	iv
SİMGE LİSTESİ	vii
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
TABLO LİSTESİ	xi
ÖZET	xii
ABSTRACT	xiv
1 GİRİŞ	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	2
1.3 Hipotez	3
2 ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİ, TARİHİ VE ÜRETİMİ	4
2.1 Alüminyumun Özellikleri	4
2.2 Alüminyumun Tarihsel Gelişimi	5
2.3 Alüminyum Alaşımları	6
2.3.1 Dövme Alüminyum Alaşımları	6
2.3.2 Döküm Alüminyum Alaşımları	7
2.4 Alüminyuma Alaşım Elementinin Etkileri	9
2.5 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımları	11
2.6 Birincil Alüminyum Üretimi.....	12
2.6.1 Bayer Prosesi	13
2.6.2 Hall-Heroult Prosesi	15
2.7 İkincil Alüminyum Üretimi	17
3 ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON YÖNTEMLERİ	19
3.1 Doğrudan Ekstrüzyon	20
3.2 Dolaylı Ekstrüzyon	21
3.2.1 Alüminyum Ekstrüzyon İşlem Basamakları	22
4 6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ STABİLİZASYON ISIL İŞLEMİ	31
4.1 Stabilizasyon Isıl İşlemi	31
4.2 Stabilizasyon Isıl İşleminin Uygulanması.....	32
4.3 6063 Alaşımına Stabilizasyon Isıl İşleminin Uygulanması	33

5 DENEYSEL ÇALIŞMALAR	35
5.1 Malzeme ve Teçhizat	35
5.2 6063 Alaşımının Stabilizasyon Çalışmaları	36
5.2.1 Doğrudan Soğutmalı Döküm (Direct Chill Casting)	36
5.2.2 Homojenizasyon	37
5.2.3 Ekstrüzyon	37
5.2.4. Deney Planı	37
5.3 Karakterizasyon Çalışmaları	40
6 SONUÇLAR VE TARTIŞMA	44
6.1 Mekanik Testler	44
6.1.1 Çekme Testleri	44
6.1.2 Üç Nokta Eğme Testleri	49
6.1.3 Mikrosertlik Testleri	54
6.2 Mikroyapı İncelemeleri	55
6.2.1 Tane Boyut Analizleri	55
6.2.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) Analizleri	56
6.2.3 EDS Haritalama (EDS Mapping)	57
6.2.4 Kırılma Yüzeyi Analizleri	58
7 SONUÇ	59
KAYNAKÇA	62
TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR	70

SİMGE LİSTESİ

A	Amper
Å	Armstrong
atm	Atmosfer basıncı
cal	Kalori
cm	Santimetre
dk	Dakika
h	Saat
kA	Kiloamper
kcal	Kilokalori
kg	Kilogram
mm	Milimetre
mm/dk	Milimetre/dakika
MN	Meganewton
ohm	Elektrik direnci
V	Voltaj
µm	Mikrometre
°C	Derece selsiyus

KISALTMA LİSTESİ

ASA	Amerikan Standartlar Birliği (American Standards Association)
DC Casting	Doğrudan Soğutmalı Döküm (Direct Chill Casting)
EDS	Enerji Dağılım Spektrometresi (Energy Dispersive Spectroscopy)
GP Zone	Guinier-Prestone Bölgeleri
BCC	Hacim Merkezli Kübik (Body Centered Cubic)
MPa	Megapascal
OES	Optik Emisyon Spektrometresi (Optical Emission Spectroscopy)
SEM	Taramalı Elektron Mikroskobu (Scanning Electron Microscope)
TS-EN	Türk Standartları- Avrupa Normu
YMK	Yüzey Merkezli Kübik
Yy	Yüzyıl

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1	Birincil ve ikincil alüminyum üretimi.....	13
Şekil 2.2	Bayer prosesi.....	14
Şekil 2.3	Ergimiş tuz elektrolizi ile alüminyum eldesi.	15
Şekil 2.4	Hall-Heroult prosesi ile saf alüminyum üretimi.	16
Şekil 2.5	Birincil alüminyum üretimi için gerekli hammaddeler.....	16
Şekil 2.6	Alcoa firmasına ait Elysis (inert anotlu ergitme) teknolojisi.	17
Şekil 3.1	Ekstrüzyon presi örneği.	20
Şekil 3.2	Doğrudan ekstrüzyon yöntemi.	20
Şekil 3.3	Ekstrüzyon prosesi sırasında gerekli kuvvet rejimi.	21
Şekil 3.4	Dolaylı ekstrüzyon yöntemi.	21
Şekil 3.5	Doğrudan ani soğutmalı döküm proses akışı.	22
Şekil 3.6	Düşey sürekli döküm ünitesi.....	23
Şekil 3.7	Düşey sürekli döküm yönteminde soğuma bölgeleri.....	23
Şekil 3.8	Ekstrüzyon presi örneği.	25
Şekil 3.9	Yaşlandırma ısıtma işlem adımları.	27
Şekil 3.10	Al-Mg ₂ Si Faz Diyagramı.	27
Şekil 3.11	Yaşlandırma proses adımları.....	28
Şekil 3.12	Eloksal tesisi.	29
Şekil 3.13	Eloksal prosesinde aşamalar.	30
Şekil 3.14	Elektrostatik toz boya tesisi.	30
Şekil 4.1	Cluster oluşumunun sertlik üzerindeki etkisi.....	32
Şekil 4.2	Stabilizasyon ısıtma işleminin uygulandığı aşama	33
Şekil 5.1	Deney numuneleri.....	37
Şekil 5.2	Isıtma işlem denemelerinin fırın içi görüntüsü	38
Şekil 5.3	Deneysel çalışmalara ait akış şeması	39
Şekil 5.4	ISO 6892-1 standardına uygun olarak hazırlanan çekme numuneleri	41
Şekil 5.5	VDA 238-100 standardına uygun olarak hazırlanan bükme numuneleri	41
Şekil 5.6	Çekme ve üç nokta eğme test cihazı	42
Şekil 5.7	Mikrosertlik numuneleri	42
Şekil 6.1	A2 numunesi ve 1-9 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri	47

Şekil 6.2	A4 numunesi ve 10-18 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri	47
Şekil 6.3	A6 numunesi ve 19-27 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri	48
Şekil 6.4	A8 numunesi ve 28-36 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri	48
Şekil 6.5	Üç nokta eğme testi uygulanmış numuneler	49
Şekil 6.6	Üç nokta eğme testi sonrası bükme açısı ölçümü	50
Şekil 6.7	A2 numunesi ve 1-9 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları	52
Şekil 6.8	A4 numunesi ve 10-18 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları	52
Şekil 6.9	A6 numunesi ve 19-27 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları	53
Şekil 6.10	A8 numunesi ve 28-36 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları	53
Şekil 6.11	Stabilizasyon uygulanmamış numunelere ait mikrosertlik değerleri	54
Şekil 6.12	6063 alaşımlı profil mikroyapısı (100x)	55
Şekil 6.13	6063 alaşımlı alüminyum profil mikroyapısı (1000x)	56
Şekil 6.14	6063 alüminyum alaşımı numunesinin EDS analizi (5000x)	56
Şekil 6.15	6063 alaşımlı alüminyum profil EDS haritalama (5000x)	57
Şekil 6.16	(a) Maksimum uzama (b) minimum uzama (c) maksimum akma (d) minimum akma özelliğine sahip numunelerin kırılmış yüzey analizleri	58

TABLO LİSTESİ

Tablo 2.1	Alüminyum ve bazı metallerin özellikleri.	5
Tablo 2.2	Dövme alüminyum alaşım serileri.	7
Tablo 2.3	Döküm alüminyum alaşım serileri.	8
Tablo 2.4	Çeşitli ısıtıl işlem koşullarına sahip alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri.	9
Tablo 2.5	6xxx serisi alaşımlar ve kimyasal bileşim sınırları.	12
Tablo 2.6	6xxx serisinde görülen intermetalik fazlar.	12
Tablo 2.7	Boksit minerallerinin çözünmesi için gereken sıcaklık ve süreler.	14
Tablo 3.1	Bazı alüminyum alaşımları ve homojenizasyon parametreleri.	25
Tablo 3.2	Yaşlandırma ısıtıl işlemiyle oluşan çökelti profili.	29
Tablo 3.3	Sülfürik asit anodizasyon işlemine ait parametreler.	30
Tablo 5.1	Deneyel çalışmalarda kullanılan malzeme ve ekipmanlar	36
Tablo 5.2	Döküm parametreleri	36
Tablo 5.3	Homojenizasyon parametreleri	37
Tablo 5.4	Ekstrüzyon parametreleri	37
Tablo 5.5	Deney Planı 1	38
Tablo 5.6	Deney Planı 2	38
Tablo 5.7	Deney Planı 3	39
Tablo 5.8	Deney numunelerine ait koşullar	39
Tablo 5.9	Diğer deney numunelerine ait koşullar	40
Tablo 6.1	6063 alaşımı OES analizleri (% ağırlık)	44
Tablo 6.2	6063 alaşımının T6 koşullarında mekanik özellikleri	45
Tablo 6.3	Malzemenin zamana bağlı T4 mukavemetleri	45
Tablo 6.4	Deney planı-1'e ait çekme test sonuçları	45
Tablo 6.5	Deney planı-2'ye ait çekme test sonuçları	46
Tablo 6.6	Deney planı-3'e ait çekme test sonuçları	46
Tablo 6.7	Malzemenin zamana bağlı T4 ve T6 bükme değerleri.	50
Tablo 6.8	Deney planı-1'e ait üç nokta eğme testi sonuçları	50
Tablo 6.9	Deney planı-2'ye ait üç nokta eğme testi sonuçları	50
Tablo 6.10	Deney planı-3'e ait üç nokta eğme testi sonuçları.	51
Tablo 6.11	Stabilize edilmiş ve edilmemiş numunelere ait mikrosertlik değerleri ...	55

6063 Alüminyum Alaşımına Uygulanan Stabilizasyon Isıl İşleminin Yaşlanma Mekanizmasına Etkisinin İncelenmesi

Emre ÇANKAYA

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Malzeme Programı

Yüksek Lisans Tezi

Danışman: Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ

Düşük yoğunluk, yüksek özgül mukavemet, kaynaklanabilirlik, şekil verilebilirlik, korozyon dayanımı ve yüksek oranda geri dönüştürülebilirlik gibi özelliklerinden dolayı alüminyum ve alaşımlarına olan talep, gün geçtikçe artmaktadır. Bu talebin, kalite beklentilerini düşük maliyetle karşılanabiliyor olması, üreticiler arasındaki rekabeti de arttırmaktadır. Sunmuş oldukları orta-yüksek mukavemet ve yüksek şekil verilebilirlik özellikleri sebebiyle 6xxx serisi ekstrüzyon alüminyum alaşımları, günümüzde yaygın olarak tercih edilmektedir. Ekstrüzyon ürünleri; profil, çubuk, boru gibi farklı geometrilerde inşaat, raylı sistemler, otomotiv, havacılık ve savunma sanayii başta olmak üzere birçok sektörde tercih edilmektedir.

6xxx serisi alüminyum alaşım grubunda, yapay yaşlandırma ısııl işlemi malzemenin mukavemetini arttırmak amacıyla sıklıkla başvurulmuş yöntemlerden biridir. Ancak, 6xxx serisi yaşlandırılabilir alüminyum alaşımlarında doğal yaşlanma süresinin uzamasına bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerinde kayıplar yaşanmaktadır. Özellikle uzun doğal yaşlanma süresi sonunda gerçekleştirilen yapay yaşlandırma sonrası, istenen mukavemet değerleri elde edilememektedir.

Mekanik özelliklerdeki düşüşün engellenebilmesi için alternatif çözüm önerileri olsa da, malzemenin fiziksel ve kimyasal özellikleri değiştirilmeden sorunun giderilmesi, gerek maliyet gerekse malzemeden beklenen korozyon dayanımı gibi diğer beklentilerin karşılanması açısından önem taşımaktadır. Bu sebeple çalışma kapsamında, malzemenin ısıtma işlemi sırasında değişiklik yapılarak mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Tez çalışması kapsamında; 6063 alaşımında yaşanan mukavemet düşüşünü engelleyebilmek amacıyla yapay yaşlandırma ısıtma işlemi öncesinde çeşitli “stabilizasyon” ısıtma işlemleri uygulanmak suretiyle malzemenin yaşlanma mekanizmasının iyileştirilmesi hedeflenmiştir. Literatür araştırmaları ile şekillenen ısıtma işlemi reçetelerinin, üretimden hemen sonra malzemeye uygulanmasının ardından numuneler değişen sürelerde bekletilmiştir. Bekletme süreleri sonunda yapay yaşlandırılan numunelerin malzeme özellikleri mekanik ve mikroyapısal açıdan incelenmiştir.

İnceleme sonuçları; farklı ısıtma işlem sıcaklığı ve süresinin mekanik özelliklerde de farklılık oluşturduğunu göstermiştir. 6063 alaşımı için en yüksek akma ve çekme mukavemeti değerleri, 120°C ile 140°C arasındaki stabilizasyon sıcaklıklarında ve 1,5 saat stabilizasyon süresinde elde edilmiştir. Stabilizasyon ısıtma işlemi uygulanmış ve sekiz hafta boyunca bekletilmiş tüm numunelerin, stabilize edilmemiş numunelere göre mekanik özelliklerinde iyileşme olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: 6063 ekstrüzyon alaşımı, stabilizasyon, ısıtma işlemi, doğal yaşlanma süresi, mekanik özellikler.

Investigation of the Effect of Stabilization Heat Treatment on the Aging Mechanism of the 6063 Aluminium Alloy

Emre ÇANKAYA

Department of Metallurgical and Material Engineering

Master of Science Thesis

Supervisor: Prof. Dr. Afife Binnaz HAZAR YORUÇ

The demand for aluminum and its alloys is increasing day by day due to properties such as low density, high specific strength, weldability, formability, corrosion resistance, and high recyclability. The ability to meet quality expectations at a low cost increases competition among manufacturers. The 6xxx series extrusion aluminum alloys are widely preferred today due to their medium-high strength and high formability properties. Extrusion products, including profiles, bars, and pipes, find applications in various industries such as construction, rail systems, automotive, aerospace, and defense.

In the 6xxx series aluminum alloys group, artificial aging heat treatment is commonly used method to increase the material's strength. However, in aging aluminum alloys of the 6xxx series, there are losses in mechanical properties due to the extended natural aging period. Especially after prolonged natural aging, the desired strength values not achieved through artificial aging.

While there are alternative solutions proposed to prevent the decrease in mechanical properties, resolving the issue without altering the material's physical and chemical properties is critical in terms of satisfy expectations such as cost and corrosion resistance.

Therefore, in this study, changes in the material's heat treatment route made to improve mechanical properties. Within the scope of the thesis, various "stabilization" heat treatments applied before the artificial aging heat treatment to enhance the aging mechanism of the material, specifically aiming to prevent the strength reduction observed in the 6063 alloy. Thermal treatment recipes shaped by literature research applied to samples immediately after production and kept for varying periods. After the waiting times, the material properties of the artificially aged samples examined from both mechanical and microstructural perspectives.

The investigation results revealed that different heat treatment temperatures and durations have an impact on mechanical properties. The highest yield and tensile strength values for the 6063 alloy achieved at stabilization temperatures between 120°C and 140°C and stabilization duration of 1.5 hours. It observed at that all samples subjected to stabilization heat treatment and kept for eight weeks samples showed improvement in mechanical properties as compared to unstabilized samples.

Keywords: 6063 extrusion alloy, stabilization, heat treatment, natural aging time, mechanical properties.

1.1 Literatür Özeti

Yapay yaşlandırılabilir olması ile tanınan 6xxx serisi ekstrüzyon ürünü alüminyum alaşımlarında doğal yaşlanma süresindeki artışa bağlı olarak mukavemet kayıpları yaşanmaktadır. Bu da özellikle endüstriyel üretim yapan tesislerin ihraç ettiği ve sevkiyat süresi uzun olan ürünlerde doğal yaşlanmanın oluşturduğu negatif etki sebebiyle, müşteri tarafından uygulanacak olan nihai yapay yaşlandırma ısı işlemi sonrası malzemenin mekanik özelliklerine olumsuz etkide bulunmaktadır.

Yaşanan bu mukavemet kaybını minimuma indirmek için özellikle otomotiv sektörünün de talep ettiği ve önerdiği yapay yaşlandırma öncesi stabilizasyon ısı işlemleri uygulanmaktadır. Uygulanan söz konusu ısı işlem literatürde “ön ısı işlem, kademeli yaşlandırma (step-aging) veya stabilizasyon ısı işlemi” şeklinde de adlandırılabilmektedir. Literatür araştırmaları özellikle 5xxx, 6xxx ve 7xxx serisi alüminyum alaşımlarında, uygulanan bu ısı işlemle mukavemet ve sertlik gibi mekanik özellikleri iyileştirirken, T6 ısı işlem sürelerini de kısaltarak enerji tüketiminin de iyileşmesine katkıda bulunmaktadır [1,2].

6063 alüminyum alaşımı, 6xxx serisine ait bir alaşım olması sebebiyle yaşlandırma ısı işlemi ile mukavemet kazandırılabilen bir alüminyum alaşımıdır. Malzemenin nihai mukavemetini kazanmasında, yaşlandırma sıcaklığı öncesinde uygulanan ön ısı işlem sıcaklığı ve süresinin mikro yapıya önemli derecede etkisi bulunmaktadır.

Oda sıcaklığında malzemenin yaşlanması (doğal yaşlanma) sırasında malzeme üzerinde oluşan negatif etkilerin temel sebebi, uzun doğal yaşlanma süreleri sonrasında oluşan GP Zone’ların kristalin yapısı bilinmeyen küresel kümelenmeler (cluster) oluşturmalarıdır. Oluşan bu clusterlar nihai T6 (solüsyona alınmış ve yapay yaşlandırılmış) ısı işlemi uygulandığı durumda Mg_2Si fazının çökeltme rotasına etkide bulunarak yaşlanma mekanizmasını değiştirmektedir. Bu durumda oluşan çökeltiler dislokasyon hareketini daha az engelleyerek malzemenin mukavemetinin düşmesine sebep olmaktadır [3].

6xxx serisinde yaşlandırma ısı işlem rotası boyunca Mg_2Si ’nin uğramış olduğu faz dönüşümleri aşağıda verilmiştir:

Aşırı doymuş katı çözelti (α) $\rightarrow$ clusters $\rightarrow$ GP bölgeleri $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$ (Mg_2Si)

Literatür araştırmalarında stabilizasyon sıcaklığının ve süresinin yaşlanma mekanizmasına doğrudan etkide bulunduğu tespit edilmiştir. Söz konusu ısıtıl işlem ile matriste β' arafazı oluşmaktadır. Bu sayede malzemenin mukavemetinde iyileşme sağlanabileceği belirtilmektedir [3].

Her ne kadar doğal yaşlanma sırasında yoğun olarak oluşan GP zonlar malzemenin çekme mukavemetini arttırsa da, β' ara fazı mukavemeti daha yüksek oranda arttırmaktadır. Ayrıca, aşırı miktarda GP zonlarının oluşması malzemenin akma ve çekme mukavemetini düşürmektedir [3].

Optimum sıcaklık ve sürede uygulanan ön ısıtıl işlem ile doğal yaşlanmanın negatif etkileri giderilerek malzemenin T6 mukavemeti arttırılmaktadır. Bunun temel sebebi, uygulanan işlem sonrasında çok sayıda nano cluster ve β' ara fazı oluşması ve bunların yapay yaşlandırma sırasında β fazındaki Mg_2Si fazını oluşturmada itici güç sağlıyor olmasıdır [4].

1.2 Tezin Amacı

Tez çalışması kapsamında doğal yaşlanabilir olan 6063 alüminyum alaşımında T4 süresinin artışına bağlı olarak oluşan ve malzemenin T6 mukavemeti üzerindeki olumsuz etkinin, stabilizasyon ısıtıl işlemi ile giderilmesi ve akma mukavemeti, çekme mukavemeti, % uzama ve sertlik gibi mekanik özelliklerin iyileştirilmesi amaçlanmıştır.

Bu çalışmada; literatür araştırmalarından da esinlenilerek belirlenen stabilizasyon sıcaklıkları ve sürelerinin 6063 alaşımlı alüminyum profillere uygulanması ve fiziksel, mekanik özelliklerinin tespit edilmesinin ardından mikroyapı incelemeleri ile desteklenmesinin ardından optimum mekanik özelliklerin elde edildiği parametrelerin belirlenmesini hedeflemektedir.

Tez çalışması kapsamında aşağıdaki hedeflere ulaşılması amaçlanmıştır:

- Söz konusu ısıtıl işlemin endüstriyel fırınlarda darboğaz oluşturmayacak şekilde kısa sürelerde uygulanabiliyor olması.
- Uzun doğal yaşlanma sürelerinde oluşan mukavemet kaybının giderilmesi sayesinde hem üretici hem de müşteriye sevkiyat ve depolamada esneklik kazandırılması.

- Mukavemette yaşanan kayıpların yeni alaşımlar veya alaşım elementi ilavesi yerine ısıtıl işlem ile giderilmesi sayesinde hammadde ve operasyon maliyetinin düşürülmesi.
- Yapay yaşlandırma süresinin kısılması ve malzeme özelliklerinin iyileştirilmesiyle toplam enerji maliyetinin düşürülmesi.

1.3 Hipotez

Tez çalışmasının hipotezi TS EN 755-2 ve TS EN 573-3 standartlarına uygun olarak üretilen 6063 alüminyum alaşımlarında, uzun doğal yaşlanma (T4) sürelerinde oluşan mukavemet kayıplarının önlenmesini sağlayacak ve malzemenin yapay yaşlandırılmış (T6) kondisyondaki mekanik özelliklerinin iyileştirilmesinin stabilizasyon ısıtıl işlemi ile elde edilebilirliğine cevap aramaktır. Uygulanacak olan stabilizasyon ısıtıl işlem sıcaklıkları ve süreleri ile söz konusu standartlara uygun mekanik özelliklerin sağlanması öngörülmektedir.

2 ALÜMİNYUMUN ÖZELLİKLERİ, TARİHİ VE ÜRETİMİ

Alüminyum 19.yy'da keşfedilen genç bir metal olup günümüzde hala üzerinde birçok çalışmalar yürütülen yenilikçi ve son teknoloji uygulama alanlarına da hitap eden önemli bir metaldir. Sunmuş olduğu üstün özellikler sayesinde otomotiv, savunma sanayii, havacılık, inşaat, raylı sistemler, tıp, gıda ve diğer birçok sektörde kullanım alanına sahiptir.

Alaşım elementi ilavesi, plastik deformasyonla sertleştirme ve ısıtıl işlem uygulamaları sonucunda alüminyumun saf haline göre üstün özelliklere sahip olmasını sağlamaktadır. Alüminyumun sunmuş olduğu bu üstün özelliklerin başlıcaları; düşük özgül ağırlık, korozyon dayanımı, elektrik ve ısı iletkenliği, yüksek spesifik mukavemet, kolay şekil verilebilirlik ve bazı alaşım serilerine uygulanabilen yaşlandırma ısıtıl işlemine uygun olması şeklinde özetlenebilir.

2.1 Alüminyumun Özellikleri

Alüminyum 3A grubunda bulunan atom numarası 13 olan bir metaldir. Atom çapı 1,43 Å, iyon çapı 0,86 Å ve atom ağırlığı 26,97 g/mol şeklindedir. Alüminyumun yoğunluğu (2,7 g/cm³) olup, çelik (7,83g/cm³) ve bakıra göre (8,93g/cm³) neredeyse 1/3'ü değerindedir. Yüzey merkezli kübik kristal yapısı sayesinde kolay şekillendirilir. Alüminyum hafiflik avantajının yanında oluşturduğu doğal oksit tabakası sayesinde korozyona karşı da iyi dayanım kazanmaktadır [5,6].

