T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

6005 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA FARKLI SICAKLIKLARDA YAPILAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MALZEMENİN MİKROYAPISINA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NESLİHAN KARAMAN

Tez Danışmanı
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMİN YAKAR

ÇANAKKALE – 2025

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

MALZEME BİLİMİ VE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

6005 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA FARKLI SICAKLIKLARDA YAPILAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MALZEMENİN MİKROYAPISINA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

NESLİHAN KARAMAN

Tez Danışmanı
DR. ÖĞR. ÜYESİ EMİN YAKAR

ÇANAKKALE – 2025

T.C.
ÇANAKKALE ONSEKİZ MART ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

Neslihan KARAMAN tarafından Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR yönetiminde hazırlanan ve **29/08/2025** tarihinde aşağıdaki jüri karşısında sunulan "**6005 Serisi Alüminyum Alaşımlarında Farklı Sıcaklıklarda Yapılan Yaşlandırma İşleminin Malzemenin Mikroyapısına ve Mekanik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi**" başlıklı çalışma, Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü **Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı**'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak oy birliği ile kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri	**İmza**
Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR (Danışman)	……
Doç. Dr. Fatma SARF	……
Dr. Öğr. Üyesi Sezen TEKİN	……

Tez No : 10754875
Tez Savunma Tarihi : 29/08/2025

……
Prof. Dr. Melis ULU DOĞRU
Enstitü Müdürü

…/…/2025

ETİK BEYAN

Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Tez Yazım Kuralları'na uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi taahhüt ve beyan ederim.

Neslihan KARAMAN
29/08/2025

TEŞEKKÜR

Bu tezin gerçekleştirilmesinde, çalışmam boyunca benden bilgisini, tecrübelerini ve yardımlarını esirgemeyen saygı değer danışman hocam Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR'a, çalışma süresince her zaman yanımda olan sevgili eşim Ulaş Furkan KARAMAN'a, teşekkürlerimi sunarım.

Tez çalışmam için olanak sağlayan Sistem Alüminyum San. ve Tic. A.Ş.'ye başta üretim direktörümüz sayın Levent ŞENEL olmak üzere, bilgi ve tecrübesi ile her daim katkı sağlayan ekstrüzyon üretim müdürümüz Metin BAŞARAN'a ve kalite müdürümüz Yavuz ALAŞALVAR'a teşekkürlerimi borç bilirim. Çalışmam boyunca desteklerini esirgemeyen arkadaşlarıma sevgilerimi sunarım.

Hayatımın her evresinde bana destek babam, annem ve kardeşime sonsuz sevgi ve teşekkürlerimi sunarım."

Neslihan KARAMAN

Çanakkale, Ağustos 2025

ÖZET

6005 SERİSİ ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA FARKLI SICAKLIKLARDA YAPILAN YAŞLANDIRMA İŞLEMİNİN MALZEMENİN MİKROYAPISINA VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Neslihan KARAMAN
Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi
Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Emin YAKAR
29/08/2025, 87

Bu çalışmada, ekstrüzyon yöntemi ile üretilip iki farklı soğutma yöntemi (kendiliğinden soğutma ve fanlı/sprey su ile soğutma) uygulanan AA6005 alüminyum alaşımında, farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan yaşlandırma işlemlerinin mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisi araştırılmıştır. İlk olarak sanayide biyet olarak adlandırılan alüminyum kütüklerin döküm işlemi yapılmıştır Biyetler yarı sürekli döküm yöntemiyle 178 mm çapında, 7 m boyunda üretilmiş olup homojenizasyon işlemi uygulanmış ve üretime uygun ölçülerde kesilmiştir. Ekstrüzyona girmeden önce biyetler çalışma sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Ekstrüzyon sonrası 4 mm kalınlığında lama profil üretilmiştir. Profillerin bir kısmı kendiliğinden, bir kısmı fan ve sprey su ile soğutulmuştur. Ekstrüzyon sonrası 7000 mm boyunda elde edilen profiller gerilerek 3000 mm'ye, ardından yaşlandırma için 500 mm'ye kesilmiştir. Numuneler, soğuma türüne göre işaretlenmiştir. 165°C, 180°C, 210°C, 230°C'de 1–10 saat arası suni yaşlandırmaya tabi tutulmuştur. Çekme testleri için standartlara uygun şekilde CNC ile 300 mm numuneler çıkarılmıştır. Çekme testleri yapılmıştır. Çekme ve akma mukavemetleri kaydedilmiştir. Sertlik ölçümleri ekstrüzyon yönüne paralel yapılmıştır. Numuneler optik analiz yapılmak üzere sıcak bakalite alınmıştır. Örnekleme çökelti boyutu dağılımı incelenmiştir. Kimyasal bileşim spektral ve XRF analizleri ile doğrulanırken örnekleme SEM/EDS ile daha ileri mikro yapısal karakterizasyon yapılmıştır.

Düşük sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminin süre arttıkça yapıya mukavemet kazandırdığı, yüksek sıcaklıklarda yapılan yaşlandırma işleminin ise ilk saatlerde hızla mukavemet kazandırdığı, sürenin artmasıyla aşırı yaşlanmaya uğrayarak mukavemetin bir miktar düştüğü veya belirgin bir şekilde değişmediği görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: 6005 Alüminyum Alaşımı, Ekstrüzyon,, Yaşlandırma, Mukavemet .