Alüminyum, silisyum ve oksijenden sonra doğada en çok bulunan elementtir. Yer kabuğunun %8'ini oluşturmaktadır. Doğada bol miktarda bulunmasına rağmen 19. Yüzyılda elde edilmesinin temel sebebi, birçok metal gibi doğada kararlı formu olan alüminyum oksit şeklinde bulunmasıdır. Alüminyumun oksitin indirgenmesi ve alüminyumun birincil üretiminin yüksek enerji gerektirmesi nedeni ve teknolojik yetersizlikler nedeniyle metal olarak üretilmesi 19. Yüzyılın ilk yarısında gerçekleştirilebilmiştir [7].

Tablo 2.1'de alüminyum ve bazı diğer metallerin özellikleri özetlenmiştir.

Tablo 2.1 Alüminyum ve bazı metallerin özellikleri [5]

Özellik	Al	Cu	Fe	Zn	Mg
Özgöl Ağırlık (g/cm ³)	2,70	8,94	7,87	4,1	1,74
Elektrik Direnci (Ohm.mm ² /2).10 ²	2,66	1,68	9,8	6,0	4,46
Isı İletkenliği (cal/cm ² /cm°C)	0,52	0,92	0,19	0,27	0,37
Isıl Genleşme Katsayısı (mm/mm°C).10 ⁻⁶	24	16,7	11,9	33	25,7
Ergime Sıcaklığı (°C)	660	1083	1535	420	651
Yanma Isısı (kcal/kg)	6970	-	1600	1270	6000
Uzama (%)	43	50	48	-	-
Sertlik (Brinell)	19	25	70	-	-

2.2 Alüminyumun Tarihsel Gelişimi

Alüminyum cevheri yerkürede yaygın olarak bulunmasına rağmen, eldesinin zorluğu ve enerji yoğun bir proses olduğu için keşfi diğer metallere kıyasla çok geç olmuştur.

1807 yılında Sir Hampry Davy elektroliz yöntemi ile alüminyum elde etmeye çalışmıştır, ancak başarılı olamamıştır. 1825 yılında Danimarkalı Hans Christian Ørsted, alüminyum klorürü potasyum amalgamları ile ısıtarak metalik alüminyum toz formunda elde etmiştir. Ancak potasyumun maliyetinin yüksek olmasından dolayı endüstriyel üretime uygun olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu yüzden Henri Sainte –Claire Deville potasyumdan daha düşük maliyetli sodyum ile alüminyum üretmiş ve endüstriyel alüminyum üretiminin temellerini atmıştır. Büyük ölçekli endüstriyel üretim, Amerika Birleşik Devletleri'nde Charles Martin Hall ve Fransa'da Paul Héroult tarafından 1886 yılında geliştirilen Hall-Héroult süreci ile mümkün hale gelmiştir. Norveçli kimyager Carl Wilhelm Söderberg, 1918 yılında Hall-Héroult sürecini geliştirilmiştir ve bu, Dünya genelinde alüminyum üretimini büyük ölçüde artırmış ve alüminyum fiyatlarını düşürmüştür. 1887 yılında da Karl Josef Bayer alümina üretim yöntemi olan Bayer prosesini bulmuştur.

Saf alüminyumun mekanik özelliklerinin düşük olmasından dolayı mekanik özellikleri geliştirici yöntemlerden biri olan çökeltme sertleştirilmesi 1907'de Alfred Wilm tarafından keşfetmiştir. Böylelikle alüminyumun kullanım alanı artmıştır. İlk

ticari Al-Mg-Si alaşımı 1921 yılında geliştirilmiştir. 1935 yılında, ısıt ışlem uygulanabilen ticari alüminyum alaşım 6061 tanıtılmıştır [8-11].

2.3 Alüminyum Alaşımları

Alüminyumun saf halde kullanımı düşük mukavemet ve mekanik özelliklerinden dolayı sınırlıdır, sadece özel uygulamalarda kullanılabilmektedir. Mekanik özelliklerini iyileştirmek için alüminyum; silisyum, çinko, magnezyum, mangan, krom, bakır, demir ve lityum gibi alaşım elementleri ilave edilerek alaşımlandırılır. Alüminyumun yüzey merkezli kübik (YMK) yapısına giren bu alaşım elementleri katı eriyik oluşturarak malzemenin sertlik ve mukavemetini iyileştirirken, elektrik iletkenliği ve korozyon dayanımını ise olumsuz etkilemektedir. Üstün özellik kazandırılan bu alaşımlar havacılık, otomotiv, raylı sistemler ve uzay araçlarında kullanım alanı bulmaktadır. Ayrıca alüminyum alaşımlarına uygulanan eloksall yüzey işlemi ile koroziyon ortamlardaki dayanımı arttırılmaktadır [12,13].

Alüminyum alaşımları üretim yöntemlerine göre iki ana alt gruba ayrılmaktadır. Bunlar: plastik deformasyon aracılığıyla şekillendirilen “dövme alaşımlar” ve “döküm alaşımlar” şeklinde-dir. Her iki grup içerisinde ısıt ışlem uygulanabilen ve uygulanamayan alaşım serileri bulunmaktadır. Alüminyum alaşımları için “Amerikan Standartlar Birliği” (ASA) Dünya’da en yaygın kullanılan standarttır [6].

2.3.1 Dövme Alüminyum Alaşımları

Dövme alüminyum alaşımları, magnezyum, silisyum, çinko, bakır gibi alaşım elementlerinin alüminyuma ilave edilmesi ile elde edilirler. Kütük (ingot) şeklinde dökülen malzeme genellikle ekstrüzyon, haddeleme gibi plastik şekil verme yöntemleriyle şekillendirilerek yassı mamül veya ekstrüzyon profilleri şekline dönüştürülürler. Dövme alüminyum alaşımlarının simgeleme dizisi Amerikan Standartlar Birliği (ASA) tarafından 1957 yılında standart hale getirilmiştir. Bu simgeleme metodu dört rakamdan oluşmaktadır (xxxx) ve ilk rakam ana alaşım elementini temsil etmektedir. 1xxx serisi %99 ve üzeri saflıkta alüminyumu simgeler ve son iki basamak ise alaşımın virgülden sonraki saflığını belirtir (örneğin 1050 alaşımı; %99,50 saflıkta alüminyum). 2xxx ve 8xxx arasındaki serilerde ise ilk basamak ana alaşım elementini, ikinci basamak ise özel olarak denetlenen

alaşım elementlerini belirtir ve 1-9 arasında değişebilir. 9xxx serisi ise yeni keşfedilen alaşımların kaydedildiği seridir [13].

Tablo 2.2’de dövme alüminyum alaşım serilerinin gösterimi ve içermiş olduğu alaşım elementleri verilmiştir.

Tablo 2.2 Dövme alüminyum alaşım serileri [6]

Alaşım Serisi	Temel Alaşım Elementi
1xxx	En az %99 Al
2xxx	Cu
3xxx	Mn
4xxx	Si
5xxx	Mg
6xxx	Mg/Si
7xxx	Zn
8xxx	Diğer elementler
9xxx	Kullanılmayan dizi

Dövme alüminyum alaşımları genellikle yaşlanabilir ve yaşlanamayan alaşım serileri olarak ikiye ayrılırlar:

1. Yaşlanabilir alaşım serileri: 2xxx, 6xxx, 7xxx
2. Yaşlandırılmayan alaşım serileri: 1xxx, 3xxx, 4xxx, 5xxx

2.3.2 Döküm Alüminyum Alaşımları

Döküm alaşımlarının birçoğu içerdiği yüksek silisyumdan dolayı ötektik bileşime ve düşük ergime sıcaklığına sahip olan alaşımlar olup, iyi akışkanlık ve dövme alaşımlara kıyasla iyi dökülebilirliğe sahiptirler. Akışkanlık, katılaşma olmadan metalin kalıba akması olarak tanımlanırken, dökülebilirlik ise alaşımdan yapılacak dökümün iyi olmasını belirtmektedir. Bu alaşımlar genellikle kum, kokil kalıba döküm veya basınçlı döküm ile üretilirler [13,14].

Isıl işlem uygulanabilir alaşımlara ilave edilen %0,3-1,0 oranındaki magnezyum ile Mg_2Si fazı oluşturulması sağlanarak ısıl işlem uygulanabilir hale gelmektedir. Ayrıca yüksek sıcaklık dayanımı sağlamak amacıyla bazı alaşımlara %1-4 oranında bakır ilave edilir ve yaşlandırılabilirlik sağlanır. Benzer şekilde çinko ilavesi de $MgZn_2$ çökeltisi oluşturarak malzemenin yaşlanarak mukavemet kazanmasına katkı sağlamaktadır. Ayrıca tane inceltici olarak bu alaşımlara titanyum ve bor ilave edilmektedir [13].

Döküm alaşımlarının simgeleme dizisi de dövme alaşımlara benzer olmak kaydıyla üçüncü basamaktan sonra (xxx.x) bir nokta ile ayrılmaktadır. Tüm alaşım serileri ve içermiş oldukları alaşım elementleri Tablo 2.3'te verilmiştir [14].

Tablo 2.3 Döküm alüminyum alaşım serileri [15]

Alaşım serisi	Alaşım Elementi
1xx.x	En az %99 Al
2xx.x	Cu
3xx.x	Si-Cu ve/veya Mg
4xx.x	Si
5xx.x	Mg
6xx.x	Kullanılmayan seri
7xx.x	Zn
8xx.x	Sn
9xx.x	Diğer

1xx.x için ikinci ve üçüncü rakamlar saflık derecesini belirtir. Son hane sıfır ise döküm parça, 1 ise ingot, rakamların önünde 1x olduğu durumda ise deneme aşamasındaki alaşımı belirtir [15].

2xx.x-9xx.x arası serilerde ilk basamak ana alaşım elementini, ikinci ve üçüncü basamaktaki rakamlar ise o seri içerisindeki sırasını gösterir. Son basamak sıfır ise döküm parça, 1 ise ingot, 2 ise 0.'ın bir değişimidir. Örneğin, 234,1.'de ilk basamak 2 bakır simgeleri, 34 ise o alaşım serisi içerisindeki sırayı, 1 ise onun ingot olduğunu belirtir [13,15].

İçermiş olduğu alaşım elementlerinden dolayı yaşlandırılabilir özelliğe sahip alaşım serileri: 2xx.x (Cu), 3xx.x (Si+Cu/Mg), 7xx.x (Zn) şeklindedir.

Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıtım işlem sembolleri ve açıklamaları aşağıda verilmiştir [12].

- F - Üretildiği gibi
- O - Tavlanmış ve yeniden kristalleştirme tavı uygulanmış (en düşük dayanım ve en yüksek süneklik)
- H - Deformasyon sertleştirilmesi uygulanmış
- H1 - Sadece deformasyon sertleşmesi uygulanmış
- H2 - Deformasyon sertleşmesi uygulanmış ve kısmi tavlanmış
- H3 - Deformasyon sertleşmesi uygulanmış ve aşırı yaşlandırılmış
- T - Isıtım işlem görmüş

- T1 - Yüksek sıcaklıktaki şekillendirme işleminden sonra soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış
- T2 - Tavlanmış (döküm alaşımları için)
- T3 - Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve doğal yaşlandırılmış
- T4 - Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış
- T5 - Yüksek sıcaklıkta deformasyon sonrası soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış
- T6 - Solüsyona alınmış ve yapay yaşlandırılmış
- T66 - Solüsyona alınmış ve maksimum mukavemet elde edilecek şekilde yapay yaşlandırılmış
- T7 - Solüsyona alınmış ve aşırı yaşlandırılmış
- T73 - Çözeltiye alınmış ve özel olarak yapay yaşlandırılmış
- T8 - Çözeltiye alınmış, soğuk işlenmiş ve yapay yaşlandırılmış
- T9 - Çözeltiye alınmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk işlenmiş

Tablo 2.4'te çeşitli kondisyonlardaki alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 2.4 Çeşitli ısıtılma işlem kondisyonlarına sahip alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri [16]

Alaşım	Isıl İşlem Kodu	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
2014	T6	410	480	13
2024	T8	450	480	6
1100	O	35	90	35
5083	O	115	260	22
6061	T6	275	310	12
6063	T6	215	240	12
7075	T73	430	500	13
201	T6	345	415	5
213	T533	185	220	0,5
355	T6	235	280	1
357	T6	221	283	3
360	T6	365	310	1

2.4 Alüminyuma Alaşım Elementinin Etkileri

Alüminyumun saf halde ticari olarak kullanımının sınırlı olması ve mukavemetinin düşük olması nedeniyle alaşım elementi ilave edilmek suretiyle mekanik özellikleri iyileştirilmektedir. Alüminyum alaşımlarında mekanik özellikler alaşım

elementinin yanında mikroyapı, ısıtıl işlem ve deformasyon durumu ile doğrudan ilgilidir. Alüminyumda kullanılan alaşımlar elementlerinden başlıcaları Si, Cu, Mg, Mn, Cr, Fe, Zn, Ti olarak sıralanabilir.

Silisyum: Özellikle döküm alaşımlarında akışkanlığı sağlamak ve ergime sıcaklığını düşürmek için ilave edilir. Yüksek akışkanlık sayesinde dökülme kabiliyetini iyileştirir. %11,7 silisyum içeren Al-Si alaşımı 577°C'de ötektik nokta oluşturmaktadır. Ötektik üstü alaşımların işlenmesi zor olması sebebiyle, aşınma direnci istenen parçalarda kullanımı yaygındır. Silisyum, alüminyum içerisinde düşük çözünürlüğe sahip bir metal olması sebebiyle yapıda çökelmekte ve malzemenin sertliğini arttırmaktadır. Silisyum oranından ziyade yapıda ne şekilde bulunduğu mekanik özellikleri belirleyici unsur olmaktadır [17-19].

Bakır: Alaşım elementi olarak bakır, alüminyum alaşımların akma ve çekme dayanımı ile sertlik gibi mekanik özelliklerini iyileştirirken, korozyon direncini ve iletkenliğini düşürmektedir. Havacılık, askeri araçlar gibi alanlarda sıklıkla bu alaşım grubu kullanılmaktadır. Bakırlı alaşımların geneli aynı zamanda çökeltme sertleşmesi ile mukavemet kazandırılabilen alaşımlardandır. Dövülebilir alaşımlarda plastik şekil verme kabiliyetini düşürdüğünden dolayı %5'ten fazla bulunması tercih edilmemektedir [17-20].

Magnezyum: Magnezyum alaşım elementi olarak özellikle ekstrüde edilebilirliği yüksek ve popüler alaşım serisi olan 6xxx serisinde kullanılmakta olup, silisyum ile oluşturmuş olduğu Mg₂Si bileşiği sayesinde malzemenin çökeltme sertleşmesi ile mukavemet kazandırılmasına olanak tanır.

Magnezyumlu alaşımlar korozyon dayanımlarının iyi olması ile öne çıkmaktadır. Dövülebilir alaşımlarda Mg ilavesi şekillendirme kabiliyetini arttırmaktadır. Ayrıca, magnezyum alaşım elementinin malzemenin kaynak kabiliyetine olumsuz etkisi bulunmamaktadır. Silisyumlu alaşımlarda demir elementinin sebep olduğu kaba taneli yapının oluşmasını önleyici etkiye sahiptir [19,22].

Mangan: Alaşım elementi olarak mangan ilavesi yeniden kristalleşme sıcaklığını artırarak tane büyümesini engeller. Yapıda demirle beraber intermetalik fazları oluşturabilmektedir. Düzensiz ve iri çökeltilerin oluşmasını engelleyerek AlMnFe intermetalliği oluşturmaktadır. Fakat bu durum malzemenin gevrekliğini artırıcı etkide bulunabilmektedir [20,22].

Krom: 6xxx serisi alaşımlarda mangan gibi tane inceltici etkide bulunarak malzemenin çarpışma performansı ve darbe sönümleme özelliklerini iyileştirmektedir.

Demir: Basınçlı döküm gibi özel yöntemler haricinde demir aslında alaşım elementi olarak ilave edilmeyip, hurda kaynaklı yapıya katılan bir element olarak karşımıza çıkmaktadır. Mangan, silisyum gibi elementlerle beraber alüminyum içerisinde AlMnFeSi, AlFeSi gibi intermetalik fazlar oluşturarak malzemenin çekme ve akma mukavemetini arttırmakta, fakat sünekliliğini ve şekil verme kabiliyetini azaltmaktadır. Döküm sırasında sıcak çatlamayı önleyici etkiye sahiptir [22].

Çinko: Yüksek mukavemet sağlamak amaçlı özellikle yaşlandırılabilir alaşım serisi olan 7xxx serisinin ana alaşım elementidir. Fakat dökülebilirlik, şekil verme ve eloksallanabilirliğine olumsuz etkide bulunmaktadır. Döküm sırasında çekilme ve çatlak riski bulunmaktadır. Havacılık uygulamalarında yüksek mukavemet ve mekanik özellikleri nedeniyle sıklıkla tercih edilmektedir. Ekstrüde edilebilirliği düşürmesi sebebiyle ekstrüzyon yöntemi ile üretilmeleri oldukça uzun sürmekte ve yüksek basınçlar uygulanması gerekmektedir [19,21,22].

Titanyum: Genellikle sıvı metal içerisine AlTiB gibi bileşikler halinde tel şeklinde beslenmektedir. Temel amacı tane boyutlarının inceltilmesidir.

2.5 6xxx Serisi Alüminyum Alaşımları

Ekstrüzyon yöntemiyle şekillendirilen en popüler alüminyum alaşım serisidir. Ana alaşım elementi magnezyum ve silisyum olup, oluşturmuş olduğu Mg_2Si çökeltileri sayesinde yaşlandırılabilir özelliğe sahiptir. Bu alaşımlar iyi düzeyde korozyon dayanımı, eloksallanabilir özellikleri, orta-yüksek mukavemetli olmaları, kaynak kabiliyetleri ve plastik şekil vermeye uygun olmaları sebebiyle endüstride sıklıkla tercih edilmektedir.

Orta düzeyde mukavemete sahip ve dekoratif, mimari sektöründe yaygın olarak 6060 ve 6063 serileri kullanılmaktadır. Bu alaşımlar kaynak kabiliyetinin yanı sıra eloksallanabilir özelliklerinin iyi olması ile öne çıkmaktadır.

Yüksek mukavemet, çarpışma performansı ve korozyon dayanımları ile tanınan popüler alaşımlar ise 6005, 6082, 6061, 6056 şeklinde sıralanabilir. Bu tarz

alaşımlar raylı sistemler, otomotiv endüstrisi ve savunma sanayii gibi yüksek mekanik özellik beklentisi olan sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 2.5'te yaygın olarak kullanılan 6xxx serisi alüminyum alaşımlarından bazıları gösterilmektedir.

Tablo 2.5 6xxx serisi alaşımlar ve kimyasal bileşim sınırları [23]

Alaşım	Mg	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Cr
6060	0,35-0,6	0,30-0,6	0,10-0,30	0,10	0,10	0,15	0,05
6063	0,45-0,9	0,20-0,6	0,35	0,10	0,10	0,10	0,10
6005	0,40-0,6	0,6-0,9	0,35	0,10	0,10	0,10	0,10
6061	0,8-1,2	0,40-0,8	0,7	0,15-0,40	0,15	0,25	0,04-0,35
6082	0,6-1,2	0,7-1,3	0,50	0,10	0,40-1,0	0,20	0,25
6056	0,6-1,2	0,7-1,3	0,50	0,50-1,1	0,40-1,0	0,10-0,7	0,25

Alüminyumun dökümü sırasında elementlerin alüminyum içerisinde çözünürlükleri sıcaklığa bağlı olarak değiştiğinden dolayı katılaşma esnasında intermetalik fazlar oluşmaktadır. Yapıda yeterli miktarda demir ve silisyum var ise alüminyum dökümünde iğnesel yapıda β -AlFeSi intermetalik fazları oluşmaktadır. Fakat iğnesel yapıya sahip olan bu intermetalik fazlar ekstrüzyon prosesini zorlaştırdığı ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediği için, homojenizasyon işlemi yapılarak küresel formdaki α -AlFeSi intermetalik fazlarına dönüştürülmektedir. Tablo 2.6'da 6xxx serisinde yaygın olarak görülen fazlar verilmiştir [24].

Tablo 2.6 6xxx serisinde görülen intermetalik fazlar [24]

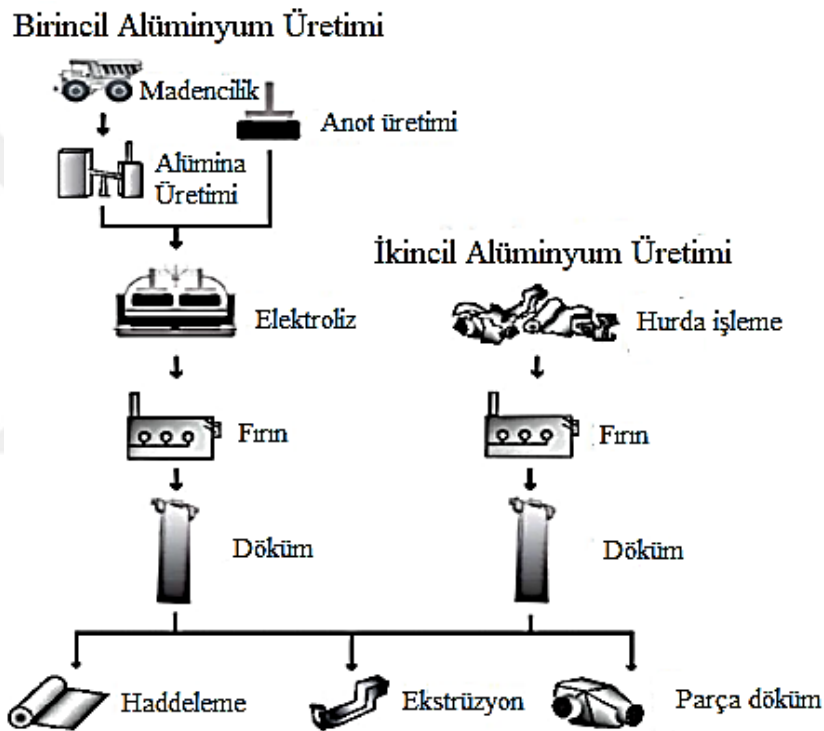
Faz	Bravais Kafesleri	Kafes Parametreleri
β	Monoklinik	a=6,12 Å
		b=6,12 Å
		c=41,5 Å
		$\beta=91^\circ$
α_c (α_1)	Kübik; BCC veya basit kübik	a=12,56 Å
		a=12,52 Å
α' (α_2)	Hekzagonal	a=b=12,3 Å
		c=26,2 Å

2.6 Birincil Alüminyum Üretimi

Alüminyum tıpkı diğer metaller gibi doğada oksitli cevherler şeklinde bulunmaktadır. Metalik olarak üretilmesi için çeşitli proseslerden geçmesi gerekmektedir. Alüminyumun üretimi iki şekilde mümkün olabilmektedir. Bunlardan birincisi primer yani cevherden üretim, diğer yöntem ise hurdaların ergitilmesi suretiyle gerçekleştirilen ikincil üretimdir. Enerji açısından

kıyaslandığında ikincil üretim, birincil üretime göre neredeyse %5 oranında enerji tüketilmesi ve çevreye olan emisyon değerlerinin daha düşük olması nedeniyle Dünya’da yoğun olarak tercih edilen ve ilerleyen yıllarda da büyüme potansiyeli yüksek olan bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır.

Alüminyumun birincil üretimi, boksit cevherinin çıkarılmasının ardından sırasıyla alüminaya dönüşmesi prosesini içeren Bayer prosesi ve elektroliz işlemiyle alüminadan primer alüminyuma dönüşme sürecini kapsayan Hall-Heroult Prosesi şeklinde iki basamakta yürümektedir. Alüminyumun birincil ve ikincil üretimi Şekil 2.1’de özetlenmiştir.



Şekil 2.1 Birincil ve ikincil alüminyum üretimi [25]

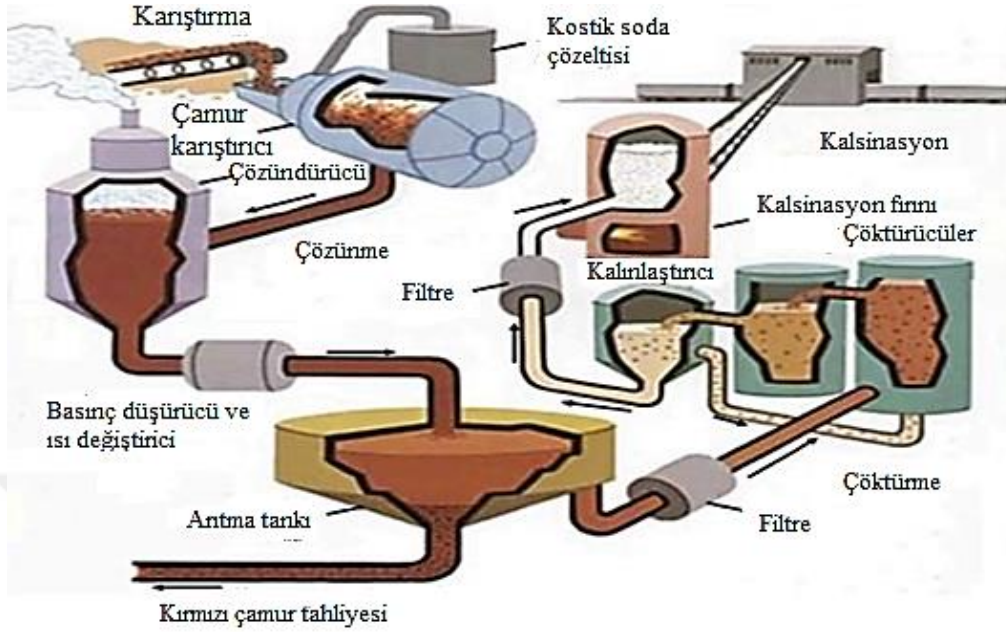
2.6.1 Bayer Prosesi

Bayer prosesi 1888 yılında Avusturyalı Karl Josef Bayer tarafından keşfedilmiştir. Prosesin amacı; boksitten kostik (NaOH) çözeltisi kullanılarak alümina olarak bilinen Al_2O_3 elde edilmesidir. Proses dört aşamada gerçekleşmekte olup, tüm aşamalar aşağıda sunulmuştur:

1. Çözünme
2. Arıtma
3. Çöktürme

4. Kalsinasyon

Prosesin işlem adımları Şekil 2.2’de özetlenmektedir [26].



Şekil 2.2 Bayer prosesi [26]

Çözünme adımımda cevherlerin kırma öğütme işlemlerinden sonra öğütülen boksit ile kostik karıştırılarak çamur elde edilir. Bu çamur çözündürücüye aktarılarak, mineral forma uygun basınç ve sıcaklıkta silikanın çözünmesi ve sodyum alüminat (NaAlO_2) elde edilir. Mineral formlarına göre basınç ve sıcaklık değerleri Tablo 2.7’de verilmiştir [26,27].

Tablo 2.7 Boksit minerallerinin çözünmesi için gereken sıcaklık ve süreler [26]

Boksit Minerali	Sıcaklık (°C)	Basınç (atm)
Gibsit	135-150	1
Diyaspor	205-245	1
Böhmit	>250	35

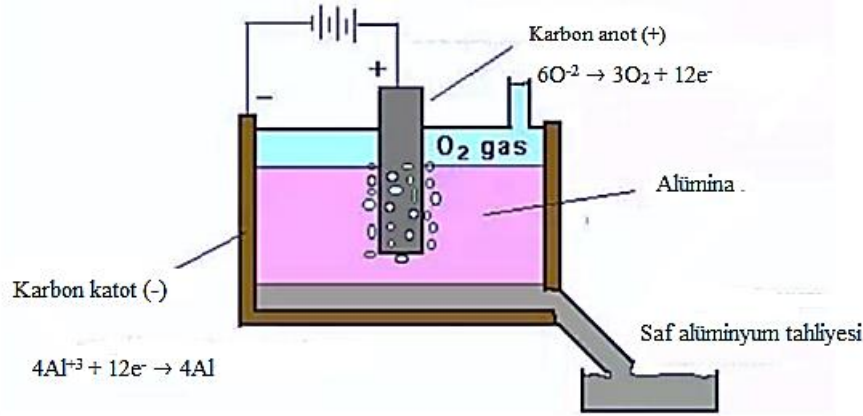
Arıtma adımımda ise çamur arıtma tankına gönderilir ve NaOH ’dan etkilenmediği için çözünemeyen demir oksit, kalsiyum oksit ve titanyum oksit kırmızı çamur şeklinde kalıntı oluşturmak suretiyle dibe çöker ve arıtma tankına gönderilir, ardından tahliye edilir. Çözünen silika ise ısıtılarak çökelti oluşturulur. Kalan çözelti arındırma amaçlı filtreden geçer ve çöktürme tankına gönderilir [26,28].

Çöktürme sırasında soğutulmuş olan çözeltiye alüminyum hidroksit [$\text{Al}(\text{OH}_3)$] ilavesiyle çökeltme hızlandırılmaktadır. Böylece verim daha da yükselerek çökeltme ile $\text{Al}(\text{OH}_3)$ elde edilmektedir [26].

Kalsinasyon aşaması, elde edilen AlOH_3 içerisinde bulunan nemin uzaklaştırılması ve Al_2O_3 'e dönüştürülmesi suretiyle uygulanan son aşamadır. 1000°C ve üzerindeki sıcaklıklarda döner tamburlarda kalsinasyon işlemi yapılarak yapı içerisinde bulunan su uzaklaştırılır ve birincil alüminyumun elde edilmesi için gerekli olan bileşik elde edilmiş olur [27,28].

2.6.2 Hall-Heroult Prosesi

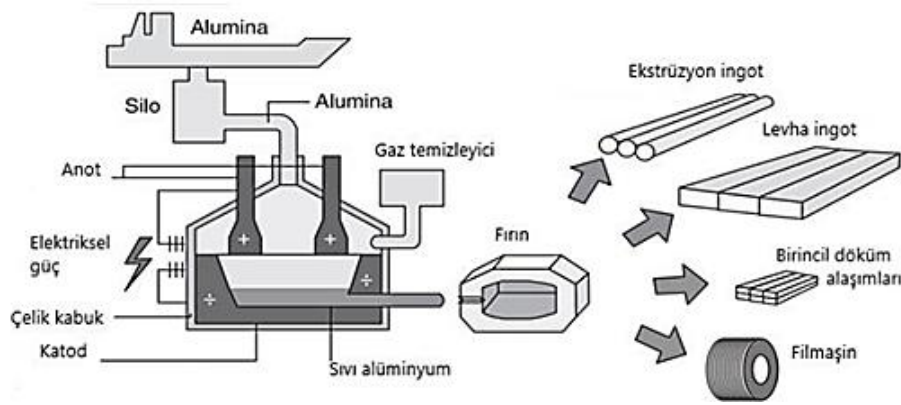
Proses adını aynı zamanda icat eden Amerikalı Charles Martin Hall ve Fransız Paul Heroult'tan almaktadır. Alüminadan ergimiş tuz elektrolizi ile metalik alüminyum üretilmesi adımlarını içermektedir. Şekil 2.3'te elektroliz işlemi şematik olarak verilmiştir [26,27].



Alümina beyaz toz şeklinde kararlı bir yapı olması ve 2050°C gibi yüksek sıcaklıklarda erimesi sebebiyle proses sırasında eritme potasına alumina ile birlikte kriyolit (Na_3AlF_6) ilavesi yapılarak 960°C 'de elektroliz işlemiyle metalik alüminyum elde edilme imkanı sağlamaktadır [26,27].

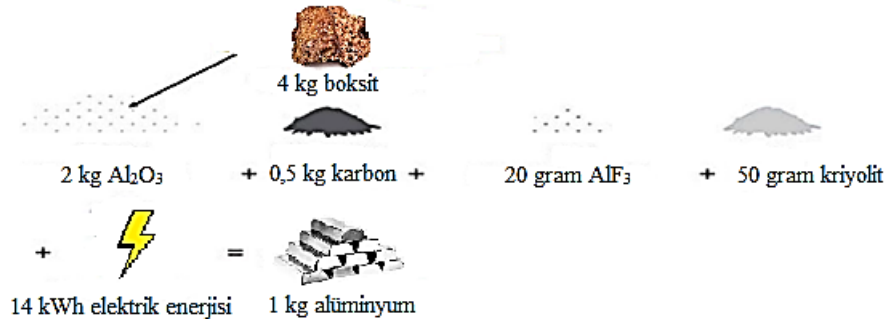
Elektroliz hücrelerinde yüksek akım (100-400 kA) ve düşük voltaj (6V) değerlerinde çalışılmaktadır. İçerisinde ergimiş alüminyum oksit ve kriyolit bulunan elektrolitik ortama karbon anotlar daldırılması suretiyle alüminyum ve oksijen arasındaki bağ kırılmaktadır. Bu işlem sırasında akım çözültiden geçtiği sırada anottaki karbon alüminadaki oksijenle reaksiyona girer ve alüminyum ile karbon dioksit açığa çıkarır. Pota dibinde tahliye edilmeye hazır saf alüminyum bir veya iki gün aralıklarla hücrelerin dibinden alınır. Elektroliz işlemi sırasında alüminyum tonu başına 13MWsa enerji kullanılır. Metal potalarda eritme sonucunda %99,7'lik alüminyum elde edilebilmektedir [26-28].

Hall-Heroult prosesi Şekil 2.4'te verilmiştir.



Şekil 2.4 Hall-Heroult prosesi ile saf alüminyum üretimi [29]

Birincil yani cevherden saf alüminyum üretimi sırasında gerekli olan enerjiler Şekil 2.5'te gösterilmiştir. Üretim sırasında 8 kg boksitten yaklaşık 4 kg alumina ve yaklaşık 2 kg metalik alüminyum elde edilebilmektedir [26].



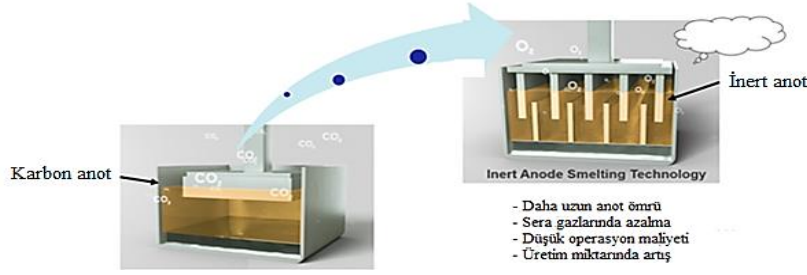
Şekil 2.5 Birincil alüminyum üretimi için gerekli hammaddeler

2023 yılında alüminyum-boksit kritik hammaddeler arasına girmiştir. Günümüzde sürdürülebilirlik ve karbon ayak izinin azaltılması ile ilgili birçok teknoloji geliştirilmekte ve kitlesel üretimde rekabet artmaktadır. Bu yeniliklere bir örnek Alcoa firmasının Elysis projesi kapsamında geliştirmiş inert anotlu ve sıfır karbonlu ergitme teknolojisidir (Inert Anode Smelting Technology).

İlk defa 2018 yılında duyurulan proje sayesinde daha düşük maliyetli, çevreci ve 30 kat daha uzun ömre sahip anot sağlanmakta, üretim oranları artmakta ve operasyon maliyetleri azalmaktadır.

Elysis, 2024 yılında bu teknolojiyi ticarileştirmeyi, ergitme sistemlerinde kullanmayı ve mevcut ergitme fırınlarında bu teknolojinin kullanımını

yaygınlaştırmayı planlamaktadır. Söz konusu teknoloji ile Al_2O_3 'ten alüminyum ve oksijen üretilmektedir. Şekil 2.6'da bu teknolojiye ait görsel verilmiştir [30,31].



Şekil 2.6 Alcoa firmasına ait Elysis (inert anotlu ergitme) teknolojisi [30]

Bu teknolojinin sadece Kanada'da uygulanması durumunda sera gazı emisyonlarının 7 milyon ton civarında azalabileceği belirtilmektedir. Bu değer, 1,8 milyon aracın trafikten kaldırılması anlamına gelmektedir. Elysis ayrıca geleneksel anot katot malzemelerinden 30 kat daha uzun ömre sahip yeni nesil anot ve katot malzemeleri satacağını da açıklamıştır [30].

2.7 İkincil Alüminyum Üretimi

İkincil alüminyum üretimi, hurdaların daha düşük (yaklaşık birincil üretimin %5-10'u kadar) enerji tüketilerek ergitilmesi ve istenen formlarda dökülmesi suretiyle gerçekleştirilen üretim şeklidir.

Alüminyum neredeyse %100 geri dönüştürülebilir bir malzeme olmasının yanında bazı durumlarda örneğin boyalı, fitilli, laklı, kompozit vb. hurdalarda geri dönüştürülmeden önce ayrıştırılma işlemine tabi tutularak yabancı malzemelerden arındırılması gereken bir malzemedir. Bu sebeple hurda hazırlığı ve temizliği ikincil üretim sırasında proses verimini ve kaliteyi doğrudan etkileyen parametrelerden başlıcalarıdır [25,28].

Alüminyum hurdaları; üretim sırasında proses kaynaklı oluşan iç hurdalar ve kullanım ömrünü dolduran jant, meşrubat kutuları, folyolar, levha hurdaları, profil hurdaları, otomotiv parçaları gibi çeşitlilikte olabilmektedir.

Tüm hurdaların ergitmeye hazır hale getirilmesi sonrası beklenen kalite ve standartlara göre ikincil üretim süreci; alaşım elementi ilavesi, sıvı metalin rafine edilmesi, gaz giderme, tane inceltme, döküm, cüruf temizliği ve cürufun değerlendirilerek geri kazanılması gibi adımları içerir. Dünya'da alüminyum

retiminin %50'sini oluşturan birincil üretimin çevreci bir üretim olmaması, artan enerji maliyetleri gibi sebeplerden ötürü önümüzdeki süreçte ikincil üretim oranının Dünya genelinde artacağına işaret etmektedir [27,32].



3

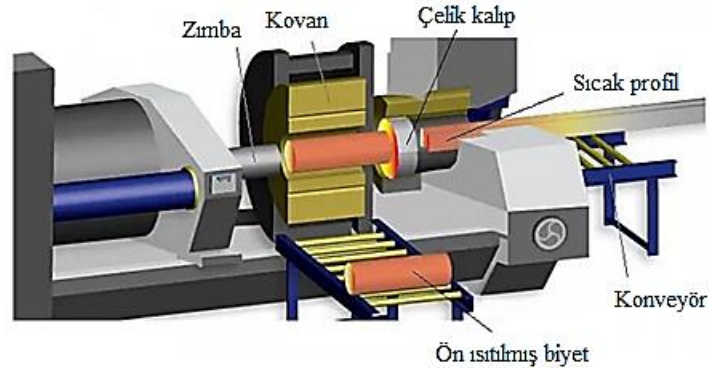
ALÜMİNYUM EKSTRÜZYON YÖNTEMLERİ

Alüminyum, yüzey merkezli kübik kristal yapısı ve sünek bir malzeme olması sayesinde plastik şekil verme yöntemleri ile şekillendirilme özelliğine sahip bir metaldir. Bu plastik şekil verme metotlarından en yaygınları; dövme, haddeleme, derin çekme ve ekstrüzyon şeklindedir. Bu çalışmanın ana konusu olan ekstrüzyon prosesi, birincil veya ikincil üretim sonrasında dökülen biyetlerin mekanik bir kuvvet yardımı ile sıcaklık ve yüksek basınçla sıkıştırılması ve farklı geometrilere sahip profillerin elde edilmesi sürecini içermektedir.

Detay vermek gerekirse alüminyum ekstrüzyonu, belirli bir çaptaki bloğun (biyet) bir kalıptan geçirilerek istenilen formu aldığı bir plastik şekillendirme yöntemidir. Bu süreçte, ilk önce alüminyum biyetin plastik deformasyon kabiliyetini arttırmak amacıyla doğalgaz veya çeşitli yöntemlerle ısıtma işlemi uygulanır. Ardından, bir robot kol tarafından fırından alınan biyet, ekstrüzyon presine yerleştirilir ve zımba tarafından yüksek basınçla itirilerek belirli bir şekle sahip kalıp boşluğu içerisinde geçirilir. Bu süreçte billet, plastik deformasyona uğrayarak hedeflenen profil elde edilir. Ekstrüzyon prosesi süresince kullanılan ve ekstrüzyon prosesinin en önemli kısımlarından biri olan sertleştirilmiş çelik kalıplar, proses sırasında oluşan deformasyon ve sürtünme kaynaklı hasar almasını engellemek ve sürtünmeyi azaltmak amacıyla ısıtılır.

Ekstrüzyon üretim yöntemi genellikle uzun, sabit kesitte profillerin üretimi için tercih edilir. Karmaşık profiller, boru, levha veya çubuk gibi çeşitli ürünlerin elde edilmesinde de yaygın olarak kullanılır. Bu yöntemin avantajları arasında yüksek üretim hızı, düşük maliyet ve tasarım esnekliği bulunmaktadır. Ekstrüzyon, otomotiv, inşaat, ambalaj, elektronik ve birçok endüstriyel sektörde geniş bir uygulama yelpazesine sahiptir.

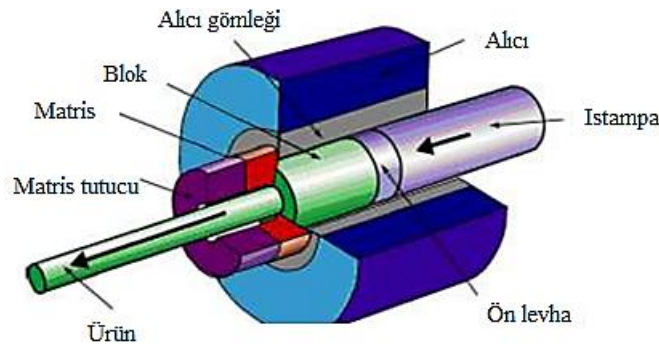
Ekstrüzyon yöntemlerini dolaylı ekstrüzyon ve doğrudan ekstrüzyon olarak ikiye ayırmak mümkündür. Şekil 3.1’de ekstrüzyon presi örneği sunulmuştur.



Şekil 3.1 Ekstrüzyon presi örneği [33]

3.1 Doğrudan Ekstrüzyon

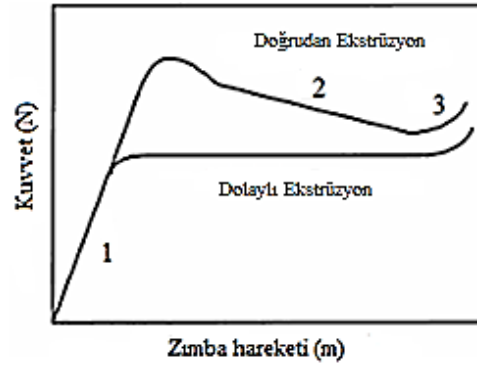
Alüminyum ve alaşımlarının ekstrüde edilmesinde yoğun olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde ön ısıtılmış alıcı ve blok pres içerisine yerleştirilir. Ön ısıtılmış çelik kalıba doğru ıstampa vasıtasıyla yüksek basınçla itilmek suretiyle nihai ürün elde edilir. Metalin akış yönü ıstampanın yönü ile aynı olup metal ile kovan arasında sürtünme oluşmaktadır. Bu yöntemde kalıba alınan biyetin tamamı ekstrüde edilememektedir. Bu sebeple biyetin dış kabuğunda bulunan oksit tabaka ölü metal bölgelerinde kalır ve biyet sonu da ara iş hurdası olarak ayrılır. Bu metotta kalıp çapı konteynırın iç çapı ile sınırlı olmadığından dolayı geniş ve karmaşık geometrili profil üretimini mümkün kılmaktadır. Şekil 3.2’de doğrudan ekstrüzyon yöntemi gösterilmiştir [35-38].



Şekil 3.2 Doğrudan ekstrüzyon yöntemi [34]

Doğrudan ve dolaylı ekstrüzyon yöntemleri kıyaslandığında ıstampanın hareketine göre gereken yük veya basınç Şekil 3.3’teki gibi değişmektedir. Doğrudan ekstrüzyonda birinci bölge biyetin sıkıştırılması ve ilerlemesi için gereken kuvvetten dolayı yükselme eğiliminde olup, ikinci bölgede ise rejim bölgesine

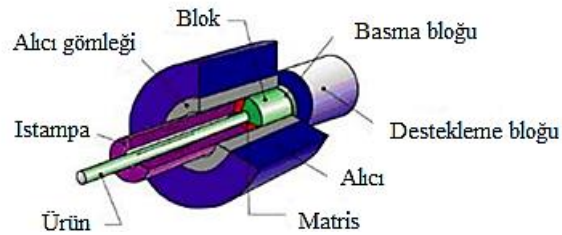
girmekte ve üçüncü bölgede kalıp içerisinde ölü metal bölgesindeki oksit tabaka ekstrüzyon kuvvetini arttırdığından dolayı yükselme eğilimi göstermektedir [38].



Şekil 3.3 Ekstrüzyon prosesi sırasında gerekli kuvvet rejimi [38]

3.2 Dolaylı Ekstrüzyon

Dolaylı ekstrüzyonda matris yani kalıp, içerisi boş olan ıstampaya yerleştirilir (Şekil 3.4). Bu yöntemde biyet (blok) sabit olup, kalıp biyete doğru hareket etmektedir. Malzeme akış yönü ile uygulanan kuvvetin yönü birbirine göre ters yöndedir. Biyet ile kovan arasında sürtünme olmamasından dolayı kuvvet ihtiyacı direkt ekstrüzyona göre daha düşüktür. Metal akışı direkt ekstrüzyona göre daha homojendir. Yüksek ekstrüzyon hızlarına çıkılabilir. Bu yöntemle dikişsiz boru üretimi mümkün olmaktadır. Bu yöntemin dezavantajı ise nihai ürün boyutlarının ıstampa çapı ile sınırlı oluşudur ve karmaşık şekilli profillerin ekstrüzyonuna uygun bir yöntem değildir [35-38].



Şekil 3.4 Dolaylı ekstrüzyon yöntemi [34]

Ekstrüzyon prosesi birçok parametreye bağlı prosestir. Bu parametrelerin herhangi biri prosesi olumsuz etkileyebilmekte veya kusurlu ürün ortaya çıkmasına sebep olabilmektedir. Bu parametreler; kalıp, biyet, malzeme, pres, soğutma, döküm, homojenizasyon gibi tüm süreçleri içermektedir. Bunun yanında mekanik özelliklerin sağlanması için mikroyapının kontrol edilmesi gerekmektedir. Bu

sebeple proses sırasında metalin akışı kritik öneme sahiptir ve metal akışını birçok parametre etkilemektedir [39,40].

Önemli bazı parametreler aşağıda verilmiştir:

- Ekstrüzyon yöntemi,
- Ekstrüzyon oranı,
- Kalıp şekli, sıcaklığı ve tasarımı,
- Sürtünme bölgelerindeki deformasyonun etkileri,
- Alaşım türü ve mikroyapısı,
- Kovan ve biyet sıcaklıkları,
- Ram ve ekstrüzyon çıkış hızları şeklindedir [39,40].