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF AGING TREATMENT AT DIFFERENT TEMPERATURES ON THE MICROSTRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF 6005 SERIES ALUMINUM ALLOYS

Neslihan KARAMAN

Çanakkale Onsekiz Mart University

School of Graduate Studies

Master of Science Thesis in Material Sciences and Engineering

Supervisor: Dr. Emin YAKAR

29/08/2025, 87

In this study, the effects of aging treatments carried out at different temperatures and durations on the microstructure and mechanical properties of AA6005 aluminum alloy, produced by the extrusion method and cooled by two different methods (natural cooling and fan/spray water cooling), were investigated. First, the casting of aluminum billets, known in industry as ingots, was performed. The billets were produced by semi-continuous casting with a diameter of 178 mm and a length of 7 m, homogenized, and cut into suitable sizes for production. Before extrusion, the billets were heated to the working temperature. After extrusion, 4 mm thick flat profiles were obtained. Some of the profiles were left to cool naturally, while others were cooled by fan and spray water. The profiles, initially produced at 7000 mm length, were stretched, cut into 3000 mm lengths, and then further cut to 500 mm for aging. The samples were marked according to cooling type. Artificial aging was applied at 165°C, 180°C, 210°C, and 230°C for durations ranging from 1 to 10 hours. For tensile testing, 300 mm specimens were prepared with CNC machines in accordance with standards. Tensile and yield strength values were recorded. Hardness measurements were performed parallel to the extrusion direction. Samples were hot-mounted for optical analysis. The distribution of precipitate sizes was examined. The chemical composition was verified by spectral and XRF analyses, while further microstructural characterization was conducted with SEM/EDS.

As a result, it was observed that aging treatments performed at low temperatures increased the strength of the structure over time, while aging at high temperatures rapidly increased the strength in the initial hours, and then, as the duration increased, overaging occurred, leading to a slight decrease or no significant change in strength.

Keywords: 6005 Aluminum Alloy, Extrusion, Aging, Strength.

İÇİNDEKİLER

Sayfa No

JÜRİ ONAY SAYFASI……... i
ETİK BEYAN…… ii
TEŞEKKÜR…….. iii
ÖZET ……..…….. iv
ABSTRACT …….. vi
İÇİNDEKİLER ……..…… viii
SİMGELER ve KISALTMALAR……..……. xii
TABLOLAR DİZİNİ…….…. xiii
ŞEKİLLER DİZİNİ……..……...…….. xv

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

İKİNCİ BÖLÜM 3
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Alüminyumun Tarihi…….....…….... 3
2.2. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri…… 4
2.2.1. Alüminyumun Atomik Yapısı..... 5
2.2.2. Alüminyumun Kristal Yapısı 6
2.2.3. Atomik Spektrum..... 6
2.2.4 Yoğunluk…… 6
2.2.5. Termal İletkenlik…… 7
2.2.6. Elektriksel Özellikleri……. 8
2.3. Alüminyumun Mekanik Özellikleri…....…….. 8
2.3.1 Çekme ve Akma Mukavemeti……..... 8
2.3.2 Sertlik……. 9
2.4. Alüminyumun Oksidasyonu…....…….. 9

2.5. Alüminyum Alaşımları……... 10
2.5.1 Dövme Alüminyum Alaşımlar..……..... 10
1xxx Serisi (Saf Alüminyum ve Düşük Alaşımlı Alüminyum)……... 12
2xxx Serisi (Al-Cu Alaşımları)…….. 12
3xxx Serisi (Al-Mn Alaşımları)……. 12
4xxx Serisi (Al-Si Alaşımları)…… 12
5xxx Serisi (Al-Mg Alaşımları)…….. 12
6xxx Serisi (Al-Mg-Si Alaşımları)……. 13
7xxx Serisi (Al-Zn Alaşımları)……... 13
8xxx Serisi (Diğer Alaşımlar)…… 13
2.5.2. Dökme Alüminyum Alaşımlar..……..... 13
2.5.3. Dövme ve Döküm Alaşımlarının Karşılaştırılması……. 15
2.6. Isıl İşlem……. 16
2.6.1. Isıl İşlem Yapılamayan Alüminyum Alaşımları..... 18
2.6.2. Isıl İşlem Yapılabilen Alüminyum Alaşımları..... 19
2.7. Alaşım Elementlerinin Etkileri…..……. 20
2.7.1. Krom……..... 20
2.7.2. Mangan……..... 20
2.7.3. Bakır……..... 21
2.7.4. Çinko……..... 21
2.7.5. Silikon……..... 22
2.7.6. Magnezyum…….……..... 22
2.7.7. Demir……. 22
2.8.8. Titanyum…… 23
2.8. Alüminyumun Kullanım Alanları…..…… 23
2.9. Ekstrüzyon Prosesi……..…..……. 26
2.9.1. Homojenizasyon……..... 28
2.9.2. Çalışma Sıcaklığına Isıtma……..……..... 29
2.9.3. Çökelme Sertleşmesi……..……..……..... 29
2.9.4. Çözeltiye Alma……..……..……..... 30
2.9.5. Hızla Soğutma……..……..……..... 30
2.9.6. Yaşlandırma……..……..……..... 30
2.9.7. Mikro Yapı ve Çökelti Fazları……... 31
2.10. Mekanik Testler …..……..…..……..... 31

2.10.1 Sertlik Testi……... 32
2.10.2 Çekme Testi……..…… 32

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL YÖNTEM 35

3.1. Deneylerde Kullanılan Malzemeler……. ...…….…..... 35
3.2 Deneylerin Yapılışı…….. ...…….…..... 36
3.2.1. Eriyik Hazırlama ve Biyet Döküm ...…….……..……. 36
3.2.2. Ekstrüzyon……. 38
3.2.3. Suni Yaşlandırma…….. 42
3.2.4. Çekme Testleri ve Sertlik Ölçümü……. 43
3.2.5. Metalografik Çalışmalar……. 48

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI 50

4.1. Sertlik ve Çekme Deneyi Sonuçları……..... 50
4.1.1. Ekstrüder Fan ve Sprey Su ile Soğutulduktan Sonra Suni Yaşlandırma İşlemi Yapılan Numuneler…….…… 50
4.1.2. Kendiliğinden Soğutulduktan Sonra Suni Yaşlandırma İşlemi Yapılan Numuneler……. 53
4.2. Örnekleme XRF Sonuçları…….…. 56
4.3. Optik Mikroyapı Analizleri…… ...…….…..... 57
4.3.1. Kendiliğinden Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numunesi için Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri……...……. 59
4.3.2. Kendiliğinden Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numune için Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri……..…… 59
4.3.3. Fan ve Sprey Su ile Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numunesi için Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri……..…… 60
4.3.4. Fan ve Sprey Su ile Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numune için Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri……... 60
4.3.5. 165 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri…… 61