3.2.1 Alüminyum Ekstrüzyon İşlem Basamakları

Alüminyum ekstrüzyon yöntemiyle üretim, alüminyum sektöründe yaygın bir üretim metodudur. Ekstrüzyon süreci döküm ile başlayıp, homojenizasyon işlemi ve ekstrüzyon işlemi ile devam etmektedir. Söz konusu proses sonrası, malzemeden beklenen mekanik ve yüzey özelliklerine göre isteğe bağlı ısıtma işlemi ve yüzey işlemleri uygulanmaktadır.

3.2.1.1 Doğrudan Ani Soğutmalı Döküm

Ekstrüzyon ile üretim için elzem olan biyet üretiminde kullanılan güncel teknoloji doğrudan ani soğutmalı döküm metodudur. Doğrudan ani soğutmalı döküm yöntemi Şekil 3.5'te sunulan basamakları içermektedir.

Hammaddenin Şarjı ⇒ Ergitme ve Tutma ⇒ Gaz Giderme ⇒ Tane İnceltme ⇒ Filtrasyon ⇒ Düşey Sürekli Döküm

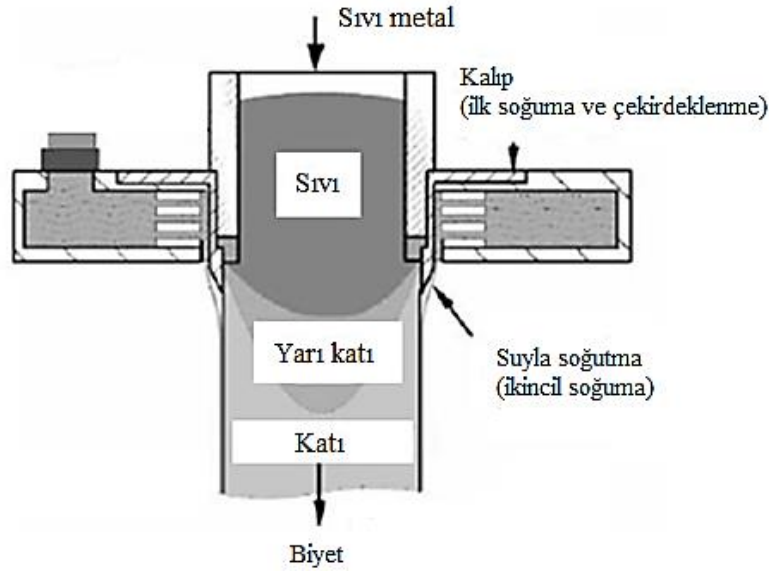
Şekil 3.5 Doğrudan ani soğutmalı döküm proses akışı [41]

Şekil 3.5'te görüleceği üzere döküm prosesi birçok ara basamağı içermektedir. Sıvı metal ergitildikten sonra gaz giderme ve tane inceltme aşamalarının ardından filtreden geçerek yolluklar aracılığıyla döküm masasına gelir ve genellikle su ile soğutulmak suretiyle düşey dökümü gerçekleştirilir (Şekil 3.6) [42].



Şekil 3.6 Düşey sürekli döküm ünitesi [39]

Düşey sürekli dökümde soğutma bölgeleri birincil ve ikincil soğutma olarak ikiye ayrılmaktadır. Şekil 3.7’de görüleceği üzere birincil soğuma sonrası metal yarı-katı duruma gelmekte ve ikincil soğutma ile biyet dökümü tamamlanmaktadır. Biyet üretimi sonrası biyetler ultrasonik muayene ile kontrol edilerek porozite gibi hatalar tespit edilmektedir.



Şekil 3.7 Düşey sürekli döküm yönteminde soğuma bölgeleri [42]

Bu döküm yönteminde kesit şekli kalıp ile belirlenmektedir. Yassı mamül üretiminde dikdörtgen şekilde kalıplar kullanılmakta iken ekstrüzyonda ise dairesel kesitli biyet dökümü gerçekleştirilmektedir. Birincil soğutma bölgesi, yolluk aracılığıyla masaya gelen sıvı metalin kalıp duvarı ve sıvı metal arasındaki

katılaşmasını içerir ve burada sıvı metal akışı ile alaşım elementleri kabuğa doğru ilerlemektedir. Bu bölgede birden fazla oluşum ve katılaşmadan dolayı katılaşma karmaşık şekilde gerçekleşir. Kalıp altında yer alan su ile soğutma bölgeleri oluşmaya başlayan biyet yüzeyine su püskürterek ikincil soğutmayı meydana getirirler. Döküm hızları alaşıma bağlı olarak 50 mm/dk ve 100 mm/dk. arasında değişmektedir. Bu yöntemin başlıca avantajları yüksek hızlarda üretim, düşük segregasyon, çatlak riskinin minimize edilmesi ve esnek üretime imkan sağlamasıdır [42-46].

3.2.1.2 Homojenizasyon

Homojenizasyon ısıtma işlemi, döküm sırasında oluşan homojen olmayan karmaşık yapının homojen hale getirilmesi ve plastik şekil vermeye uygunluk sağlanması için yapılmaktadır. Özellikle yavaş soğuma sırasında oluşan dendritik ve segrege olmuş yapı homojen hale getirilmektedir. Homojenizasyon ısıtma işlemi ekstrüzyon prosesinde kritik öneme sahiptir ve son ürünün kalitesine etkisi bulunmaktadır. Homojenize edilmemiş bir yapıda bulunan gevrek intermetalik fazlar ve düşük sıcaklıklarda ergiyen ötektik fazlar, işlenebilirliğe ve şekil verme kabiliyetine olumsuz etkide bulunmaktadır. Homojenizasyon işleminin 6xxx serisi alaşımlardaki bir diğer etkisi de iğnesel yapıdaki β -AlFeSi intermetalik fazlarının küresel α -AlFeSi parçacıklarına dönüştürülmesidir. İğnesel yapıya sahip durumdaki intermetalik fazlar ekstrüzyonu zorlaştırmakta ve birçok yüzey hatalarına sebebiyet vermekte olup, $\beta \rightarrow \alpha$ dönüşümü büyük önem taşımaktadır. 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında homojenizasyon sıcaklıkları ve süreleri alaşıma bağlı olarak 500-570°C ve 5-9 saat süre ile gerçekleştirilmektedir. 6xxx serisinin mukavemetleştirici fazı olan Mg_2Si intermetalığının çökmesi 135°C'de başlamakta olup 510°C'de çözünme neredeyse tamamlanmaktadır. Tablo 3.1'de bazı alüminyum alaşımlarının homojenizasyon sıcaklıkları ve süreleri verilmiştir [47-49].

Tablo 3.1 Bazı alüminyum alaşımları ve homojenizasyon parametreleri [41]

Alaşım	Homojenizasyon sıcaklığı (°C)	Homojenizasyon Süresi (saat)
1060	560-580	6
1100	580-600	6
2014-2024	480-490	12
5052	550-560	12
5083-5086	520-540	12
5454-5456	550-560	12
6061	560-570	6-8
6063	560-580	6
6101	560-580	6
6463	560-580	6
7001	460-480	12
7075,7079	470-480	12

3.2.1.3 Ekstrüzyon

Daha önceki bölümde belirtildiği gibi ekstrüzyon, döküm işleminden sonra homojenize edilmiş biyetlerin malzemenin alaşımına uygun sıcaklık ve basınçta, önceden ısıtılmış kalıp ve biyetlerin pres kuvveti ile sıkıştırılması suretiyle profil üretim süresini içermektedir. Pres kuvvetleri birkaç yüz tondan başlayıp binlerce tona çıkabilmektedir. Şu anda Türkiye'nin en büyük presi ASAŞ Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş.'de bulunan 62MN kurulu güce sahip ekstrüzyon presidir. Şekil 3.8'de ekstrüzyon presi örneği verilmiştir.



Şekil 3.8 Ekstrüzyon presi örneği [39]

Ekstrüzyon işleminden önce biyetlerin 450-500°C aralığına ısıtılması gerekmektedir. Isıtma doğalgaz, indüksiyon veya manyetik olabilir. Bu ısıtma ile sıcak olarak biyetler daha kolay deforme edilebilmekte ve istenen plastik deformasyon sağlanmaktadır. Bir diğer sebebi de malzemelerin yüksek sıcaklarda akma mukavemetlerinin düşmesi ve ekstrüzyon işlemini kolaylaştırmasıdır. Biyet

ısıtma sıcaklıkları yine alaşıma özel seçilmelidir ve oluşabilecek kısmi ergimelerden kaçınılması gerekmektedir. Prese göre değişmekle birlikte genelde 500-1500 mm arasında kesilen biyetler prese yüklenerek ekstrüde edilirler. Profil çıkışında malzeme su veya hava ile soğutularak mekanik özellik isterlerinin karşılanması hedeflenmektedir [39,45,50].

3.2.1.4 Çökelme Sertleşmesi

Çökelme sertleşmesi, bir diğer adıyla yaşlandırma ısıtma işlemi malzemenin mukavemetini arttırmak için kullanılan bir ısıtma işlemi olup mekanik özellik, süneklik, korozyon dayanımı gibi beklentilere göre yapay yaşlanma ısıtma işlemi, pik yaşlanma, aşırı yaşlanma şeklinde gerçekleştirilmektedir. Bir malzemenin yapay yaşlandırmaya uygun olabilmesi için solvüs eğrisi ve kısmi çözünürlük bölgesine sahip olması gerekmektedir. Alüminyum alaşımlarından 2xxx, 6xxx ve 7xxx serileri yapay yaşlandırmaya uygun olup, bu çalışmada en popüler ekstrüzyon alaşımı olan 6xxx serisi üzerinde durulacaktır.

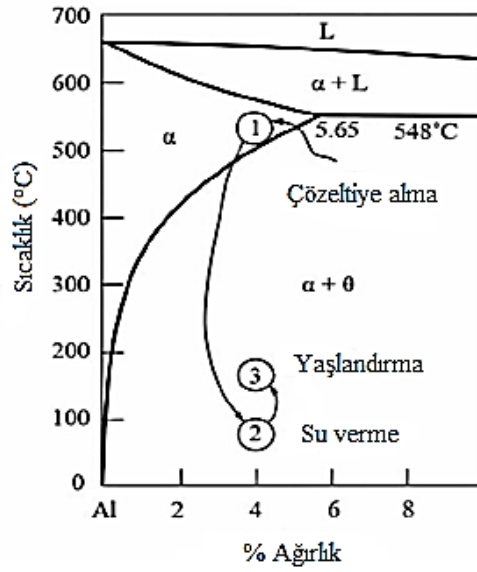
Yaygın olarak alüminyuma uygulanan ısıtma işlemi koşulları aşağıda verilmiştir:

- F-Üretildiği şekilde,
- T4-Çözeltiye alınmış ve doğal yaşlandırılmış,
- T5-Sıcak deformasyon sonrası su verilmiş ve yapay yaşlandırılmış,
- T6-Çözeltiye alınmış ve yapay yaşlandırılmış,
- T7-Çözeltiye alınmış ve aşırı yapay yaşlandırılmış.

Yaşlandırma ısıtma işleminin 3 temel aşaması aşağıda sunulmuştur:

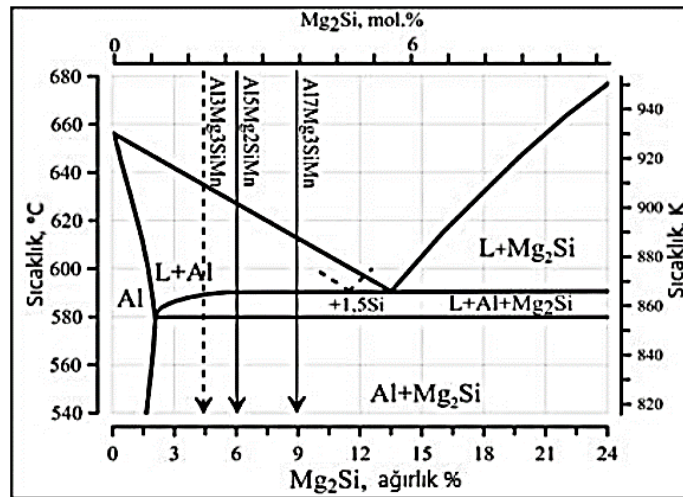
1. Çözeltiye alma
2. Su verme
3. Yaşlandırma

Şekil 3.9'da yaşlandırma ısıtma işleminin basamakları gösterilmiştir.



Şekil 3.9 Yaşlandırma ısııl işlem adımları [52]

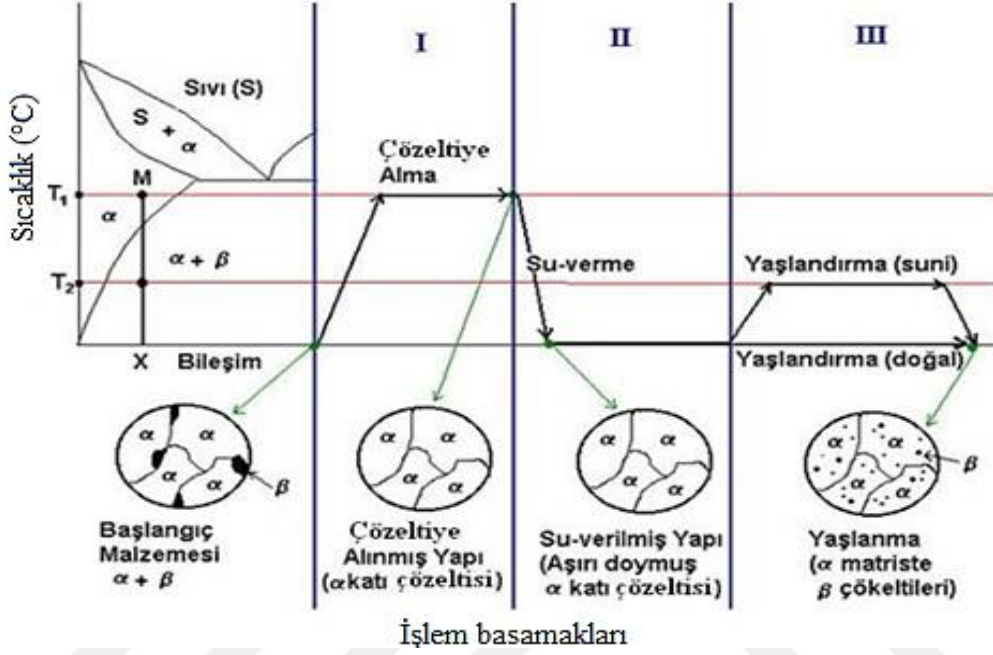
Çözeltiye alma adımımda, yaşlandırma ısııl işlemi sırasında çökelpmenin sağlanabilmesi için gerekli olan homojen ve aşırı doymuş katı çözeltinin elde edilmesi amaçlanmaktadır. Amaç, katı çözelti içerisinde alaşım elementinin en yüksek oranda çözünmesidir. Çözeltiye alma aşamasında, çözeltiye alma sıcaklığı solvüs eğrisi göz önüne alınarak belirlenmektedir. Şekil 3.10'da alüminyum ile 6xxx serisinde oluşan Mg_2Si fazının oluşturmuş olduğu Al- Mg_2Si faz diyagramı verilmiştir [53,54].



Şekil 3.10 Al- Mg_2Si Faz Diyagramı [55]

Su verme adımımda, çözeltiye alma sıcaklığına çıkılıp bir süre beklenmesinin ardından oda sıcaklığına yakın bir sıcaklığa malzeme hızla soğutulur. Soğutma yavaş olması durumunda ilerleyen prosesde yaşlandırma ısııl işlemi sırasında iri

çökeltiler meydana gelerek mukavemet kaybı yaşanmasına sebep olabilmektedir. Bu sebeple aşırı doymuş katı çözelti eldesi için soğutmanın hızlı bir şekilde gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Genellikle su kullanılarak saniyeler içerisinde oda sıcaklığına soğutma gerçekleştirilmektedir Şekil 3.11’de yaşlandırma proses adımları özetlenmiştir [53,54].



Şekil 3.11 Yaşlandırma proses adımları [56]

Su vermenin hassasiyeti alaşımın kimyasal kompozisyonuna göre ve tane yapısına bağlı olarak değişmekte olup, 2xxx ve 7xxx serilerinde su verme hassasiyeti 6xxx serilerine göre daha yüksektir [57].

Yaşlandırma basamağında, aşırı doymuş katı çözeltiden oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) veya belirli bir sıcaklık uygulanarak (120-210°C) yapay yaşlanma şeklinde katı çözeltiden yeni bir fazın çökelti halinde oluşturulması suretiyle mekanik özelliklerin iyileştirilmesi hedeflenmektedir. Nihai özellikler üzerinde uygulanan sıcaklık ve sürenin etkisi oldukça fazladır. Alüminyum alaşımlarında yüksek mekanik özellik beklediği durumda T6 ısıtıl işlem kondisyonu talep edilmektedir. Eğer bu sıcaklık ve süre malzemenin yaşlanma eğrisinin üzerine çıkarsa aşırı yaşlanma (T7) durumu oluşmaktadır. Çökeltilerin büyümesi nedeniyle mekanik özelliklerde düşüş yaşanmakta olup, malzemenin korozyon dayanımı ve çarpışma performansında iyileşme meydana gelmektedir [58-61].

Tablo 3.2’de alüminyum alaşım serilerinde yaşlandırma ısıl işlemiyle oluşan çökeltiler verilmiştir.

Tablo 3.2 Yaşlandırma ısıl işlemiyle oluşan çökelti profili [62]

Alaşım Serisi	Çökelti Profili
2xxx	Aşırı doymuş katı çözelti → GP zonları → θ'' → θ' → θ (CuAl_2)
6xxx	Aşırı doymuş katı çözelti → GP zonları → β'' → β' → β (Mg_2Si)
7xxx	Aşırı doymuş katı çözelti → GP zonları → η' → η → (MgZn_2)

3.2.1.5 Yüzey İşlemleri

Alüminyum her ne kadar yüzeyinde oluşturmuş olduğu doğal oksit tabakası nedeniyle korozyon ortamlara dayanıklı bir malzeme olsa da, kullanım alanına göre daha yüksek korozyon dayanımı ya da estetik görünüm gibi beklentilerden ötürü yüzey işlemlerine tabii tutulurlar. Bu yüzey işlemlerinden en yaygınları eloksal ve toz boya uygulamalarıdır. Müşteri taleplerine göre belirlenen bu yüzey işlemleri öncesinde malzeme yüzeyinin kaplanabilmesi için mekanik veya kimyasal yüzey hazırlıkları uygulanır. Bunlar; zımparalama, satinaj, kumlama ve parlak yüzey eldesinde kullanılan polisaj işlemi olarak sıralanabilir. Şekil 3.12’de eloksal tesisi örneği verilmiştir.



Şekil 3.12 Eloksal tesisi [39]

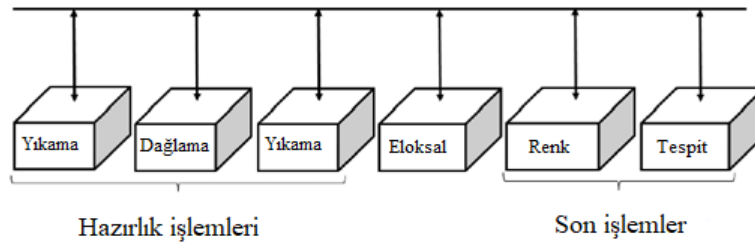
Eloksal işleminde, genellikle sülfürik asit (H_2SO_4) yardımı ile akım ve voltaj altında malzeme yüzeyinde bulunan alüminyum oksit tabakanın kalınlığı arttırılmak suretiyle korozyon dayanımı arttırılmaktadır. Eloksal kalınlıkları teorik olarak 100

µm değerlerine ulaşsa da, yaygın olarak 5-25 mikron aralığında kaplama yapılmaktadır. Tablo 3.3'te alüminyum alaşımlarına uygulanan tipik sülfürik asit anodizasyonuna ait parametreler verilmiştir.

Tablo 3.3 Sülfürik asit anodizasyon işlemine ait parametreler [51]

Parametre	Değer
Elektrolit konsantrasyonu	% 15 H ₂ SO ₄
Sıcaklık	21 ± 1°C
Süre	30-60 dk
Voltaj	15-22 V
Akım Yoğunluğu	1-2 A/dm ²

Şekil 3.13'de eloksal prosesine ait ön ve son işlemler gösterilmiştir.



Şekil 3.13 Elokshal prosesinde aşamalar [39]

Ekstrüde edilmiş profillere uygulanan yüzey işlemlerinden bir diğeri olan elektrostatik toz boya prosesinde, ön yüzey hazırlık işlemlerinden sonra profil yüzeyine robotlar aracılığıyla elektrostatik olarak yüklü boya partikülleri homojen olarak tabanca yardımıyla kaplanır. Sonraki proses basamağı ise boyanın yüzeye tamamen yapışmasını sağlamak adına gerçekleştirilen kürlenme prosesidir. Toz boyanmış profiller; korozyon dayanımı, dekoratif görünümünün yanı sıra güneş ışığındaki zararlı ışınlar karşı iyi dayanım gibi özelliklere sahip olmaktadır. Şekil 3.14'te örnek toz boya tesisi verilmiştir [39].



Şekil 3.14 Elektrostatik toz boya tesisi [39]

6063 ALÜMİNYUM ALAŞIMININ STABİLİZASYON ISIL İŞLEMİ

Alüminyum alaşımlarından 2xxx, 6xxx ve 7xxx serileri doğal yaşlanma özelliğine sahiptirler. Bu doğal yaşlanma özelliği, malzemelerin stoklandığı durumda sertlik ve mukavemet artışını beraberinde getirmektedir. Doğal yaşlanmadaki bu mukavemet artışı, malzemenin yapay yaşlandırılarak pik mukavemetinin elde edilmesi sürecini olumsuz etkilemektedir. Doğal yaşlanma sırasında oluşan sertlik ve mukavemet artışının engellenmesi veya geciktirilmesi için stabilizasyon ısı işlemi uygulanmaktadır.

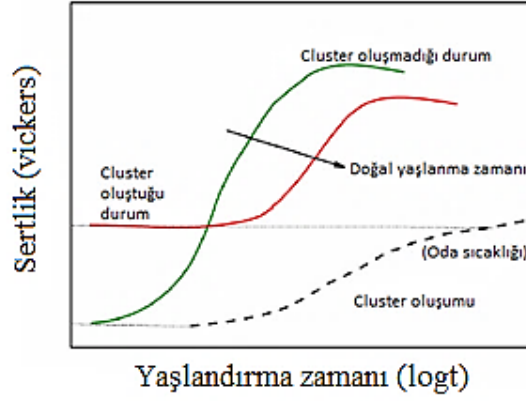
Stabilizasyon ısı işlemi, malzeme solüsyona alındıktan sonra, belirli bir sıcaklıkta şekil verilirken veya proses zincirinin herhangi bir adımında uygulanabilmektedir [1].

4.1 Stabilizasyon Isıl İşlemi

Stabilizasyon ısı işlemi, doğal yaşlanmanın negatif etkilerini engellemek amacıyla yapılan bir tür ön ısı işlemi olarak tanımlanabilir. Söz konusu ısı işlemi genellikle yaşlandırma sıcaklıklarından daha düşük sıcaklıklarda ve daha kısa sürelerde uygulanmaktadır.

6063, 6082, 6061 gibi Al-Mg-Si alaşımlarının T6 mukavemetleri doğal yaşlanma süre ve sıcaklığından büyük ölçüde etkilenmektedir. Bu yaşlanma kinetiğini olumsuz etkileyerek T6 mukavemetini düşürmektedir. Bu olgu, oda sıcaklığında gerçekleşen cluster oluşumuna dayanmaktadır [63].

Şekil 4.1’de cluster oluşumunun malzemenin sertliğine olan olumsuz etkisi gösterilmiştir.



Şekil 4.1 Cluster oluşumunun sertlik üzerindeki etkisi [64]

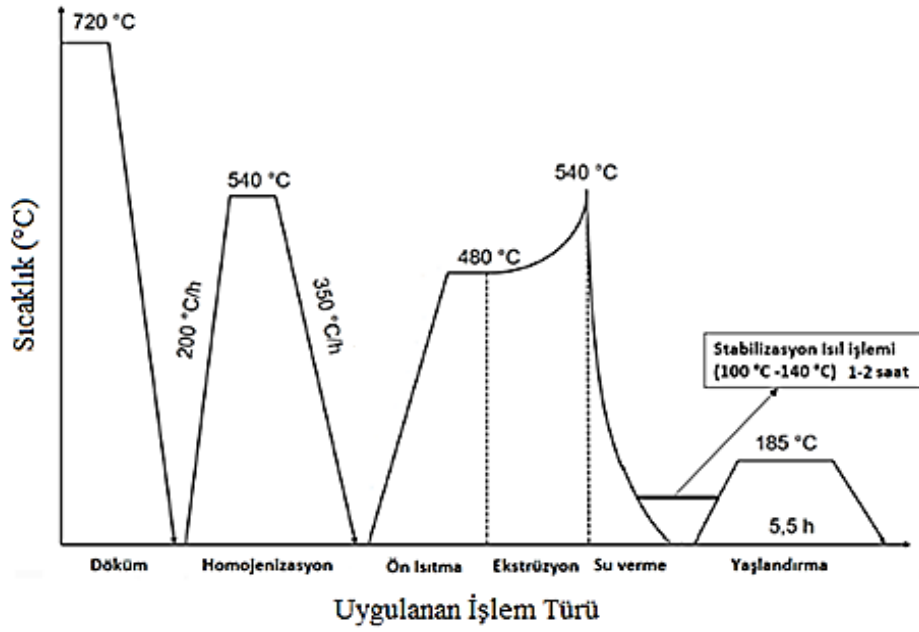
Lojistik kaynaklı depolama sürelerinin uzaması, solüsyona alma ve yapay yaşlandırma arasındaki sürenin günleri hatta haftaları bulması nedeniyle T6 ısıtma işlemi kondisyonuna ulaşmak için daha uzun süre o sıcaklıkta yapay yaşlandırma ihtiyacı doğmaktadır. Bu durum, ulaşılabilecek maksimum T6 mukavemetinin de azalmasına sebep olmaktadır [64].

4.2 Stabilizasyon Isıl İşleminin Uygulanması

Al-Mg-Si alaşımlarında stabilizasyon ısıtma işlemi özellikle otomotiv firmaları için 100°C civarındaki sıcaklıklarda birkaç saat süreler boyunca uygulanmakta olup, yapay yaşlandırma performansını arttırmak için yapılan ısıtma işlemidir. Genellikle otomotiv endüstrisinde stabil bir şekil verilebilirliğin ve nihai T6 kondisyonu mukavemetinin elde edilebilmesi için 2-3 ay stabil kalması istenmektedir [64].

Stabilizasyon ısıtma işlemi Mg+Si ağırlıkça yüzde oranı toplamı 1.4'e yakın olan alaşımlarda, Mg/Si oranının nihai T6 mukavemetine etkisi olduğu belirtilmektedir. Havayla soğutulan malzemelerdeki mukavemet kaybı, su ile soğutulanlara göre daha fazla olmaktadır [65].

Şekil 4.2'de stabilizasyon ısıtma işleminin uygulandığı basamak ve bir profilin dökümden yaşlandırmaya kadar geçirmiş olduğu işlemler gösterilmektedir.



Şekil 4.2 Stabilizasyon ısıtma işleminin uygulandığı aşama

7xxx serisi alaşımlarında da uygulanmakta olan stabilizasyon ısıtma işlemi 90-120-150°C gibi sıcaklıklarda 1-5 saat aralığındaki parametrelerde uygulanmaktadır. 7021 alaşımı için 90°C ve 1 saat uygulanan stabilizasyon ısıtma işlemiyle doğal yaşlanmanın olumsuz etkileri engellenmektedir. Ayrıca otomotiv alaşımlarında bu ısıtma işleminin uygulanması boya kürlenme sıcaklıklarında da çalışma imkanı sağlamaktadır [66].

4.3 6063 Alaşımına Stabilizasyon ısıtma İşleminin Uygulanması

6063 alaşımının oda sıcaklığı koşullarında (0-30°C) uzun süre doğal yaşlandırıldığı durumda GP bölgeleri (1)'i oluşturmaktadır. Oluşan bu GP (1) bölgeleri yapay yaşlandırma sırasında β' fazlarının çökmesini geciktirmektedir. Bu da yapay yaşlandırılmış durumdaki mukavemeti düşürmektedir. Doğal yaşlandırma süresinin veya sıcaklığının artması da bu negatif etkinin seviyesini arttırmaktadır. 40-70°C sıcaklıklarda uygulanan ısıtma işlemi ile GP (2) bölgeleri oluşmakta olup, uzun süreler geçse bile yapay yaşlandırılmış durumdaki mukavemete olumsuz etkisi olmamaktadır. Fakat -10°C'lerde yapılan yaşlandırmanın yapay yaşlandırmaya olan olumsuz etkisi açık bir şekilde görülememektedir. Özetle, 40°C ve üzeri sıcaklıklarda yapılan ısıtma işlemi GP (1) bölgelerinin yerine GP (2) bölgeleri oluşmaktadır ve doğal yaşlanmanın negatif etkileri giderilmektedir [3,67,68].

GP bölgeleri (1) küresel clusterlar şeklinde iken, GP bölgeleri (2) ince iğnesel yapılı monoklinik yapılı bölgeler olup, $\langle 100 \rangle$ düzleminde dizilirler. β' fazları ise mukavemeti kazandıran ana faz olup, hegzagonal yapılı çubuk şeklinde çökeltilerdir. β fazı ise kübik yapıdadır ve genellikle Mg_2Si düzlemleri şeklinde $\{100\}$ kübik yapılı alüminyum matrisi üzerinde çökelerler. Doğal yaşlanma sıcaklığı ve süresi mikro yapıya önemli ölçüde etkide bulunmaktadır [3,69,70].

Al-Mg-Si alaşımlarının uğramış olduğu faz dönüşümleri aşağıdaki gibidir:

Aşırı doymuş katı çözelti (α) $\rightarrow$ clusters $\rightarrow$ GP bölgeleri $\rightarrow \beta'' \rightarrow \beta' \rightarrow \beta$ (Mg_2Si) [71].

Sıcaklık ve sürenin yanında malzemenin nihai T6 mukavemetini ve mikro yapısını ve çökelti oluşturma davranışını etkileyen diğer parametreler ise homojenizasyon sıcaklıkları, solüsyona alma sıcaklığı ve süresi, Mg/Si oranı, diğer alaşım elementleri ve oranları şeklinde sıralanabilir [72-76].

Günümüzde yaşlanabilir 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında üretim sonrası uzun süreli beklemelemlerde yaşanan en önemli problemlerden biri, doğal yaşlanma sonucunda oluşan mukavemet artışıdır. Bu durum, malzemenin T6 mukavemetini yani mekanik özelliklerini değiştirmektedir. Bu değişim, ilave bir ısıt işleml süreci gerektirdiğinden, endüstriyel uygulamalarda istenmemektedir.

Tez çalışması kapsamında; mevcut durumda yaşanmakta olan doğal yaşlanmanın olumsuz etkisi azaltılarak malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amaçlanmıştır. Bu kapsamda, stabilize edilmiş durumdaki malzemenin yapay yaşlandırma ile nihai T6 mukavemetine ulaşmasını sağlayacak “Isıt İşleml Reçetesi” geliştirilmesi hedeflenmiştir. Bu doğrultuda, literatür temelli araştırmalar incelenerek 6xxx serisi alaşımlara uygun stabilizasyon sıcaklıkları belirlenmiş, farklı doğal yaşlanma zamanları için farklı sıcaklık ve sürelerde ısıt işleml çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Stabilizasyon ısıt işlemlinin ardından farklı bekleme süreleri sonunda malzemelere nihai T6 ısıt işleml uygulanmıştır. Üretilen deney numunelerinin mekanik özellikleri üç nokta eğme, çekme ve sertlik testleri ile; mikroyapı özellikleri ise SEM, SEM/EDS haritalama ve kırılmış yüzey analizleri ile incelenmiştir.

5.1 Malzeme ve Teçhizat

Tez çalışması kapsamında kullanılan malzeme ve teçhizatlar Tablo 5.1’de listelenmiştir.

Mikroyapı ve mekanik testler, ASAŞ Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde bulunan malzeme ve ekipmanlar aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Sunulan tez çalışmasında kullanılan alüminyum profil numuneler de ASAŞ Alüminyum Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde bulunan dökümhanede dökülerek, ekstrüzyon presinde ekstrüde edilmesi ile elde edilmiştir.

Tablo 5.1 Deneysel çalışmalarda kullanılan malzeme ve ekipmanlar

Sıra No	Malzeme/Ekipman	Marka	Kullanım Amacı
1	DC döküm ile üretilen 6063 alaşım profilleri	ASAŞ	Deney numunesi
2	Kaba Kesme Cihazı	Struers-Discotom-6	Kaba kesme
3	Hassas Kesme Cihazı	Struers-Secotom-15	Hassas kesme
4	Zımparalama Cihazı	Struers-Labopol-25	Zımparalama
5	Parlatma Cihazı	Struers-Tegramin-30	Parlatma
6	Reçine ve sertleştirici	Metkon Epocold	Bakalite alma
7	Dağlama asidi	Konvensiyonel Asit	Polarize dağlama
8	Elektrolitik Dağlama Cihazı	Struers-Lectropol	Elektrolitik dağlama
9	OES Analiz Cihazı	Thermo Scientific-ARL 4460	Kimyasal kompozisyon belirleme
10	Laboratuvar Fırını	Nabertherm	Isıl işlem
11	Optik Mikroskop	ZEISS AxioCam HRc	Mikroyapı, tane boyut analizleri
12	SEM Cihazı	ZEISS-EVO MA 15	Mikro yapı, EDS, kırılmış yüzey analizleri
13	Mikrosertlik Cihazı	Future-Tech FM700	Sertlik testleri
14	Çekme Cihazı	Zwick Roell Z250	Çekme ve bükme testleri

5.2 6063 Alaşımının Stabilizasyon Çalışmaları

Deneysel çalışmalarda kullanılacak olan 6063 alaşımının üretim rotası döküm ile başlamaktadır. Dökümden sonra elde edilen biyetler homojenizasyon ısıl işlemine tabii tutularak ekstrüzyona hazır hale getirilmektedir.

5.2.1 Doğrudan Soğutmalı Döküm (Direct Chill Casting)

Hurda ve primer külçeler ile TS-EN-573-3 standardına uygun şekilde bileşimi ayarlanan 6063 alaşımlı biyetler doğrudan soğutmalı döküm metodu ile Tablo 5.2'deki parametrelere uygun şekilde hazırlanmıştır.

Tablo 5.2 Döküm parametreleri

Parametre	Değer
Biyet uzunluğu	1000 mm
Biyet çapı	8 inç (203 mm)
Döküm hızı	105 mm/dk
Döküm sıcaklığı	700°C
Gaz giderme sıcaklığı	720°C (Ar+N ₂ ile)
Tane inceltici	TiB ₂

5.2.2 Homojenizasyon

İstenen çap ve uzunlukta dökümü gerçekleştirilen biyetler, ekstrüzyona hazır hale getirilmesi ve intermetalik fazlardaki kaba yapının giderilmesi için kamara tipi (batch type) homojenizasyon fırınında Tablo 5.3'teki parametreler kullanılarak homojenize edilmiştir. Demir elementince zengin olan primer β fazlarının α fazına dönüşümü gerçekleşmektedir. Diğer dönüşüm ise kaba haldeki Mg_2Si fazının ince ve eş eksenli β fazına dönüşümüdür. Söz konusu faz dönüşümleri ile hem ekstrüzyon kabiliyeti iyileştirilmekte hem de ekstrüzyon ve yapay yaşlandırma sonrası daha yüksek mekanik özelliklerin elde edilmesi sağlanmaktadır.

Tablo 5.3 Homojenizasyon parametreleri

Homojenizasyon Sıcaklığı	565°C
Homojenizasyon Süresi	8 saat

5.2.3 Ekstrüzyon

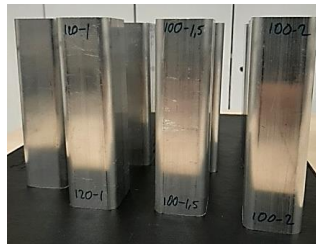
Homojenize edilerek ekstrüzyona hazır hale getirilen biyetler 2900 metrik ton kurulu güce sahip direkt ekstrüzyon presinde Tablo 5.4'te verilen parametreler kullanılarak ekstrüde edilmiştir.

Tablo 5.4 Ekstrüzyon parametreleri

Ekstrüzyon hızı	8 m/dk
Profil çıkış sıcaklığı	530°C
Biyet ısıtma sıcaklığı	450°C
Soğutma tipi	Su spreyi
Soğutma sonrası sıcaklık	Toda
Biyet ısıtma tipi	Doğalgaz

5.2.4. Deney Planı

Ekstrüde edilen alüminyum profillerden 15 cm uzunluğunda numuneler kesilerek deney örnekleri hazırlanmıştır. Şekil 5.1'de alüminyum profillere ait görüntü verilmiştir.



Şekil 5.1 Deney numuneleri

İstenen uzunluklara kesilen numuneler “Nabertherm” markalı laboratuvar fırınında stabilizasyon ısıl işlemine tabii tutulmuştur. Şekil 5.2’de bu ısıl işlem denemelerine ait görsel verilmiştir.



Şekil 5.2 Isıl işlem denemelerinin fırın içi görüntüsü

6063 alaşımının stabilizasyon ısıl işlemi çalışmalarında literatür araştırmaları sonucunda elde edilmiş bilgiler kullanılarak 3 farklı sıcaklık (100,120,140°C) için hazırlanmış deney planları Tablo 5.5, Tablo 5.6 ve Tablo 5.7’de verilmiştir.

Tablo 5.5 Deney Planı 1

Stabilizasyon Sıcaklığı (°C)	Stabilizasyon Süresi (saat)	Bekleme Süresi (hafta)	T6 Isıl İşlem Koşulları
100	1	2-4-6-8	185°C-5,5 saat
100	1,5	2-4-6-8	185°C-5,5 saat
100	2	2-4-6-8	185°C-5,5 saat

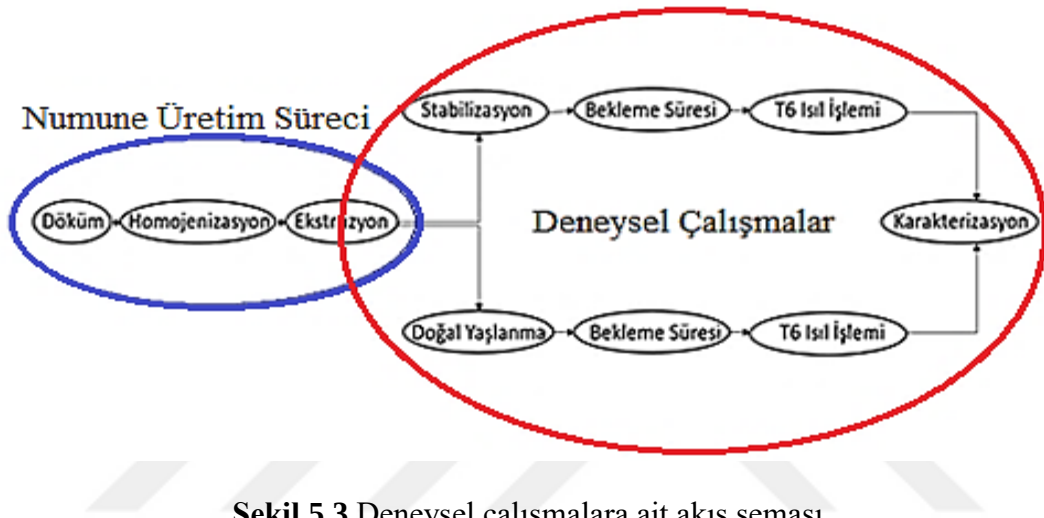
Tablo 5.6 Deney Planı 2

Stabilizasyon Sıcaklığı (°C)	Stabilizasyon Süresi (saat)	Bekleme Süresi (hafta)	T6 Isıl İşlem Koşulları
120	1	2-4-6-8	185°C-5,5 saat
120	1,5	2-4-6-8	185°C-5,5 saat
120	2	2-4-6-8	185°C-5,5 saat

Tablo 5.7 Deney Planı 3

Stabilizasyon Sıcaklığı (°C)	Stabilizasyon Süresi (saat)	Bekleme Süresi (hafta)	T6 Isıl İşlem Koşulları
140	1	2-4-6-8	185°C-5,5 saat
140	1,5	2-4-6-8	185°C-5,5 saat
140	2	2-4-6-8	185°C-5,5 saat

Deneyisel çalışmalarda kullanılan numunelerin üretim ve karakterizasyon aşamalarını içeren akış şeması Şekil 5.3'te verilmiştir.

**Şekil 5.3** Deneyisel çalışmalara ait akış şeması

Deney numunelerine ait numaralandırılma Tablo 5.8'de verilmiştir.

Tablo 5.8 Deney numunelerine ait koşullar

Numune No	Stabilizasyon Sıcaklığı ve Süresi	Bekleme Süresi	T6 Isıl İşlem Koşulları
1	100°C-1 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
2	100°C-1,5 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
3	100°C-2 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
4	120°C-1 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
5	120°C-1,5 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
6	120°C-2 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
7	140°C-1 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
8	140°C-1,5 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
9	140°C-2 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat
10	100°C-1 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
11	100°C-1,5 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
12	100°C-2 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
13	120°C-1 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
14	120°C-1,5 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
15	120°C-2 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
16	140°C-1 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
17	140°C-1,5 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
18	140°C-2 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat

Tablo 5.8 Deney numunelerine ait koşullar (devamı)

Numune No	Stabilizasyon Sıcaklığı ve Süresi	Bekleme Süresi	T6 Isıl İşlem Koşulları
19	100°C-1 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
20	100°C-1,5 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
21	100°C-2 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
22	120°C-1 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
23	120°C-1,5 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
24	120°C-2 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
25	140°C-1 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
26	140°C-1,5 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
27	140°C-2 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
28	100°C-1 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
29	100°C-1,5 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
30	100°C-2 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
31	120°C-1 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
32	120°C-1,5 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
33	120°C-2 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
34	140°C-1 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
35	140°C-1,5 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
36	140°C-2 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat

Diğer numunelere ait adlandırmalar ve ısıtım işlem koşulları Tablo 5.9’da verilmiştir.

Tablo 5.9 Diğer deney numunelerine ait koşullar

Numune No	Stabilizasyon Sıcaklığı ve Süresi	Bekleme Süresi	T6 Isıl İşlem Koşulları
Maksimum Akma	140°C-1,5 saat	8 hafta	185°C-5,5 saat
Minimum Akma	140°C-1 saat	4 hafta	185°C-5,5 saat
Maksimum Uzama	100°C-1 saat	6 hafta	185°C-5,5 saat
Minimum Uzama	140°C-1,5 saat	2 hafta	185°C-5,5 saat

5.3 Karakterizasyon Çalışmaları

Direkt ekstrüzyon yöntemi ile üretim sonrası alınan numuneler ile malzemenin mikroyapısal analizleri ve mekanik testleri gerçekleştirilmiştir. Ardından “Thermo Scientific-ARL 4460 OES Metals Analyzer” cihazı ile kimyasal analizleri saptanmıştır.

Kimyasal analizi belirlenen numunelerden daha sonra ISO 6892-1 standardına uygun olacak şekilde çekme testi numuneleri hazırlanmıştır. Şekil 5.4’te ISO 6892-1 standardına uygun olarak hazırlanan numunelerin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.4 ISO 6892-1 standardına uygun olarak hazırlanan çekme numuneleri

Bükme numuneleri Şekil 5.5’te gösterildiği gibi 60*30 mm ebatında VDA 238-100 standardına uygun olarak hazırlanmış ve üç nokta eğme testlerine tabii tutulmuştur.



Şekil 5.5 VDA 238-100 standardına uygun olarak hazırlanan bükme numuneleri

Hazırlanan çekme bükme numuneleri ile Şekil 5.6’da gösterilen “Zwick Roell Z250” cihazında çekme testleri ve üç nokta eğme testleri gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.6 Çekme ve üç nokta eğme test cihazı

Profil kesitlerinden hazırlanan numuneler bakalite alındıktan sonra sırasıyla kademeli olarak 180-500-1200-2400 gritlik zımpara kağıtları ile zımparalanmış ve Şekil 5.7’de gösterilen “Future-Tech FM700” marka mikrosertlik cihazında 50 gram yük altında 10 saniye süre uygulanarak mikro sertlik değerleri belirlenmiştir.



Şekil 5.7 Mikrosertlik numuneleri

Çekme, üç nokta eğme, sertlik gibi mekanik testlerin tamamlanmasının ardından mikro yapı analizleri, tane boyut analizleri, EDS analizleri ve kırılmış yüzey analizleri “ZEISS-EVO MA 15” markalı SEM cihazı ve “ZEISS AxioCam HRc” markalı optik mikroskop cihazında gerçekleştirilmiştir.

Numuneler önce “Struers-Discotom-6” marka kaba kesme cihazı kullanılarak sonra da “Struers-Secotom-15” marka hassas kesme cihazı kullanılarak hazırlanmıştır. Bakalite alma işlemleri “Metkon Epocold” marka reçine ve sertleştirici uygun oranda karıştırılarak ve oda sıcaklığında katılaştırılarak gerçekleştirilmiştir.

Metalografik numune hazırlama aşamasında ise sırasıyla 180-500-1200-2400 gritlik zımpara kağıtlarının “Struers-Labopol 25” marka zımpara makinesinde sabit debiyle akan saf su altında zımparalama işlemine tabii tutulmuştur. Parlatma işlemleri için “Struers-Tegramin-30” marka parlatma cihazında sırasıyla 3 µm ve 1 µm’lik elmas ve silika süspansiyonlar kullanılarak numuneler parlatma işlemine tabii tutulmuşlardır.

Konvensiyonel asit ile “Struers-Lectropol” marka elektrolitik dağlama cihazında 3 dakika süre ile dağlanan numunelerin tane boyut analizleri optik mikroskopta polarize ışık altında incelenmiştir.

Tez çalışması kapsamında, TS-EN 573-3 standardına uygun olarak üretilmiş olan 6063 alüminyum alaşımlı profiller kullanılmıştır. Standart ekstrüzyon üretim rotası ile üretilen söz konusu alaşımlı profillerden numune alınarak laboratuvar ölçekli deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Çalışmalar; Oda sıcaklığında 2-4-6-8 hafta bekletilen numunelere stabilizasyon ısı işlemi uygulanması ile stabilizasyonsuz profillerin doğal yaşlanma ve yapay yaşlanma özellikleri ile kıyaslanması aşamalarından oluşmaktadır. Elde edilen sonuçların mekanik ve mikroyapı karakterizasyonları bu bölümde belirtilmekte ve elde edilen sonuçlar yorumlanmaktadır. Tablo 6.1’de TS-EN 573-3 standardına göre 6063 alaşımı ve deneysel çalışmalarda kullanılan numunenin kimyasal kompozisyonu verilmiştir.