4.3.6. 165 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri…….. 62
4.3.7. 180 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri…….. 63
4.3.8. 180 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri……. 64
4.3.9. 210 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri…….. 66
4.3.10 210 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri……. 67
4.3.11 230 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri…….. 68
4.3.12 230 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri…….. 69
4.3.13 Optik Mikroyapıdaki Çökeltiler…… 70
4.4. SEM Analizleri……..…….. 71
4.5. EDS Analizleri…..……. 72
4.5.1 60 Numaralı Numune için Analiz Sonuçları…….…… 73
4.5.2 47 Numaralı Numune için Analiz Sonuçları…….…… 74
4.6. Çökelti Boyutu Dağılımı…… 75
4.6.1. 47 Numaralı Numune için Çökelti Boyutu Dağılımı…….…… 75
4.6.2. 10 Numaralı Numune için Çökelti Boyutu Dağılımı……..…… 76
4.6.3. 60 Numaralı Numune için Çökelti Boyutu Dağılımı…..…… 77
4.6.4. 71 Numaralı Numune için Çökelti Boyutu Dağılımı……. 78

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ ve ÖNERİLER 80

5.1. Sonuç…….. ....……..... 80
5.2. Öneriler…….. ....……..... 81
KAYNAKÇA ...……. 83

SİMGELER VE KISALTMALAR

Al	Alüminyum
Cu	Bakır
Si	Silikon
Ti	Titanyum
Mg_2Si	Magnezyum silisit
AlFe(Mn)Si	Alüminyum demir manganez silisit
SEM	Taramalı elektron mikroskobu
EDS	Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi
HB	Brinnel Sertlik Değeri
Ağ.	Ağırlık
Kg	Kilogram
%	Yüzde oranı
ºC	Santigrat
µm	Mikrometre
MPa	Megapaskal
mm	Milimetre
ppm	Milyonda bir oran
SiC	Silisyum karbür

TABLOLAR DİZİNİ

Tablo No	Tablo Adı	Sayfa No
Tablo 1	Alüminyumun fiziksel özellikleri	4
Tablo 2	Alüminyumun saflık dereceleri	5
Tablo 3	Erimiş %99,996 al yoğunluğu	7
Tablo 4	Dövme alüminyum alaşımları standart gösterimi	11
Tablo 5	Döküm alüminyum alaşımlarının standart gösterimi	15
Tablo 6	Alüminyum alaşım serileri	17
Tablo 7	Isıl işlemle sertleştirilemeyen dövme alüminyum alaşımlarının tipik uygulamaları	24
Tablo 8	Isıl işlemle sertleştirilebilen dövme alüminyum alaşımlarının tipik uygulamaları	25
Tablo 9	TS EN 573-3 +A1 standardı ve AA6005 kimyasal analiz sonuçları	36
Tablo 10	Fan ve sprey su ile soğutulan numuneler için sertlik, çekme ve akma mukavemetleri	51
Tablo 11	Kendiliğinden soğutulan numuneler için sertlik, çekme ve akma mukavemetleri	54
Tablo 12	XRF analiz sonuçları	56
Tablo 13	Bakalite alınan numuneler için özet	58
Tablo 14	Çökelti boyutu dağılımı	76
Tablo 15	10 numaralı numune için çökelti boyutu dağılımı	77
Tablo 16	60 numaralı numune için çökelti boyutu dağılımı	78
Tablo 17	71 numaralı numune için çökelti boyutu dağılımı	79
Tablo 18	Yaşlandırma sonrası en yüksek ve en düşük mukavemet değerleri	80

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil No	Şekil Adı	Sayfa No
Şekil 1	Çekme testi numunesi a) test öncesi b) test sonrası	34
Şekil 2	Kimyasal analiz	35
Şekil 3	Ergitme fırını	36
Şekil 4	Döküm prosesi a) eriyik döküm prosesi b) biyet döküm prosesi	37
Şekil 5	Homojenizasyon fırını	38
Şekil 6	Biyetin ekstrüzyona iletilmesi	39
Şekil 7	Profilin şiş ile sıcaklık ölçümü	39
Şekil 8	Ekstrüzyon işlemi sonrası kendiliğinden soğutma b) ekstrüder fan ve sprey su ile soğutma	40
Şekil 9	(a) Germe işlemi (b) kesme işlemi (c) kesilen numuneler	41
Şekil 10	Isıl işlem fırını	43
Şekil 11	(a) Çekme testi cihazı (b) çekme testi uygulanan numune	44
Şekil 12	Sertlik ölçüm cihazı	45
Şekil 13	Numune kesme cihazı	46
Şekil 14	Bakalite alma cihazı	47
Şekil 15	(a) Zımparalama işlemi (b) parlatma işlemi	48
Şekil 16	Optik mikroskop	49
Şekil 17	Kendiliğinden soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri	59
Şekil 18	Kendiliğinden soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri	59
Şekil 19	Fan ve sprey su ile soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri	60

Şekil 20	Fan ve sprey su ile soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri	60
Şekil 21	165 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri	61
Şekil 22	165 ºC'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri	62
Şekil 23	180 ºC'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri	63
Şekil 24	180 ºC'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri	64
Şekil 25	210 ºC'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri	66
Şekil 26	210 ºC'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri	67
Şekil 27	230 ºC'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri	68
Şekil 28	230 ºC'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri	69
Şekil 29	47 numaralı numune için mikroyapı incelemesi	70
Şekil 30	60 numaralı numune için mikroyapı incelemesi	70
Şekil 31	10, 47, 60 ve 71 numaralı numuneler için 500x, 1000x ve 2000x büyütmede sem görselleri	71
Şekil 32	60 numaralı numune için a) birinci ve b) ikinci bölgeden eds analizleri ve %kütle oranları	73
Şekil 33	47 numaralı numune için a) birinci ve b) ikinci bölgeden eds analizleri ve %kütle oranları	74

.