Tablo 6.1 6063 alaşımı OES analizleri (% ağırlık)

Alaşım	Kodu	Si (%)	Fe (%)	Cu (%)	Mn (%)	Mg (%)
EN AW-6063	6063-T6	0,2-0,6	0,35	0,10	0,10	0,45-0,90
ASAŞ-6063	T-6063	0,59	0,18	0,02	0,09	0,57

6.1 Mekanik Testler

Deney planı 1-2-3’e uygun olarak stabilizasyon uygulanan numunelere çekme, üç nokta eğme ve mikrosertlik testleri uygulanmıştır.

6.1.1 Çekme Testleri

TS-EN 755-2 standardına göre 6063 alaşımının T6 kondisyonunda olması gereken minimum mukavemet değerleri ve üretim sonrasında yapılan ısı işlem ile elde edilen mukavemet değeri ve belirlenen zaman aralıklarındaki mukavemet değerleri Tablo 6.2’de verilmiştir.

Tablo 6.2 6063 alaşımlarının T6 kondisyonunda mekanik özellikleri

Alaşım/Isıl İşlem Uygulaması	Alaşım Kodu	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
EN AW-6063-T6	6063-T6	200	245	8
ASAŞ-6063	A-6063	259,2	270,9	9,56
6063-2 hafta T4+T6	A2	257,8	268,1	9,38
6063-4 hafta T4+T6	A4	253,3	265,8	10,37
6063-6 hafta T4+T6	A6	247,1	258,9	11,81
6063-8 hafta T4+T6	A8	244,7	257,2	12,63

Tablo 6.2’den de görüleceği gibi 2 hafta süre boyunca zamana bağlı olarak mukavemet düşmektedir. Bu etki, 4. haftadan itibaren belirgin hale gelmektedir. Malzemenin doğal yaşlanma davranışını gösteren ısıtma işlemsiz (T4) haldeki mukavemet değerleri Tablo 6.3’te verilmiştir. Bu çalışmanın ana hedeflerinden biri olan söz konusu mukavemet düşüşünü engellemek/iyileştirmek amacıyla deney planlarına uyulacak şekilde stabilize edilen ve oda sıcaklığında bekletilen numunelere ait çekme test sonuçları Tablo 6.4, Tablo 6.5 ve Tablo 6.6’da verilmiştir.

Tablo 6.3 Malzemenin zamana bağlı T4 mukavemetleri

T4 Süresi	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
2 hafta	97,2	196,1	17,3
4 hafta	104,1	199,7	15,5
6 hafta	105,3	205,2	14,8
8 hafta	110,3	211,3	14,1

Tablo 6.4 Deney planı-1’e ait çekme test sonuçları

Stabilizasyon	Bekleme Süresi	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
100°C-1 saat	2 hafta	255,2	271,5	11,21
100°C-1,5 saat	2 hafta	257,6	274,7	10,53
100°C-2 saat	2 hafta	257,3	272,1	9,93
100°C-1 saat	4 hafta	249,1	272,0	11,39
100°C-1,5 saat	4 hafta	258,1	278,9	12,16
100°C-2 saat	4 hafta	255,9	273,9	11,38
100°C-1 saat	6 hafta	247,8	278,0	13,45
100°C-1,5 saat	6 hafta	247,9	278,2	12,06
100°C-2 saat	6 hafta	246,7	268,8	12,8
100°C-1 saat	8 hafta	260,5	276,6	11,54
100°C-1,5 saat	8 hafta	262,3	280,3	11,80
100°C-2 saat	8 hafta	258,2	274,3	10,60

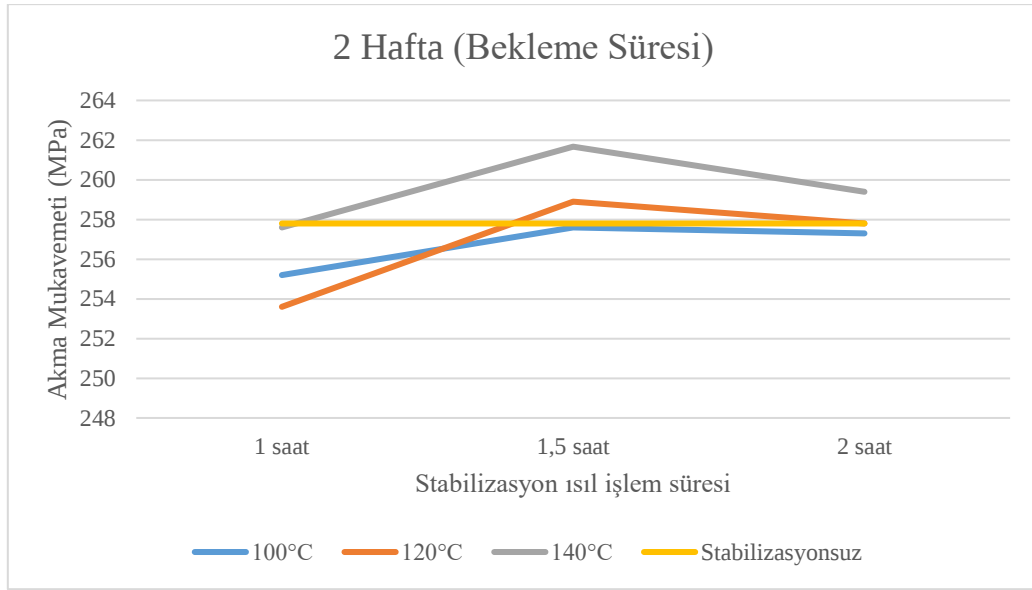
Tablo 6.5 Deney planı-2'ye ait çekme test sonuçları

Stabilizasyon	Bekleme Süresi	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
120°C-1 saat	2 hafta	253,6	271,1	10,42
120°C-1,5 saat	2 hafta	258,9	275,7	10,50
120°C-2 saat	2 hafta	257,8	266,3	12,13
120°C-1 saat	4 hafta	254,5	273,6	10,94
120°C-1,5 saat	4 hafta	261,7	276,6	11,66
120°C-2 saat	4 hafta	260,8	274,3	10,72
120°C-1 saat	6 hafta	249,6	278,02	13,37
120°C-1,5 saat	6 hafta	249	271,6	12,66
120°C-2 saat	6 hafta	247,1	276,9	11,83
120°C-1 saat	8 hafta	257,3	278,2	10,55
120°C-1,5 saat	8 hafta	264,5	281,4	10,85
120°C-2 saat	8 hafta	259,1	271,5	11,14

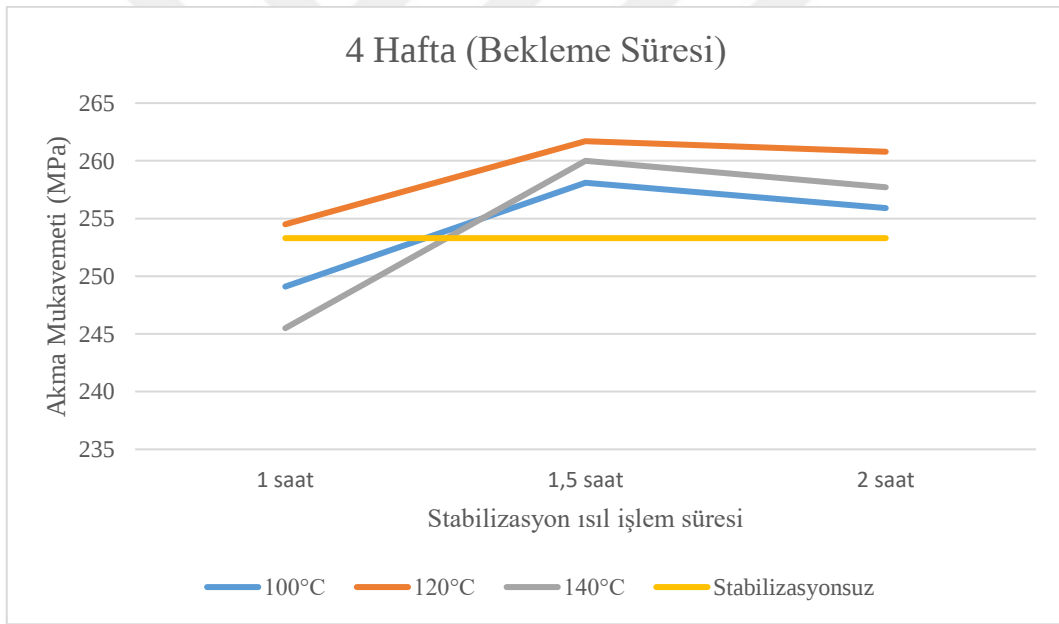
Tablo 6.6 Deney planı-3'e ait çekme test sonuçları

Stabilizasyon	Bekleme Süresi	Akma Mukavemeti (MPa)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Uzama (%)
140°C-1 saat	2 hafta	257,6	274,0	10,45
140°C-1,5 saat	2 hafta	261,67	277,8	8,57
140°C-2 saat	2 hafta	259,4	272,8	10,91
140°C-1 saat	4 hafta	245,5	263,1	11,30
140°C-1,5 saat	4 hafta	260	276,5	11,66
140°C-2 saat	4 hafta	257,7	274,9	10,91
140°C-1 saat	6 hafta	249,2	271,9	12,92
140°C-1,5 saat	6 hafta	250,3	272,6	12,70
140°C-2 saat	6 hafta	248,5	270,3	12,04
140°C-1 saat	8 hafta	255,6	273,5	10,41
140°C-1,5 saat	8 hafta	265,5	281,4	10,85
140°C-2 saat	8 hafta	262,3	280,6	11,64

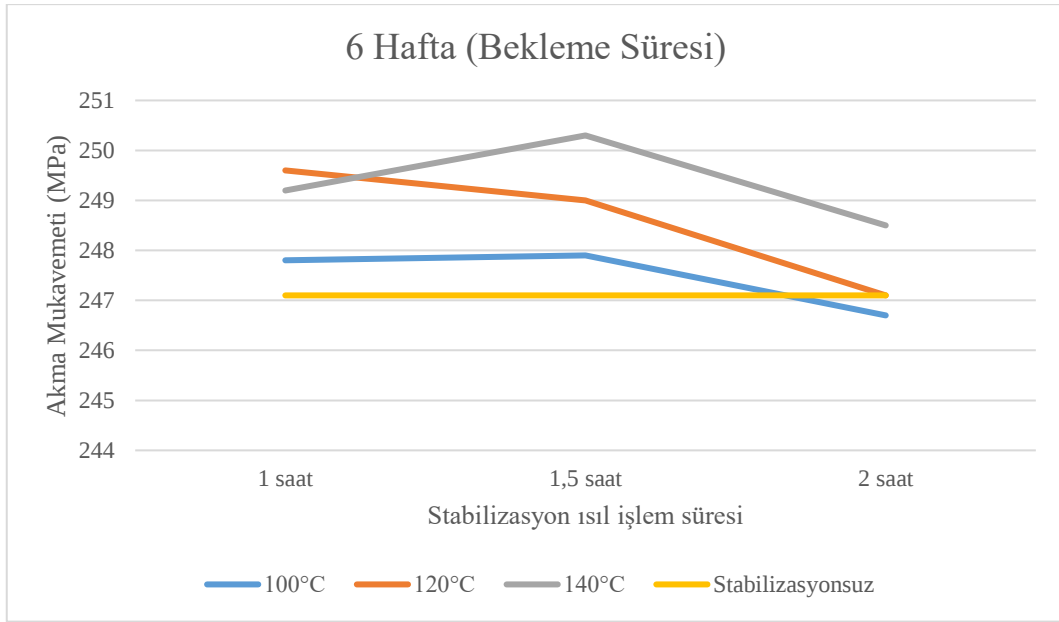
Stabilizasyon ısııl işleminin stabilizasyon sıcaklığı ve süresi ile bekleme süresine bağlı olarak değişiminin yorumlanabilmesi için stabilize edilen ve 2-4-6-8 hafta bekletilen numunelere ait elde edilen akma mukavemeti değerleri Şekil 6.1-Şekil 6.2- Şekil 6.3 ve Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



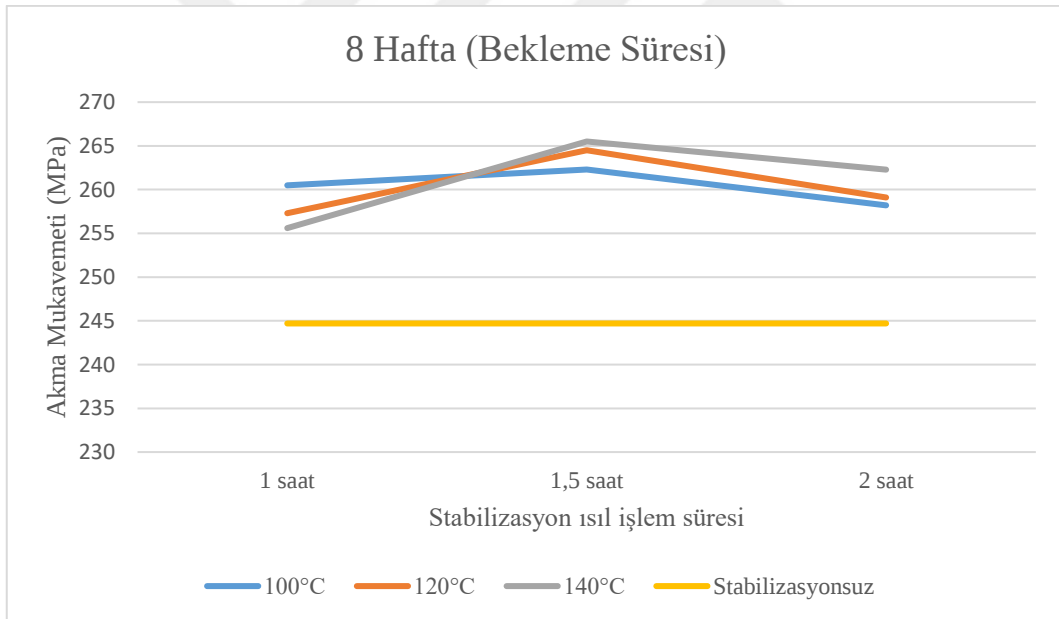
Şekil 6.1 A2 numunesi ve 1-9 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri



Şekil 6.2 A4 numunesi ve 10-18 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri



Şekil 6.3 A6 numunesi ve 19-27 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri



Şekil 6.4 A8 numunesi ve 28-36 numaralı numunelere ait akma mukavemeti değerleri

Çekme test sonuçlarına göre, 120°C ve 140°C sıcaklıklarda yapılan stabilizasyon ile maksimum akma mukavemetleri elde edilmektedir. 100°C'nin ise stabilizasyon için yeterli olmadığı görülmektedir. Stabilize edilen numunelerde akma mukavemetlerinde oluşan piklere bakıldığında 1,5 saat süre ile uygulanan stabilizasyon ısı işleminin malzemenin akma mukavemetini olumlu yönde

etkilediği ve mukavemet düşüşüne engel olduğu görülmektedir. Turuncu renkli çizgi ile gösterilen stabilize edilmemiş çekme test sonuçları ile kıyaslandığında;

- 2 haftalık numunelerde 100°C ve 1-1,5-2 saat süre ile uygulanan sıcaklığın, 120°C 1 saat ve 140°C 1 saat süre ile uygulanan sıcaklıkların mukavemete olumlu bir etkisi görülememiştir.
- 4 haftalık numunelerde 100°C ve 140°C’de 1 saat süre ile uygulanan stabilizasyonun mukavemete olumlu etkisi bulunmamaktadır.
- 6 haftalık numunelerde sadece 100°C-2 saat süre ile uygulanan stabilizasyon ısı işleminin,
- Son olarak 8 hafta bekleme süresi sonrasında ise tüm stabilizasyon ısı işlemlerinin mekanik özellikler üzerinde olumlu etkiler sağladığı görülmektedir.

Tüm çekme testi sonuçları göz önünde bulundurulduğunda, ekstrüzyon prosesinin doğası gereği sıcaklık ve süre ile mekanik özellik arasında doğru orantı kurulamamakla birlikte, yüksek akma ve çekme mukavemeti gibi mekanik özellikler için malzemelere 120°C veya 140°C sıcaklıklarda 1,5 saat süre ile stabilizasyon ısı işlemi uygulanabileceği sonucu elde edilmiştir.

6.1.2 Üç Nokta Eğme Testleri

Literatürde bükme testleri olarakta geçen üç nokta eğme testleri, malzemenin sünekliği ve deformasyon davranışı hakkında bilgi edinmede kullanılmaktadır. Stabilizasyonun etkisini görebilmek ve malzemenin plastik deformasyona karşı verdiği davranışı simüle etmek amacıyla numunelere üç nokta eğme testi uygulanmıştır. Üç nokta eğme testleri uygulanan numunelerin görüntüsü Şekil 6.5’te verilmiştir.



Şekil 6.5 Üç nokta eğme testi uygulanmış numuneler

Test sonrası elde edilen bükme numunelerinin açı ölçümleri Şekil 6.6’da gösterildiği gibi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 6.6 Üç nokta eğme testi sonrası bükme açısı ölçümü

Malzemenin doğal yaşlanma süresine bağlı olarak göstermiş olduğu üç nokta eğme test sonuçları Tablo 6.7’de verilmiştir.

Tablo 6.7 Malzemenin zamana bağlı T4 ve T6 bükme değerleri

Bekleme Süresi	Bükme açısı (°)	Kondisyon
2 hafta	126	T4 (Doğal yaşlandırılmış)
4 hafta	125	T4 (Doğal yaşlandırılmış)
6 hafta	114	T4 (Doğal yaşlandırılmış)
8 hafta	109	T4 (Doğal yaşlandırılmış)
2 hafta	87	T6 (Yapay yaşlandırılmış)
4 hafta	89	T6 (Yapay yaşlandırılmış)
6 hafta	95	T6 (Yapay yaşlandırılmış)
8 hafta	98	T6 (Yapay yaşlandırılmış)

Üç nokta eğme testlerinin sonuçlarının yorumlanmasında yüksek bükme açısı daha sünek davranışa işaret ederken, düşük bükme açısı ise daha gevrek davranışa işaret etmektedir. Deney planlarına uygun şekilde stabilizasyon ısı işlemi uygulanan numunelere ait üç nokta eğme test sonuçları Tablo 6.8, Tablo 6.9 ve Tablo 6.10’da sunulmuştur.

Tablo 6.8 Deney planı-1’e ait üç nokta eğme testi sonuçları

Stabilizasyon	Bekleme Süresi	Bükme Açısı (°)
100°C-1 saat	2 hafta	103,5
100°C-1,5 saat	2 hafta	111
100°C-2 saat	2 hafta	88
100°C-1 saat	4 hafta	101
100°C-1,5 saat	4 hafta	110
100°C-2 saat	4 hafta	100
100°C-1 saat	6 hafta	97
100°C-1,5 saat	6 hafta	100
100°C-2 saat	6 hafta	102
100°C-1 saat	8 hafta	94
100°C-1,5 saat	8 hafta	96
100°C-2 saat	8 hafta	81

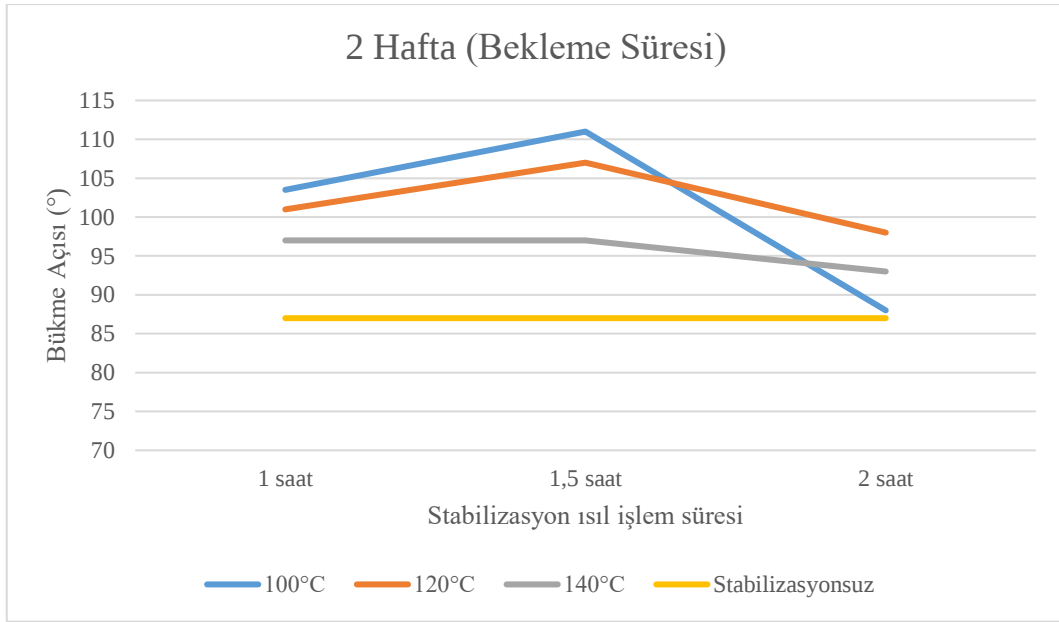
Tablo 6.9 Deney planı-2'ye ait üç nokta eğme testi sonuçları

Stabilizasyon	Bekleme Süresi	Bükme Açısı (°)
120°C-1 saat	2 hafta	101
120°C-1,5 saat	2 hafta	107
120°C-2 saat	2 hafta	98
120°C-1 saat	4 hafta	101
120°C-1,5 saat	4 hafta	106
120°C-2 saat	4 hafta	100
120°C-1 saat	6 hafta	99
120°C-1,5 saat	6 hafta	101
120°C-2 saat	6 hafta	100
120°C-1 saat	8 hafta	82
120°C-1,5 saat	8 hafta	80
120°C-2 saat	8 hafta	89

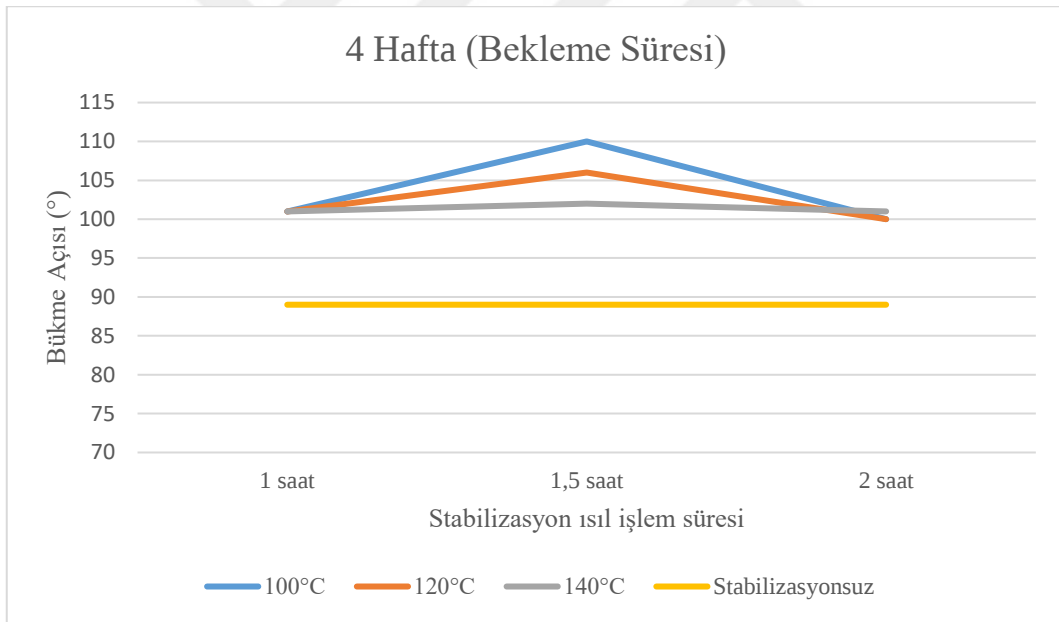
Tablo 6.10 Deney planı-3'e ait üç nokta eğme testi sonuçları

Stabilizasyon	Bekleme Süresi	Bükme Açısı (°)
140°C-1 saat	2 hafta	97
140°C-1,5 saat	2 hafta	97
140°C-2 saat	2 hafta	93
140°C-1 saat	4 hafta	101
140°C-1,5 saat	4 hafta	102
140°C-2 saat	4 hafta	101
140°C-1 saat	6 hafta	97
140°C-1,5 saat	6 hafta	102
140°C-2 saat	6 hafta	87
140°C-1 saat	8 hafta	98
140°C-1,5 saat	8 hafta	83
140°C-2 saat	8 hafta	96

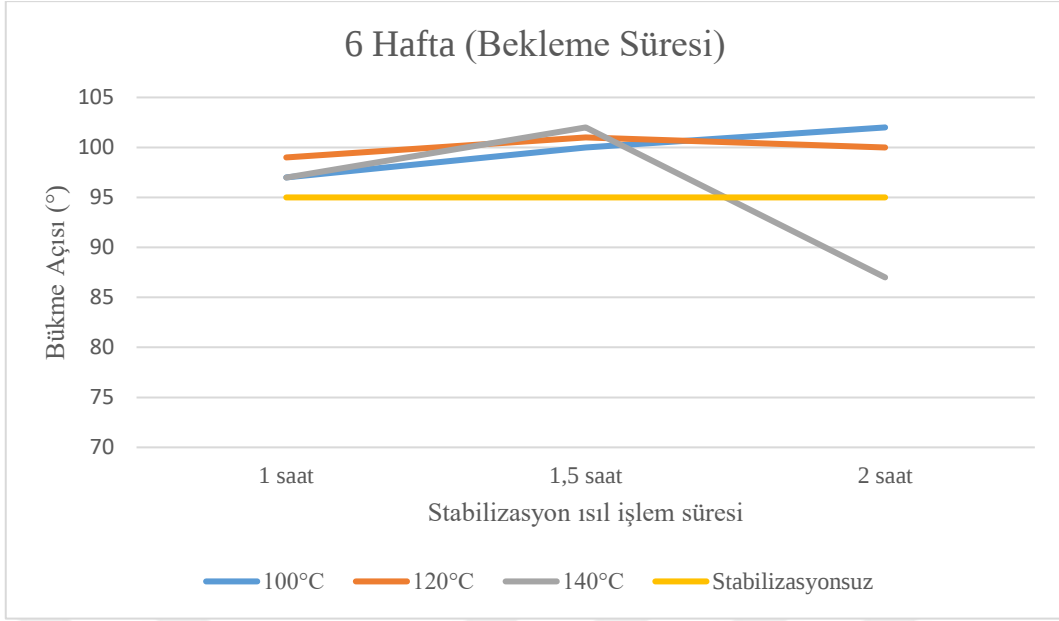
Stabilizasyon ısı işlemi stabilizasyon sıcaklığı, süresi ve bekleme süresine bağlı olarak değişiminin yorumlanabilmesi adına stabilize edilen ve 2-4-6-8 hafta bekletilen numunelere ait elde edilen üç nokta eğme testi sonuçları Şekil 6.7-Şekil 6.8- Şekil 6.9 ve Şekil 6.10'da gösterilmiştir.



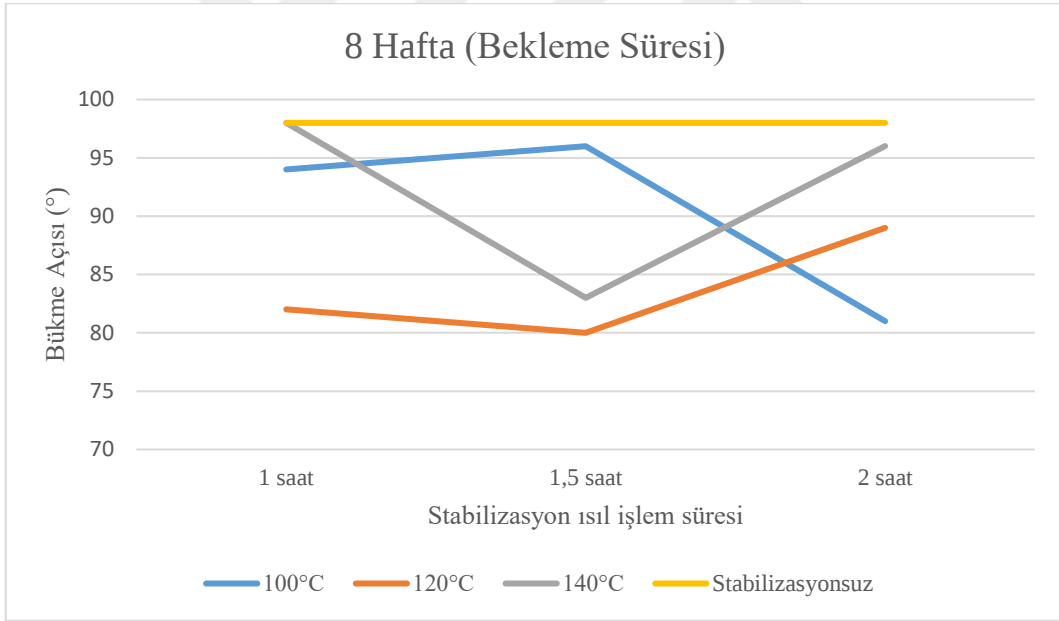
Şekil 6.7 A2 numunesi ve 1-9 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları



Şekil 6.8 A4 numunesi ve 10-18 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları



Şekil 6.9 A6 numunesi ve 19-27 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları



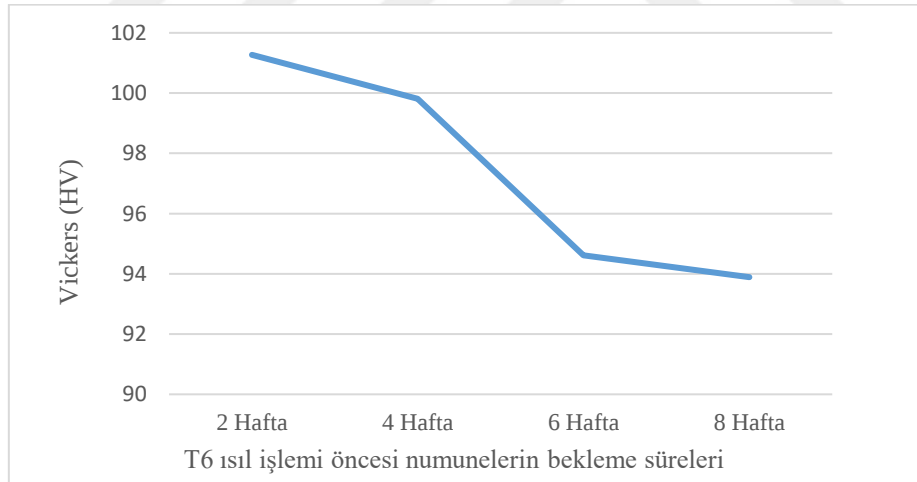
Şekil 6.10 A8 numunesi ve 28-36 numaralı numunelere ait üç nokta eğme testi sonuçları

Turuncu ile gösterilen stabilize edilmemiş üç nokta eğme testi sonuçlarına göre;

- 2 hafta sonrası sonuçlara bakıldığında, bükme açılarının stabilize edilmiş numunelerde daha yüksek olduğu görülmektedir. Önceden de belirtildiği üzere yüksek açı daha sünek malzeme davranışını göstermektedir.
- 4 hafta sonrası sonuçlarda, stabilize edilmiş numunelerde bükme açılarının yüksek olması, sünek bükme davranışının devam ettiğini göstermektedir.
- 6 hafta sonrası sonuçlarında 140°C-2 saat'lik numunede düşük açı görülse de, diğer tüm numunelerde sünek bükme davranışı devam etmektedir.
- 8. hafta sonrası numunelerde ise stabilize edilmemiş durumda mekanik özelliklerdeki düşüş nedeniyle bükme açılarının yükseldiği görülmektedir. Diğer tüm numunelerde ise mekanik özelliklerin korunmasından dolayı stabilize edilmeyen numuneye göre daha düşük bükme açıları elde edilmiştir.

6.1.3 Mikrosertlik Testleri

Stabilize edilmemiş numunelere ait mikro sertlik testleri her bir numuneden 5 farklı ölçüm alınmak suretiyle karakterize edilmiş ve Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6.11 Stabilizasyon uygulanmamış numunelere ait mikrosertlik değerleri

Şekil 6.11'de görüldüğü üzere, doğal yaşlanma süresi arttıkça mikrosertlik değerleri düşmektedir. 4.hafta itibari ile doğal yaşlanmanın olumsuz etkisi belirginleşmektedir. Stabilizasyonun etkisini görebilmek için deney planına göre stabilize edilen numuneler arasından en yüksek ve en düşük mekanik özelliklere (Maksimum Akma, Minimum Akma ve Maksimum Uzama, Minimum Uzama)

sahip numuneler referans alınarak elde edilmiş sertlik ölçümleri ve stabilizasyonsuz numunelere ait sertlik değerleri Tablo 6.11’de verilmiştir.

Tablo 6.11 Stabilize edilmiş ve edilmemiş numunelere ait mikrosertlik değerleri

Numune Kodu	Stabilizasyon kondisyonu	Sertlik (Vickers)
A2	Stabilizasyon yok	101,27
A4	Stabilizasyon yok	99,81
A6	Stabilizasyon yok	94,62
A8	Stabilizasyon yok	93,89
Maksimum Akma	140°C-1,5 saat-8 hafta	107,8
Minimum Akma	140°C-1 saat-4 hafta	100,6
Maksimum Uzama	100°C-1 saat-6 hafta	101,7
Minimum Uzama	140°C-1,5 saat-2 hafta	103,3

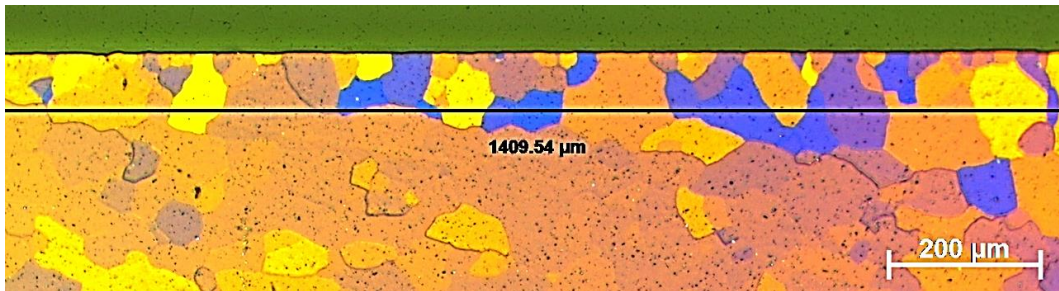
Tablo 6.11’deki verilere göre stabilizasyonsuz numunelerde doğal yaşlanma süresine bağlı olarak sertlik değerlerinde düşüş yaşanmaktadır. Stabilize edilen numunelerde ise en düşük akma mukavemeti elde edilen kondisyonda dahi bu değer, stabilizasyonsuz 4 hafta doğal yaşlanma sonrası T6 ısıtıl işlemi uygulanan numuneye göre daha fazladır. Bu sebeple stabilizasyon ısıtıl işleminin özellikle 4. haftadan sonra sertlik düşüşünde iyileştirme sağladığı görülebilmektedir.

6.2 Mikroyapı İncelemeleri

Mekanik özelliklerin karakterizasyonundan sonra malzemenin mikro yapısı ile ilgili karakterizasyon çalışmaları optik mikroskop ve taramalı elektron mikroskobu kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

6.2.1 Tane Boyut Analizleri

Bölüm 5’te verilen üretim parametrelerine göre üretilmiş 6063 alaşımlı profil kesitinden alınan numune dağlanmış ve optik mikroskopta polarize ışık altında incelenmiştir, (Şekil 6.12).

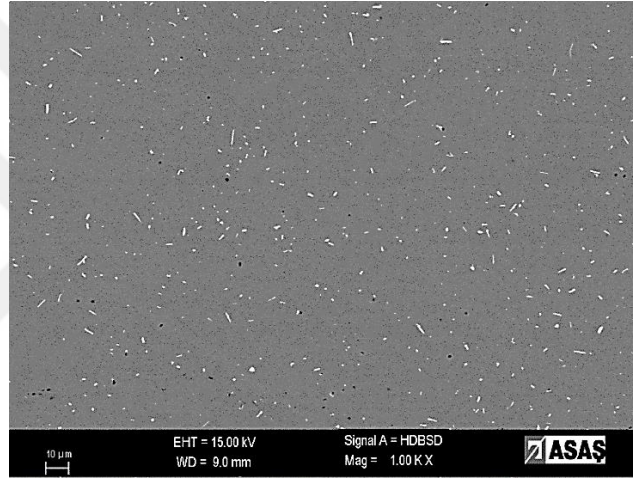


Şekil 6.12 6063 alaşımlı profil mikroyapısı (100x)

Numune yüzeyinde yer alan çizgi üzerindeki taneler DIN EN ISO 643 standardına (doğrusal kesiştirme metodu) uygun olarak sayıldığında 1409 μm 'lik çizgi uzunluğunda 19 adet tane bulunduğu görülmüştür. Dolayısıyla ortalama tane boyutu $1409/19=74 \mu\text{m}$ olarak hesaplanmıştır.

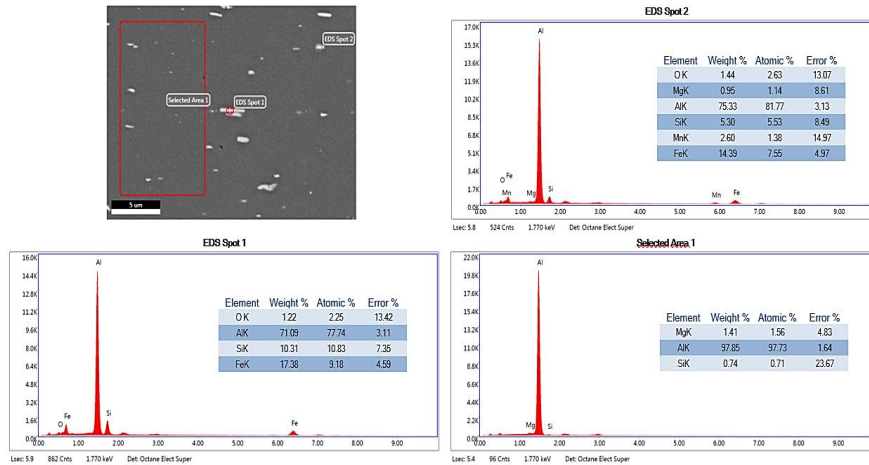
6.2.2 Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dağılım Spektrometresi (EDS) Analizleri

6063 profil numunesinden alınan kesit görüntüleri SEM'de incelenmiş ve görüntü Şekil 6.13'te verilmiştir. Profil yapısı incelendiğinde matris içerisinde homojen dağılmış intermetalik fazlar görülmektedir. Bu da homojenizasyon ısı işleminin ve ekstrüzyonun kalitesinin iyi olduğuna işaret etmektedir.



Şekil 6.13 6063 alaşımlı alüminyum profil mikroyapısı (1000x)

Fazların elementel analizlerini karakterize edebilmek amacıyla gerçekleştirilen EDS analizleri de Şekil 6.14'te verilmiştir.

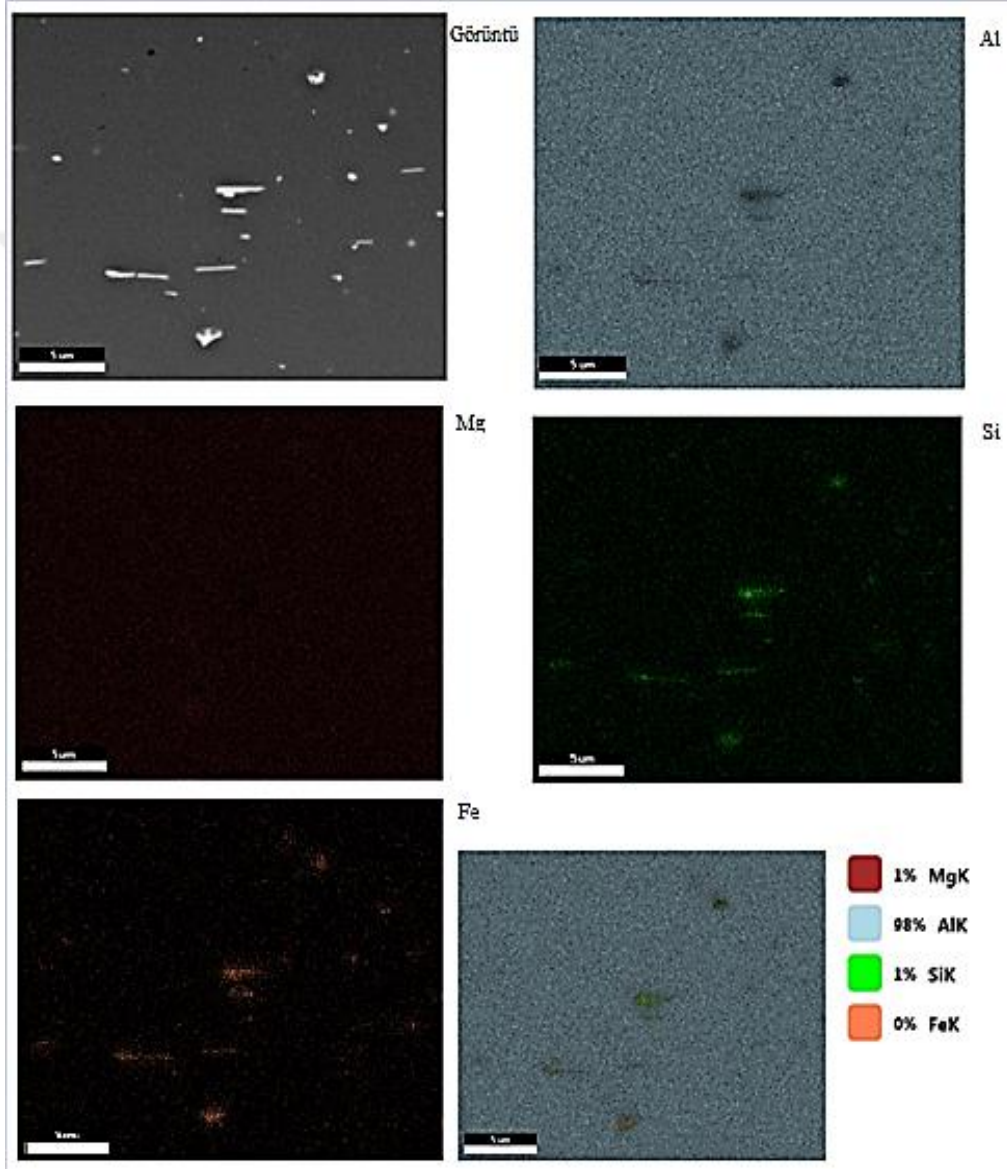


Şekil 6.14 6063 alüminyum alaşımı numunesinin EDS analizi (5000x)

İnceleme sonucunda 6xxx serisine ait Al-Mg-Si matris yapısı ile yapı içerisinde oluşan Al-Fe-Si ve Al-Mn-Fe-Si intermetalik fazları gözlenmiştir (Şekil 6.14).

6.2.3 EDS Haritalama (EDS Mapping)

6063 alaşımında bulunan ana alaşım elementlerinin dağılımını karakterize edebilmek için Şekil 6.15'te sunulmuş olan EDS haritalama analizi gerçekleştirilmiştir.

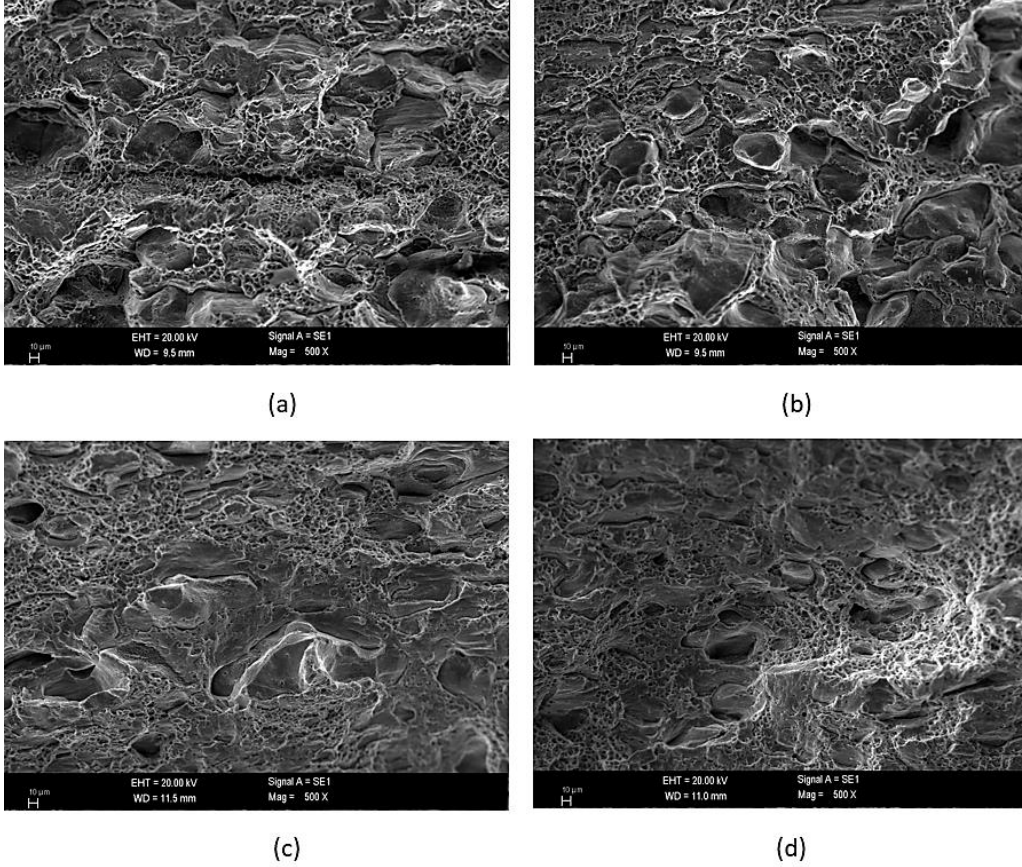


Şekil 6.15 6063 alaşımlı alüminyum profil EDS haritalama (5000x)

Elementel analiz sonuçları, alüminyum matrisi içerisinde Mg, Si ve Fe gibi alaşım elementlerinin dağılımını göstermektedir. Mg elementi yapıda homojen olarak dağılım gösterirken, Si ve Fe elementlerinin daha çok intermetalik fazların içerisinde yer aldığı görülmektedir.

6.2.4 Kırılma Yüzeyi Analizleri

Her ne kadar T6 (yapay yaşılandırılmış) kondisyonunda alüminyum benzer kırılma davranışı gösterse de, mekanik test sonuçlarına ve mikroyapı analizlerine ilave olarak çekme testlerinde kullanılan numunelerin kırılma yüzeylerinden kırılma yüzeyi analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.16).