BİRİNCİ BÖLÜM
GİRİŞ

Alüminyum, kendine özgü fiziksel özellikleri ve sanayiye kolayca uyarlanabilmesi sayesinde dünya genelinde giderek daha fazla önem kazanmaktadır. İnşaat ve otomotiv gibi alanlardaki artan ihtiyaç, üretimin düzenli bir şekilde yükselmesine yol açmış ve küresel alüminyum üretiminin 2023 itibarıyla 70 milyon tonu geçmesi öngörülmektedir. Alüminyum üretiminin hızlı genişlemesi, hem üreticiler hem de tüketiciler için önemli fırsatlar sunarken, çevresel ve sosyal etkileri göz ardı edilmemelidir. Yıllık yaklaşık 1,1 milyar ton CO_2 emisyonundan sorumlu olan bu sektör, rekabet gücünü koruyabilmek ve kaynakları çeşitlendirebilmek için tedarik zincirinin karbonsuzlaştırılmasına yönelik kritik bir ihtiyaç olduğunu ortaya koymaktadır .Asya bölgesi, küresel alüminyum üretiminde derin bir etkiye sahip olup, sektörün dinamiklerinde önemli bir rol oynamaktadır. Çin, dünya toplam üretiminin %60'ından fazlasını karşılayarak büyük bir üretim kapasitesi sunmaktadır. Alüminyum sektörü ağır sanayi kategorisinde değerlendirilmektedir (Hasanov, vd, 2024).

Alüminyum alaşımlarının üretimi, hammaddelerin mevcudiyeti, enerji maliyetleri, hükümet politikaları ve pazar talebi gibi çeşitli faktörlerden etkilenir. Son yıllarda alüminyum alaşımları yapı mühendisliği, köprü mühendisliği ve açık deniz mühendisliğinde giderek daha fazla kullanılmaktadır. Bu, korozyona karşı olağanüstü direnç ve yüksek dayanıklılık ile birlikte arzu edilen mekanik özelliklerinden kaynaklanmaktadır. Yapısal alüminyumun kalitesini kaybetmeden tamamen geri dönüştürülebilir olması onu giderek sürdürülebilirliğe odaklanan bir dünyada son derece değerli bir sürdürülebilir yapı malzemesi haline getirmekte olup sıklıkla "yeşil metal" olarak anılır. Alüminyum alaşımlarının üretiminde haddeleme ,ekstrüzyon , dövme ve çekme gibi çeşitli şekil verme yöntemleri kullanılır. Dövme alüminyum istenilen şekle getirildikten sonra, mukavemetini, sünekliğini ve diğer özelliklerini artırmak amacıyla ısıl işlem gibi ek işlemlerden geçirilebilir. Alüminyum alaşımları genellikle kimyasal bileşimlerine, özelliklerine ve kullanım amaçlarına göre sınıflandırılır (Sun, 2023).

Alüminyum sektöründe hizmet verilen müşteri ağının çok kapsamlı olması, alüminyumun özellikleri sebebiyle birçok alanda tercih edilmesi ve müşteri beklentilerin

günden güne artması/değişmesi sebebiyle alüminyumum çalışma performansının yüksek seviyede seyretmesi gerekliliği alüminyumun mekanik özelliklerinin geliştirilmesi ihtiyacını doğurmaktadır. Bu alaşımların ısıl işleme uygunluğu ve mikroyapının geliştirilebilir olması ve ticari olarak da gelişime açık konular olması araştırmanın nedenselliğine cevap vermektedir.

Bu çalışmada 6005 serisi alüminyum alaşımlarında farklı sıcaklık ve sürelerde yapılan yaşlandırma işleminin malzemenin mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bu araştırma kapsamında izlenecek yöntemler, öncelikli olarak konuya ilişkin literatürün incelenmesi ve bu alanda gerçekleştirilen önceki çalışmaların değerlendirilmesi sürecini içerecektir. Sonraki aşamada ise uygulanan yaşlandırma prosesinin mekanik özellikler üzerindeki etkileri incelenip kayıt altına alınacaktır. Böylece ekstrüzyon üretim sonrası 2 farklı yolla soğutulup aynı süre ve sıcaklıklarda yaşlandırma işlemi yapılan numunelerin çekme, akma ve sertlik sounuçlarındaki değişimler değerlendirilecektir. Bu yönde araştırma süreci tamamlanacak ve literatüre 6005 alümimyum alaşımlarında istenilen sertlik ve mikroyapı analizlerine göre uygulanması gereken soğutma türü, yaşlandırma süresi ve sıcaklığına ilişkin veriler ile katkıda bulunulacaktır.

İKİNCİ BÖLÜM
KURAMSAL ÇERÇEVE/ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1. Alüminyumun Tarihi

1808 yılında Sir Humphrey Davy tarafından alüminyumun varlığı ilk kez kanıtlanmıştır. Alüminyum metali, ilk defa 1825 yılında Hans Christian Oersted tarafından sınırlı miktarlarda üretilmiştir. İki yıl sonra ise Friedrich Wöhler, susuz alüminyum klorür ile potasyumun tepkimesi sonucu bir alüminyum tozu elde etmiştir (Cobden, Alcan, Banbury, 1994). 1845'te Alman bilim insanı Wöhler, alüminyumun özgül ağırlığını ölçmüştür. Bu ölçümle birlikte, alüminyumun hafifliği, şekil alabilme özelliği ve havada kararlı kalma gibi önemli nitelikleri de ortaya konmuştur. 1854'te ise Henri Sainte-Claire Deville, Wöhler'in geliştirdiği bu yöntemi daha da iyileştirmiştir (Lumley, 2010). Alüminyumun endüstriyel üretimi modern ergitme prosesinin bulunduğu 1886 yılına dayanmaktadır (Dwight, 1998). 20. yüzyılın başından itibaren alüminyum alaşımları neredeyse hiçbir ikame malzemenin bulunmadığı uygulamalarda kullanılmaya başlanmıştır. Ahşabın yavaş yavaş yerini yeni hafif metalin aldığı ve modern uçakların temelini oluşturan havacılık endüstrisi buna en önemli örneklerdendir. Daha sonra alüminyum alaşımlarının kullanımı, hem yapısal hem de yapısal olmayan pencere çerçeveleri, kapı donanımları, kaplama, endüstriyel kimya, silah gibi alanlarda hızla yayılmıştır. İkinci Dünya Savaşı'ndan sonra uzun yıllar boyunca bu malzemeler metro vagonları, yataklı vagonlar gibi demiryolu endüstrisinde, kamyonlar, arabalar, mobil vinçler için üstyapılar gibi otomotiv endüstrisinde ve askeri deniz araçları, motorlu tekneler, yelkenli tekneler gibi taşımacılık ve denizcilik endüstrisinde başarıyla kullanılmıştır (Mazzolani, 2004). 1914-1919 yılları arasında alüminyum üretimi 70.800 tondan 132.500 tona çıkmıştır. 1939 yılında 704.000 ton olan üretim, 1943 yılına gelindiğinde 1.950.000 tona kadar yükselmiş, ancak sonrasında üretimde önemli bir düşüş yaşanmıştır. 1950-1970 yılları arasında alüminyumlu ürünlerin tüketimi büyük bir artış göstermiştir ve alüminyum, hafiflik, şekil alabilme ve dayanıklılık gibi özellikleriyle oldukça talep gören bir malzeme haline gelmiştir (Cobden, Alcan, Banbury, 1994). Günümüzde birincil alüminyum üretimi, birçok ülkenin alüminyum eritip ürünler üretmesine olanak tanımaktadır. Alüminyumun sahip olduğu önemli özellikler sayesinde

üretimi her geçen gün artmakta ve bu artan talep, üretim kapasitesinin yükselmesini tetiklemektedir.

2.2. Alüminyumun Fiziksel Özellikleri

Alüminyum 2,699 g/cm^3 yoğunluğa , 933,5 K (660 ℃) ergime noktasına ve 2767 K (2493,85 °C) kaynama noktasına sahiptir.

Diğer fiziksel özellikleri Tablo 1 'de özet olarak verilmiştir (Aluminum association, 1984).

Tablo 1
Alüminyumun fiziksel özellikleri

Özellik	**Değer**
Termal nötron kesit alanı	0,232 ± 0,003 barn
Kristal kafes sabiti	4,0496 × 10^{-10} metre (298 K sıcaklıkta)
Yoğunluk (katı, teorik)	2699 kg/m³ (kafes aralığına göre)
Yoğunluk (katı, polikristal)	2697–2699 kg/m³
Yoğunluk (sıvı)	2357 kg/m³ (973 K'de)
	2304 kg/m³ (1173 K'de)
Genleşme katsayısı	23 × 10^{-6} K^{-1} (293 K'de)
Termal iletkenlik	2,37 W/cm·K (298 K'de)
Özdirenç (hacimsel)	2,655 × 10^{-8} Ω·m
Manyetik duyarlılık	16 × $10^{-3}m^{-3}$ g $atom^{-1}$ (298 K'de)
Yüzey gerilimi	868 dyne/cm (erime noktasında)
Viskozite	0,012 denge erime noktasında
Erime noktası	933,5 K
Kaynama noktası	2767 K
Füzyon ısısı	397 J/g
Buharlaşma ısısı	1,08 × 10^{-4} J/g
Isı kapasitesi	0,90 J/g·K

Alüminyumun saflık derecelerine göre sınıflandırılması Tablo 2 'de verilmiştir (Aluminum Association ,1984).

Tablo 2

Alüminyumun saflık dereceleri

Alüminyum %	**Saflık Derecesi**
99,50-99,79	Ticari Saflık
99,80-99,949	Yüksek Saflık
99,950-99,99,9959	Süper Saflık
99,9960-99,9990	Aşırı Saflık
99,9990'ın üzerinde	Ultra Saflık

2.2.1 Alüminyumun Atomik Yapısı

Alüminyum, yer kabuğunda en çok bulunan üçüncü element olup, %8'lik bir oranla (82 g kg^{-1}) en yaygın metaldir. Bu elementin varlığı, yalnızca oksijen (474 g kg^{-1}, %46) ve silikon (282 g kg^{-1} , %26) tarafından geçilmektedir. Doğada alüminyum, genellikle oksijen ve silikatlar gibi diğer elementlerle birleşmiş halde bulunur (Atwood, Yearwood, 2000). Kimyasal sembolü Al olan bu elementin atom numarası 13'tür. Bu, bir alüminyum atomunun 13 elektron ve yoğunlaşmış bir çekirdek etrafında yerleşmiş üç farklı yörüngede düzenlenmiş olduğunu ifade eder. Alüminyum atomunun çekirdeği 13 pozitif yüke sahiptir. Dış yörüngede bulunan üç elektron, alüminyuma +3 değerlik bağlanma kapasitesi kazandırır. (Cobden, Alcan, Banbury, 1994) Elektronun dağılımı $1s^2$, $2s^2$, $2p^6$, $3s^2$ ve $3p^1$ şeklindedir (Aluminum Association ,1984).

Ana izotop, stabil olan ve 14 nötron ve 13 protondan oluşan ^{27}AI'dir. Atom ağırlığı 26.989dir. 10^6 yıllık bir yarı ömre sahip olan ^{26}Al izotopu dışında tüm izotoplar kısa yarı ömre ve ihmal edilebilir bolluğa sahiptir (Mondolfo , 1976). 26Al izotopu 106 yıllık bir yarı ömre sahiptir (Aluminum Association ,1984).