Şekil 6.16 (a) Maksimum uzama (b) minimum uzama (c) maksimum akma (d) minimum akma özelliğine sahip numunelerin kırılmış yüzey analizleri

Şekil 6.16 incelendiğinde, tüm malzemelerin sünek kırılma davranışına sahip olduğu görülmüştür. Maksimum akma dayanımı Şekil 6.16 (c) gösteren numunede gamzelerin sayısının ve frekansının kırılma bölgesinde diğer numunelere göre nispeten daha az olduğu görülmektedir. Bu da daha az sünek kırılma davranışına işaret etmektedir.

Sunulan tez çalışmasının amacı; 6063 alüminyum alaşımı için uzun doğal yaşlanma (T4) süreleri sonunda istenen özellikleri sağlayan yapay yaşlandırma (T6) ısıtma işlemi reçetesi geliştirilmesi ve malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesidir. Malzemenin doğal ve yapay yaşlandırılması arasında geçen sürenin artışına bağlı olarak mukavemet kayıpları meydana gelmektedir. Meydana gelen bu mukavemet kaybını önleyebilmek için malzeme üretiminden sonra ve doğal yaşlanma öncesi, çeşitli sıcaklıklarda (100°C-120°C-140°C) ve sürelerde (1-1,5-2 saat) stabilizasyon ısıtma işlemi uygulanarak çökelti oluşum mekanizmasının iyileştirilmesi hedeflenmiştir.

Hedeflenen ısıtma işlemlerin uygulanmasının ardından malzemeler belirli periyotlarda bekletilerek nihai yapay yaşlandırma ısıtma işlemi uygulanmış, akma ve çekme mukavemeti, sertlik gibi mekanik özellikler yanında mikroyapı analizi de gerçekleştirilmiştir.

Farklı süre ve sıcaklıklarda stabilize edilen 6063 alaşımının karakterizasyon verileri değerlendirilmiş ve aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

1. Stabilizasyon ısıtma işleminin farklı sıcaklık ve sürelerde uygulanması, mekanik özellikleri doğrudan etkilemektedir.
2. İki hafta doğal yaşlanma süresinde stabilize edilmiş ve stabilize edilmemiş numunelerin her ikisinde de malzemenin mekanik özelliklerinde çok fazla düşüş olmadığı görülmüştür. İki hafta bekleme süresi sonunda stabilize edilmemiş durumdaki numunenin akma mukavemeti 257,8 MPa, stabilize edilmiş durumdaki numunenin ise en yüksek akma mukavemeti 261,67 MPa olarak ölçülmüştür.
3. Stabilize edilmeden dört hafta bekletilmiş numunede mukavemet kaybı, farklı sıcaklıklarda 1,5 saat stabilize edilmiş numunelere göre daha yüksek olmuştur (Şekil 6.2). Dördüncü haftadan sonra ise mekanik özelliklerdeki kayıp azalarak devam etmiştir (Şekil 6.3 ve Şekil 6.4).

4. Elde edilen en yüksek akma mukavemeti; stabilizasyon sıcaklığı 140°C ve süresi 1,5 saat olan, sekiz hafta bekletilmiş ve yapay yaşlandırılmış 35 numaralı numunede görülmüş olup, akma mukavemeti 265,5 MPa, çekme mukavemeti 281,4 MPa ve uzama değerleri %10,85 şeklinde elde edilmiştir.
5. Stabilizasyon ısıt işlemleri arasında en yüksek akma dayanımı değerlerinin; 120°C-140°C sıcaklık ve 1-1,5 saat aralığında uygulanan ısıt işlemlerle elde edildiği belirlenmiştir (Şekil 6.1-Şekil 6.4).
6. Sekiz hafta bekleme süresi sonunda tüm stabilizasyon sıcaklık ve sürelerinde uygulanan ısıt işlem koşullarında elde edilen numunelerin, stabilize edilmemiş numunelere göre daha yüksek mekanik mukavemet değerleri gösterdiği belirlenmiştir. Sekiz hafta sonunda, stabilize edilmeyen numuneye kıyasla yaklaşık %8,1 oranında akma mukavemeti artışı olmuştur (Şekil 6.4).
7. Malzemenin sünekliliği hakkında bilgi veren bükme test sonuçları değerlendirildiğinde ise, stabilize edilmiş ve 2, 4, 6 hafta boyunca bekletilmiş numunelerin akma ve çekme mukavemet değerlerinin yüksek olduğu, ancak bükme davranışlarının standart değerler içerisinde kalmasına rağmen genel olarak stabilize edilmemiş numunelerden daha yüksek açığı gösterdiği belirlenmiştir (Şekil 6.7-Şekil 6.10).
8. Artan bekletme süreleri ile mukavemet düşüşü oluşmasına karşın, malzemenin üç nokta eğme davranışında iyileşme meydana geldiği gözlenmiştir. Bu nedenle, sekiz hafta sonunda stabilize edilmemiş numunelere ait mekanik özelliklerdeki düşüşün maksimum değerde olmasına karşın, üç nokta eğme açılarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir (Tablo 6.2 ve Tablo 6.7).
9. Mikrosertlik sonuçları, malzemenin doğal yaşlanma süresi arttıkça akma ve çekme dayanımına paralel olarak sertlik değerlerinde düşüşün oluştuğunu göstermiştir (Şekil 6.11).
10. Mikroyapı incelemeleri, 6063 alaşımının uygun kimyasal bileşime sahip olduğunu ve intermetalik fazların yapı içerisinde homojen olarak dağıldığını göstermiştir (Şekil 6.13).
11. Kırılmış yüzey analizleri incelendiğinde; tüm numunelerin sünek davranış gösterdiği belirlenmiş, maksimum akma dayanımına sahip numunede nispeten daha az sünek kırılma davranışı gözlenmiştir (Şekil 6.16).

Tez çalışması kapsamında elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve gelecek çalışmalara ait oluşturulan öngörüler aşağıda sunulmuştur:

1. Benzer çalışmalar, farklı 6xxx serisi alaşımlar ve diğer alüminyum alaşımları için de gerçekleştirilebilir.
2. Farklı kompozisyonlara ve Mg/Si oranlarına sahip 6063 alaşımlarının stabilizasyon davranışları incelenebilir.
3. Stabilizasyon ısı işlemine ait sıcaklık ve süreler değiştirilerek malzemenin mekanik özelliklerindeki değişimler daha ayrıntılı görülebilir.
4. Farklı doğal yaşlanma süreleri ve koşullarında çalışmalar gerçekleştirilerek malzemenin doğal yaşlanma davranışları incelenebilir.
5. Tez çalışması kapsamında 6xxx alüminyum alaşımı için elde edilen tüm veriler değerlendirilerek, mekanik özellikleri optimize edecek ısı işlem reçetesi oluşturulabilir. Böylece, aynı alaşım farklı ısı işlem koşullarına tabi tutularak yüksek akma ve çekme dayanımına sahip veya yüksek sünekliliğe sahip malzeme elde edilmesi mümkün olabilir.

- [1] Österreicher, J. A., Kirov, G., Gerstl, S. S., Mukeli, E., Grabner, F., & Kumar, M. (2018). Stabilization of 7xxx aluminium alloys. *Journal of alloys and compounds*, 740, 167-173, doi: 10.1016/j.jallcom.2018.01.003.
- [2] Morrison, G. K. (2013). The effect of stabilization heat treatment on AA5182 aluminium alloy (Master's thesis). University of Cape Town.
- [3] Ou, B. L., & Shen, C. H. (2004). Effect of preaging on precipitation behavior in aluminum alloy 6063 during high-temperature aging. *Scandinavian journal of metallurgy*, 33(2), 105-112, doi: /10.1111/j.1600-0692.2004.00674.x.
- [4] Li, Y., Gao, G., Wang, Z., Di, H., Li, J., & Xu, G. (2018). Effects of the Mg/Si Ratio on microstructure, mechanical properties, and precipitation behavior of Al-Mg-Si-1.0 wt%-Zn alloys. *Materials*, 11(12), 2591, doi: /10.3390/ma11122591.
- [5] ASM Metals Handbook. (1990). Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys. USA: ASM International, doi: /0.31399/asm.hb.mhde2.a0003153.
- [6] Deschamps, A., Dumont, D., Bréchet, Y., Sigli, C., & Dubost, B. (2001). Process modeling of age-hardening aluminum alloys: from microstructure evolution to mechanical and fracture properties. In M. Tiyakioglu, & M. Tiyakioglu (Eds.), *Advances in the Metallurgy of Aluminum Alloys* (pp. 298-305). (Advances in the Metallurgy of Aluminum Alloys).
- [7] Johnson, T. (2021). From Earth to Tower: The Materialist Philosophy of Twentieth-Century Aluminum Producers.
- [8] Dyvik, S. H., Manum, B., Mork, J. H., & Luczkowski, M. (2019). Structural aluminum in architecture-The history and future of aluminum as a structural material. *Structures and Architecture: Bridging the Gap and Crossing Borders*, 1st ed.; Cruz, PJS, Ed.
- [9] Runge, J. M., & Runge, J. M. (2018). A Brief History of Aluminum and Its Alloys. *The Metallurgy of Anodizing Aluminum: Connecting Science to Practice*, 1-63, doi: /10.1007/978-3-319-72177-4_1.

- [10] Ashkenazi, D. (2019). How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. *Technological Forecasting and Social Change*, 143, 101-113, doi: /10.1016/j.techfore.2019.03.011.
- [11] Keleş, Ö. (2021). Alüminyumun Serüveni, İTÜ Vakfı yayınları, 224.
- [12] ASM Handbook Volume 2, (1992), Properties and Selection: Nonferrous alloys and special purpose materials.
- [13] Ölmez, S. (2016). Alüminyum esaslı alaşımların yüksek sıcaklıkta aşınma davranışlarının incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [14] Asa, S. (2010). AA-6061 işlem alaşımının homojenizasyon prosesinin ekstrüzyon kabiliyetine etkisi (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [15] Burgucu, S. (2011). 7075 alüminyum alaşımlarının üretimi ve karakterizasyonu (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [16] Miracle, D.B. Donaldson, S.L. Henry, S.D. Moosbrugger, C. Anton, G.J. Sanders, B.R. Hrivnak, N. Terman, C. Kinson, J. ve Muldoon, K., (2001). ASM Handbook, ASM International Materials Park, OH, USA.
- [17] R. S. Rana, R. Purohit, and S. Das, (2012). “Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites,” *Int. J. Sci. Res. Publ.*, vol. 2, no. 6, pp.1-7, ISSN: 2250-3153.
- [18] J. Brown, (1999). *Foseco non-ferrous foundryman's handbook*: Butterworth-Heinemann.
- [19] Kart, O. (2022). Alüminyum-silisyum-demir alaşımlarında zirkonyum ilavesinin yeniden kristalleşme mekanizması üzerindeki etkileri (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [20] Çodur, Y. (2022). Yaşlandırma uygulanmış 6063-T6 alüminyum alaşımlarının frezeleme işleminde kesme parametrelerinin form hatalarına ve yüzey pürüzlülüğüne etkisi (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Karabük.
- [21] Açıci, N. (2018). A356 ve A380 alaşımlarının eğimli soğutucu ile dökümü ve yarı katı dövme işlemi (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [22] Dinçer, M. (2022). 6063 Serisi alüminyum alaşımlarında alaşım ve flaks kombinasyonuna bağlı cüruf içeriğinin yapısal ve elementel analizi (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [23] TS_EN_573_3 Alüminyum ve alüminyum alaşımları - Kimyasal bileşim ve biçimlendirilebilir ürünlerin şekli - Bölüm 3: Kimyasal bileşim ve ürünlerin şekli.
- [24] Kuijpers N.C.W., Kool W.H., Koenis P.T.G., Nilsen K.E., Todd I., ve van der Zwaag S., (2003). “Assessment of Different Techniques for Quantification of α -Al(FeMn)Si and β -AlFeSi Intermetallics in AA 6xxx Alloys”, Materials Characterization, 49: 409-420, doi: /10.1016/S1044-5803(03)00036-6.
- [25] Yaşa, S. (2018). Alüminyum A356 alaşımlarının titreşimli dökümü (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [26] Chen, C. C., “The Aluminum Production Process”, Técnico Lisboa, 2-12.
- [27] Kırsavaş, Ç. (2021). Farklı yapay yaşlandırma sürelerinin 6XXX serisi alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerine etkisi (Yüksek lisans tezi). Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tekirdağ.
- [28] Koçak, M. (2009). Hurda alüminyum safsızlıklarının hurda hazırlama ve izabe işlemleri ile giderilmesi yollarının araştırılması (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [29] Kvande, H. (2011). “Production of primary aluminium”, Fundamentals of Aluminium Metallurgy Production, Processing and Applications 1st ed., Lumbey, R., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 49-51, doi: /10.1533/9780857090256.1.49.

- [30] <https://news.alcoa.com/media-center/alcoa-in-the-headlines/alcoa-in-the-headlines-details/2021/ELYSIS-Additional-20-million-in-federal-funding/default.aspx>, (10.10.2023).
- [31] <https://www.greencarcongress.com/2021/04/20210421-riotinto.html>, (18.10.2023).
- [32] Beheshti, R. (2017). Sustainable Aluminum and Iron Production (Doctoral Thesis). School of Chemical Science and Engineering KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, 7-20, ISBN: 978-91-7729-214-2.
- [33] Karpat, F. (2021). Şase yorulma beşiği parçalarından olan motor beşiğinin alüminyum ekstrüzyon metodu ile tasarımı ve kaynak edilmesinin incelenmesi (Yüksek lisans tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- [34] Al-jabbouli, H., Koç, E., and Akça, Y., (2015). “Classification of Main Faults in the Production Process of Extruded Aluminium Profiles Classification of Main Faults in the Production Process of Extruded Aluminium Profiles”, IJET, 7: 84-90, ISSN: 0975-4024.
- [35] Kalkan, H. (2011). A combined experimental-numerical investigation on aluminium extrusion (Master thesis). ATILIM University, Ankara.
- [36] Karabay, S., Zeren, M., and Yılmaz, M., (2003), “Investigation of Ekstrusion Ratio Effect on Mechanical Behaviour of Extruded Alloy AA6063“, Journal of Mechanical Procesing Technology, 135:101-108, doi: /10.1016/j.jmatprotec.2004.05.025.
- [37] Akça, Y. (2017). Alüminyumun ekstrüzyonunda kullanılan sıcak iş takım çeliğinin bor-nitrür ile kaplanması (Yüksek lisans tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [38] Başaran, D. (2010). Alüminyum ekstrüzyonunda fireyi azaltacak kalıp tasarımı (Yüksek lisans tezi). Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [39] İncel, E. (2016). Deney tasarımı ve yapay sinir ağları yöntemleriyle alüminyum ekstrüzyon prosesinin iyileştirilmesi (Yüksek lisans tezi). Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Balıkesir.

- [40] Prabhu, R., Ganapathy, T., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2011). Process parameters optimization on porthole-die hot extrusion of aluminium alloy tubes using Taguchi method. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 6(1), 102-108.
- [41] Saha, P.K., (2000), *Aluminum Extrusion Technology*, ASM International, Ohio, ISBN: 978-0-87170-644-7.
- [42] M. Divandari, and J. Campbell. (2013). "Oxide film characteristics of Al-7Si-Mg alloy in dynamic conditions in casting," *Int. J. Cast Met. Res.*, vol. 17, no. 3, pp. 182–187, doi: /10.1179/136404604225017546.
- [43] Altenpohl D. (1982) *Aluminium Viewed from Within an Introduction Into the Metallurgy of Aluminium Fabrication*, 225, Dusseldorf, Germany, ISBN: 3870171383.
- [44] Grandfield, J.F. (2011). Ingot casting and Casthouse metallurgy of aluminium and its alloys. *Fundamentals of Aluminium Metallurgy*, 83–140, doi: /10.1533/9780857090256.1.83.
- [45] Saha, P.K. (2005). *Alüminyum Ekstrüzyon Teknolojisi* (E. Keleşoğlu ve Y. Erarslan, Çev.). İstanbul, 254.
- [46] Ilgaz, O. (2014). *Döküm, Ekstrüzyon ve Dövme İşlemlerinin 6082 Alaşımılı Dövme Süspansiyon Parçalarında Mikroyapı ve Mekanik Özelliklerine Etkisi*. (Yüksek lisans tezi). Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya.
- [47] Fan X., Jiang D., Meng Q., Zhang B., Wang T. (2006). Evolution of Eutectic Structures in Al-Zn-Mg-Cu Alloys During Heat Treatment, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 16, 577-581, doi: /10.1016/S1003-6326(06)60101-5.
- [48] Turbalıoğlu, K. (2008). *6063 Alüminyum alaşıımının düşey sürekli döküm yönteminde üretim parametrelerinin geliştirilmesi* (Yüksek lisans tezi). Karabük Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

- [49] Claves, S.R., Elias, D.L. ve Misiolek, W.Z. (2002), “Analysis Of The Intermetallic Transformation Occuring During Homogenization of 6xxx Aluminum Alloys”, Materials Science Forum, Vol 396-402, pp 667-674, doi: /10.4028/www.scientific.net/MSF.396-402.667.
- [50] Dixon, B. (2000). Extrusion of 2xxx and 7xxx alloys, ET '2000. Proceedings of the 7th International Aluminium Extrusion Technology Seminar, (pp.281-294). Chicago, USA.
- [51] Pernick, J. (1978). Aluminum Anodizing. In S. D. Cramer, B. S. Covino (Eds.), ASM Handbook: Corrosion (vol. 13, pp.895-917). Washington, USA.
- [52] Al-Saadi, H. I. A., & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(3), 525-532, doi: /10.21923/jesd.287005.
- [53] Rashed, H.M.M.A., and Rashid, A.K.M.B. (2016). “Heat treatment of aluminum alloys”, Compherensive Material Finishing Volume 2, Elsevie Inc., Dhaka, 341-369.
- [54] ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating, (1991). “Heat treating of aluminum alloys”, ASM International, Ohio, 841-879.
- [55] Prach, O., Hornik, J., and Mykhalekov, K. (2015). “Effect of the addition of Li on the structure and mechanical properties of hypoeutectic Al-Mg₂Si alloys”, Acta Polytechnica, 55 (4): 253-259, doi: /10.14311/AP.2015.55.0253.
- [56] Erdoğan M. (1996). Al-Li-Cu-Mg Alaşımlarında yaşlandırma mekanizması ve ısıt işlemleri. (Yüksek lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 140.
- [57] Mackenzi D. S. (2016). Quenching of Aluminum Alloys, Editors: Totten G. E., Mackenzi D. S., Heat Treating of Nonferrous Alloys, ASM Handbook, Volume 4E, Ohio, USA, 145-672.
- [58] Yüksel, B. (2017). 6063 alüminyum alaşımının sertliği ve taneler arası korozyonu üzerine suni yaşlandırmanın etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(4), 395-398, doi: /10.5505/pajes.2016.05658.

- [59] Rochet, C., Véron, M., Rauch, E. F., Lowe, T. C., Arfaei, B., Laurino, A., ... & Blanc, C. (2020). Influence of equal-channel angular pressing on the microstructure and corrosion behaviour of a 6xxx aluminium alloy for automotive conductors. *Corrosion Science*, 166, 108453, doi: /10.1016/j.corsci.2020.108453.
- [60] Ma K., Wen H., Hu Tao, Topping T. D., Isheim D., Seidman D. N., Lavernia E. J., Schoenung J. M. (2014). *Acta Materialia*, 62, 141-155, doi: /10.1016/j.actamat.2013.09.042.
- [61] Yang R., Liu Z., Ying P., Li J., Lin L., Zeng S. (2016). Multistage Aging Process Effect on Formation of GP Zones and Mechanical Properties in Al-Zn-Mg-Cu Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 26, 1183-1190, doi: /10.1016/S1003-6326(16)64221-8.
- [62] Koç, F.G. (2019). AA7075 Alüminyum alaşımına ısıtıl işlem parametrelerinin endüstriyel koşullarda optimizasyonu (Doktora tezi). Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.
- [63] J. Banhart, C. Chang, Z. Liang, N. Wanderka, M. Lay, A. Hill. (2010). *Advanced Engineering Materials* 12, 559–571, doi: /10.1002/adem.201000041.
- [64] Werinos, M. (2016). Mechanisms controlling natural aging and its effect on artificial aging in Al-Mg-Si alloys with and without trace element additions. (Doctoral thesis). Montan Leoben University, Austria.
- [65] Poznak, A., Thole, V., & Sanders, P. (2018). The natural aging effect on hardenability in Al-Mg-Si: A complex interaction between composition and heat treatment parameters. *Metals*, 8(5), 309, doi: /10.3390/met8050309.
- [66] P. Dumitraschkewitz, S.S.A. Gerstl, P.J. Uggowitzer, J.F. Löffler, S. Pogatscher. (2017). Atom probe tomography study of as-quenched Al-Mg-Si alloys, *Adv. Eng. Mater.* 1-5, doi: /10.1002/adem.201600668.
- [67] Kovacs, L.J., and Nagy, E. (1972). *Acta Metallurgica*, 20: 975–983.
- [68] Kang, S.B., Zhen, L., Kim, H.W., and Lee, S.T. (1996). *Mater Sci Forum* 217–222: 827–832, doi: /10.4028/www.scientific.net/MSF.217-222.827.
- [69] Dorward RC. *Metallurgical Trans* (1973):4: 507–512.

- [70] Pashley, D.W., Rhodes, J.W., and Sendorek, A. (1966). *J Inst Met*, 94:41–49.
- [71] Van Huis, M.A., Chen, J.H., Sluiter, M.H.F., and Zandbergen, H.W. (2007). Phase stability and structural features of matrix-embedded hardening precipitates in Al–Mg–Si alloys in the early stages of evolution *Acta Mater.* 55 2183–99, doi: /10.1016/j.actamat.2006.11.019.
- [72] Ding, X.P., Cui, H., Zhang, J.X., Li, H.X., Guo, M.X., Lin, Z., Zhuang, L.Z., and Zhang, J.S. (2015). The effect of Zn on the age hardening response in an Al–Mg–Si alloy. *Mater. Des.* 65, 1229–1235, doi: /10.1016/j.matdes.2014.09.086.
- [73] Alvarez-Antolin, F., Asensio-Lozano, J., Cofiño-Villar, A., & Gonzalez-Pociño, A. (2020). Analysis of Different Solution Treatments in the Transformation of β -AlFeSi Particles into α -(FeMn) Si and Their Influence on Different Ageing Treatments in Al–Mg–Si Alloys. *Metals*, 10(5), 620, doi: /10.3390/met10050620.
- [74] Xu, X., Yang, Z., Ye, Y., Wang, G., and He, X. (2016). Effects of various Mg/Si ratios on microstructure and performance property of Al–Mg–Si alloy cables *Mater. Charact.* 119 114–9, doi: /10.1016/j.matchar.2016.07.011.
- [75] Ding, L., Jia, Z., Zhang, Z., Sanders, R.E., Liu, Q., and Yang, G. (2015). The natural aging and precipitation hardening behaviour of Al–Mg–Si–Cu alloys with different Mg/Si ratios and Cu additions *Materials Science and Engineering: A* 627 119–26, doi: /10.1016/j.msea.2014.12.086.
- [76] Osuch, P., Walkowicz, M., Knych, T., and Dymek, S. (2018). Impact of the Direct Ageing Procedure on the Age Hardening Response of Al–Mg–Si 6101 Alloy. *Materials*, 11, 1239, doi: /10.3390/ma11071239.

TEZDEN ÜRETİLMİŞ YAYINLAR

Konferans Bildirileri

1. Çankaya, E., Hazar, A.B., Güner, M.B., Akın, B., and Özdemir, A.U., “6063 Alüminyum Profillere Ön Isıl İşlem Uygulamasının Yapay ve Doğal Yaşlanma Mekanizmasına Olan Etkisinin İncelenmesi”, 11. Uluslararası Alüminyum Sempozyumu, İstanbul, Ekim 2023.