2.2.2 Alüminyumun Kristal Yapısı

Metaller erimiş durumdan katı hale geçtiğinde, kristal yapılar oluştururlar. Alüminyum, bakır, gümüş ve altın gibi sünek metallerin çoğunda ortak olan atomların yüzey merkezli kübik düzeniyle kristalleşir Bu, atomların küpün köşelerine yerleştiği ve her bir yüzeyin merkezinde bir atom bulunduğu anlamına gelir. Yüksek saflıktaki alüminyumda, küpün kenar uzunlukları 4.049 x 10^{-8} cm olarak belirlenmiştir ve yapıdaki iki atom arasındaki en kısa mesafe, $\sqrt{2}$ / 2 x 4.049 cm olarak hesaplanır. Yüzey merkezli kübik yapı, 4.049 x 10^{-8} cm çapında, küpün köşeleri her kürenin merkezinde yer alan, birbirine yakın paketlenmiş kürelerin olduğu varsayılan bir düzendir (Cobden, Alcan, Banbury, 1994).

Alüminyum, 4 K'den erime noktasına kadar stabil olan yüzey merkezli kübik kafeste kristalleşir. Birim hücrede dört atom bulunan alüminyumun koordinasyon sayısı 12'dir. Saf alüminyum için atom çapı 2,86 x 10^{-10} m ve atom hacmi 9,999 x 10^{-6} mm^3/g'dir. Kafes parametresi safsızlıklardan yalnızca biraz etkilenir (Mondolfo , 1976).

2.2.3 Atomic Spektrum

Minimum iyonizasyon potansiyeli 3,13 V'tur ve ilk üç iyonizasyon enerjisi 5,98580 ± 0,00002 eV, 18,82873 ± 0,00006 eV ve 28,44787 ± 0,00008 eV'dir. Thea spektrumundaki en güçlü çizgi $3p^2P_3$ - $4S^2S_1$ olup 396.15200 nm (3961.5200 Å) geçişidir (Aluminum Association , 1984).

2.2.4 Yoğunluk

Teorik oda sıcaklığı olan 20℃'de alüminyumun teorik yoğunluğu 2698,72 kg/m'dir. Tek kristallerin yoğunluğundan %0,34 daha yüksek olan polikristalin malzeme için deneysel değerler 2696,6 ile 2698,8 kg/m^3 arasında değişmektedir (Mondolfo , 1976).

Erimiş %99,996 alüminyumun yoğunluğu Tablo 3' de verilmiştir (Aluminum Association , 1984).

Tablo 3

Erimiş %99,996 al yoğunluğu

Sıcaklık (K)	ρ (kg/m^3)	ρ (lb/ft^3)
933	2368	148
973	2357	147
1023	2345	146
1073	2332	146
1123	2319	145
1173	2304	144

Tablo 3'e bakıldığında çoğu metalde olduğu gibi sıcaklığın artmasıyla yoğunluğun azaldığı görülmektedir. Alüminyum en belirgin ve en tanınmış özelliği olan hafifliğiyle ön plana çıkmaktadır. Özgül ağırlığı 2,70 olan alüminyum, yaygın olarak kullanılan diğer metallerin yaklaşık üçte biri kadar ağırdır; titanyum ve magnezyum hariç. Alüminyum alaşımlarına eklenen diğer metaller (genellikle %3 artı, %2 eksi oranlarında) yoğunluk üzerinde önemli bir değişiklik yaratmaz. Ağırlık, hareketi gerektiren tüm uygulamalarda önemli bir faktördür. Ağırlık tasarrufu sağlamak, taşıma kapasitesini artırabilir veya daha verimli bir çalışma sağlar. Ayrıca, ağırlık azaltmak enerji tasarrufu sağlar, titreşimleri düşürür, pistonlu ve hareketli parçaların verimliliğini artırır, elle yapılan işlerde yorgunluğu azaltır, taşıma, nakliye ve montaj maliyetlerini düşürür. Alüminyumun düşük ağırlığı ve yüksek mukavemetli özel alaşımları, son altmış yılda onu uçak yapımında temel malzeme haline getirmiştir (Cobden, Alcan, Banbury, 1994).

2.2.5 Termal İletkenlik

100 K gibi orta ila yüksek sıcaklıklarda iyi tavlanmış ve yüksek saflıktaki (%99,999) alüminyumun gerçek termal iletkenliği, *k,* safsızlık seviyesine nispeten duyarsızdır. 100 K'nin altında alüminyum, artık direnç ρ_o (0 K'deki direnç) ile ölçülen safsızlık seviyesine karşı oldukça duyarlı hale gelir. (Aluminum Association , 1984). %99,99 saf alüminyumun termal iletkenliği, *k,* 0-100°C sıcaklık aralığı için 244 W/mK olup, düşük özgül ağırlığı nedeniyle kütle termal iletkenliği bakırın iki katıdır (Cobden, Alcan, Banbury, 1994).

2.2.6 Elektriksel Özellikler

Süper saflıkta alüminyumun (%99,990) 20°C'de elektriksel direnci için kabul edilen değer 2,6548 x 10^{-8} nmdir. Yönlendirilmiş dislokasyonlar bulunmadığı sürece, alüminyumun iletkenliği izotropik özellik gösterir . Ticari alüminyum malzemelerinde, tane boyutunun etkisi genellikle göz ardı edilebilir ancak soğuk işlenmiş alüminyumda, deformasyon yönünde %0,5 ile %1 arasında daha iyi iletkenlik gözlemlenebilir . Alüminyumda fotoiletkenlik etkisi bulunmaz . Saf alüminyumun çok düşük sıcaklıklardaki (100 K) elektriksel direnci, saflık seviyesine büyük oranda bağlıdır. Bu nedenle, 290 K'deki direncin 4,2 K'deki dirençle oranı bazen saflığın bir göstergesi olarak kullanılır . Alüminyum, mutlak sıfıra yakın sıcaklıklarda süper iletkenlik özelliği gösterir (Aluminum Association , 1984).

2.3. Alüminyumun Mekanik Özellikleri

Alüminyum alaşımlarının düşük mekanik mukavemeti ve düşük erime noktası, yüksek çekme mukavemeti ve uzama gerektiren yapısal ve yüksek sıcaklık malzemeleri olarak kullanılmalarını sınırlamaktadır .Alüminyum alaşımlarının mukavemetini ve plastisitesini geliştirmek için genellikle ısıl işlem uygulanır. Bununla birlikte, çoğu alüminyum alaşımı, ısıl işlemden sonra taneler arası gerilimli korozyon çatlamasına karşı hassastır ve bu da büyük ekonomik kayıplara neden olabilmektedir (Peng, Li, Wei, Lv, Li ve Zhang, 2024).

2.3.1. Çekme ve Akma Mukavemeti

%99.99 saflıktaki bir alüminyumun akma mukavemeti 10 Mpa ve çekme mukaveti 45 Mpa’dır. %99.8 saflıktaki bir alüminyumun akma mukavemeti 20 Mpa ve çekme mukavemeti 60 Mpa’dır. %99.6 saflıktaki bir alüminyumun akma mukavemeti 30 Mpa ve çekme mukavemeti 70 Mpa olarak ölçülmüştür (Aluminum Association , 1984).

2.3.2 Sertlik

Yüzey girintisine karşı gösterilen direnç, bir alaşımın durumu hakkında genel bir gösterge sağlar ve inceleme ölçütü olarak kullanılır. Alüminyum alaşımlarının sertliği, Brinell (çelik bilya), Vickers (elmas) ve Shore Skleroskop (elmas çekiç) test makineleri ile ölçülmektedir. Tipik Brinell sertlik değerleri, ticari olarak tavlanmış saf alüminyum için 20 HBW'den en dayanıklı alaşım için 175 HBW'ye kadar değişiklik gösterebilir. Alüminyumun yüzey sertliği, sert anodize işlemi ile belirgin şekilde artırılabilir ve bu özellik, bileşenlerin aşınmaya karşı dayanıklılığını artırmak amacıyla yaygın olarak kullanılır (Cobden, Alcan, Banbury, 1994).

2.4. Alüminyumun Oksidasyonu

Alüminyum, atmosferik koşullarda oksijenle temas ettiğinde yüzeyinde doğal olarak ince ve yoğun bir alümina (Al_2O_3) tabakası oluşturur. Bu pasif film, alüminyumu daha derin oksidasyondan korur ve korozyon direncini artırır. Ancak, bu koruyucu tabaka aynı zamanda alüminyumun reaktivitesini sınırlar ve özellikle enerji uygulamaları gibi alanlarda yanma verimliliğini düşürebilir . Oksidasyon süreci, genellikle dört aşamada gerçekleşir;

- Yavaş Başlangıç Aşaması: Alüminyum yüzeyinde amorf alümina tabakası oluşur.
- Geçiş Aşaması: Alüminyum iyonlarının dışa doğru difüzyonu başlar.
- Hızlı Oksidasyon Aşaması: Alüminyum erime noktasına ulaştığında, içteki aktif alüminyumun reaksiyona katılımı artar.
- Yoğun Oksidasyon Aşaması: Alümina tabakasının kristal yapısı değişir ve oksijen anyonlarının difüzyonu hızlanır (Wang, Xu, Tan, Liu, Dong, Li, Liu, 2022).

Alüminyum, yaygın ticari metaller arasında en az reaktif olanlardan biri olmasına rağmen, birçok oksitleyici ortamda oldukça dayanıklıdır. Bu kararlılığını, oksijen, su veya diğer oksidanlarla temas eden yeni alüminyum yüzeyinde hızla oluşan ve büyüyen sürekli alüminyum oksit tabakasına borçludur. Oksitin moleküler hacmi, oksidasyon reaksiyonunda tüketilen alüminyumun hacminden yaklaşık 1,3 kat daha büyüktür. Bu nedenle yüzey tabakası, basınç gerilmesi altında olup, zarar gördüğünde hızla iyileşir. Kuru oksijen

ortamında, yüzey tabakası sıcaklığa bağlı olarak bir kalınlığa ulaşır. Oda sıcaklığında bu sınırlayıcı kalınlık yaklaşık 2,5 ila 3,0 nm (25 ila 30 Å) civarındadır. Su buharının varlığında oksit tabakasının kalınlığı artar. Oda sıcaklığında ve %100 bağıl nemde, kuru oksijene göre yaklaşık iki kat daha fazla oksit oluşur. Dubleks film genellikle nemli ortamlarda oluşur ve metal yüzeye en yakın sürekli oksit tabakası katı/gaz arayüzünde hidroksillenmiş bir film haline gelir. Daha yüksek sıcaklıklarda ve özellikle magnezyum ve bakır içeren alüminyum alaşımlarında daha karmaşık film yapıları meydana gelir (Aluminum Association, 1984).

2.5. Alüminyum Alaşımları

Alüminyum, mekanik özelliklerini önemli ölçüde değiştirebilen çeşitli elementler içerebilir. Alüminyum alaşımlarındaki başlıca elementler arasında bakır, magnezyum, manganez, silikon, kalay ve çinko bulunmaktadır (Mazzolani, F. M. 2004). Alüminyum alaşımları dökme alüminyum alaşımları ve dövme alüminyum alaşımları olmak üzere sınıflandırılır. (Davis, 1993). Dövme ve döküm alaşımları da kendi içinde ısıl işlem görebilen alaşımlar ve ısıl işlem görmeyen alaşımlar olmak üzere iki alt kategoriye ayrılır. (Hussey , Wilson, 2013)

Bazı alüminyum alaşımları, faz çözünürlüğü temelinde yapılan ısıl işlemlere tepki verir ve kontrollü ısıl işlem ve soğutma döngüleriyle sertleştirilebilir. Bu ısıl işlemler üç ana aşamadan oluşur: çözelti ısıl işlemi, hızlı soğutma ve çökelme sertleşmesi (yaşlandırma). (Ashkenazi, 2019).

2.5.1. Dövme Alüminyum Alaşımlar

Dövme alaşımları, yüksek sıcaklıkta işlenip şekil verilen ve genellikle çekme, dövme ya da haddeleme işlemleriyle şekillendirilen alüminyum alaşımlarıdır. Bu işlemler, alaşımın mikro yapısını geliştirir ve dayanıklılığını artırır. Genellikle yüksek mukavemet ve iyileştirilmiş mekanik özelliklere sahiptir. Kolay şekillendirilebilir. Ekstrüzyon prosesine uygundur. Doğal olarak oluşan sağlam yüzey oksit tabakası sayesinde birçok atmosferik ve kimyasal ortamda olağanüstü korozyon direnci sağlar. (Kaufman, 2006).

Dövme alüminyum alaşımlarını ifade etmek için kullanılan dört basamaklı sistem Tablo 4 'te verilmiştir (Davis,1993)

Tablo 4

Dövme alüminyum alaşımları standart gösterimi

Simge	**Açıklama**
1xxx	Saf alüminyum
2xxx	Al-Cu ve Al-Cu-Mg alaşımlar
3xxx	Al-Mn alaşımlar
4xxx	Al-Si alaşımlar
5xxx	Al-Mg alaşımlar
6xxx	Al-Mg-Si alaşımlar
7xxx	Al-Zn-Mg ve Al-Zn-Mg-Cu alaşımlar
8xxx	Al-Fe-Ni ve Al-Li-Cu-Mg

Dövme alüminyum alaşımlarının standart numaralandırma sisteminde, ilk rakam ana alaşım elementini belirtir, ikinci rakam alaşımın farklı türlerini ayırt etmeye yarar, son iki rakam ise spesifik alaşım çeşitlerini tanımlar (Cardarelli, 2008).

1xxx, 3xxx, 5xxx ve 6xxx serisi alaşımlar korozyon dirençlerinin oldukça iyi olmasıyla bilinirler (Kaufman, 2006). Dövme alüminyum alaşımları mukavemet ve hafiflik özellikleri nedeniyle özellikle havacılık ve otomotiv endüstrilerinde tercih edilirler. Isıl işlemle sertleştirilebilen dövme alüminyum alaşımları 2xxx, 6xxx, 7xxx ve bazı 8xxx serisi alaşımlardır (Davis, 1999). Bu alaşımlar, dövme işlemi sırasında uygulanan plastik deformasyon sayesinde iç yapıdaki boşlukların ortadan kaldırılması ve kristal yapının iyileştirilmesi sonucu yüksek mekanik özelliklere sahip olur. Sıcak dövme, yüksek sıcaklıklarda yapılır ve malzemenin şekillendirilmesini kolaylaştırır. Soğuk dövme ise oda sıcaklığında gerçekleştirilir ve daha yüksek mukavemet sağlar (ASM International, 1993).

1xxx Serisi (Saf Alüminyum ve Düşük Alaşımlı Alüminyum)

1xxx serisi alaşımlar, %99,00 veya daha yüksek saflıkta alüminyum içerir. Bu seri, yüksek elektriksel ve termal iletkenlik, mükemmel korozyon direnci ve kolay işlenebilirlik özellikleriyle öne çıkar. Ancak, bu alaşımların mekanik mukavemeti düşüktür ve bu nedenle yapısal uygulamalardan ziyade elektriksel iletkenler, kimyasal ekipmanlar ve ısı transferi uygulamalarında kullanılır (Kaufman, 2000). Örneğin, 1100 alaşımı, bu serinin en yaygın örneklerinden biridir ve düşük mukavemet gerektiren uygulamalarda tercih edilir (ASM International, 1993).

2xxx Serisi (Al-Cu Alaşımları)

2xxx serisi alaşımlar, bakır (Cu) içerir ve yüksek mukavemet ile sıcaklık direnci sunar. Bu alaşımlar, özellikle havacılık endüstrisinde yapısal bileşenler olarak kullanılır. Uçak gövdeleri ve kanat yapılarında yaygın olarak tercih edilir (Davis, 1993).

3xxx Serisi (Al-Mn Alaşımları)

Manganez, alaşımın mukavemetini artırırken, korozyon direncini korumasını sağlar (Kaufman, 2000). 3003 alaşımı, bu serinin en yaygın örneklerinden biridir ve hem dövme hem de ekstrüzyon işlemlerine uygundur (Davis, 1999). 3003 Al-Mn alaşımı genellikle sac formunda tedarik edilir. Bu alaşımda bulunan daha ince manganez içeren intermetalik bileşikler, bir miktar dağılma sertleşmesi sağlar ve bu alaşım genellikle folyo, pişirme kapları ve çatı kaplama sacları gibi uygulamalarda yaygın olarak kullanılır (Polmear, 2006).

4xxx Serisi (Al-Si Alaşımları)

4xxx serisi alaşımlar, silisyum (Si) içerir (Davis,1993). 4043 alaşımı, bu serinin en yaygın örneklerinden biridir ve kaynak elektrotları olarak kullanılır. 4343 alaşımları da sert lehimleme çubukları olarak kullanılmaktadır. (Polmear, 2006).

5xxx Serisi (Al-Mg Alaşımları)

5xxx serisi alaşımlarda ana alaşım elementi magnezyumdur (Mg) ve yüksek korozyon direnci sunar. Magnezyum, ana alaşım elementi olarak ya da manganez ile birlikte

kullanıldığında, orta ila yüksek mukavemetli, işlenerek sertleştirilebilen alaşımlar elde edilir. Bu alaşımlar, denizcilik ve kimya endüstrisinde yaygın olarak kullanılır. Örneğin, 5083 alaşımı, gemi gövdeleri ve basınçlı kaplarda tercih edilir (Davis, 1993).

6xxx Serisi (Al-Mg-Si Alaşımları)

6xxx serisi alaşımlar, magnezyum (Mg) ve silisyum (Si) içerir. Yaklaşık olarak magnezyum silisit (Mg_2Si) oluşumuna yetecek oranlarda silisyum ve magnezyum içermesi sebebi ile ısı ile işlem görebilirler**.** Bu alaşımlar, çoğu 2xxx ve 7xxx serisi alaşımlar kadar güçlü olmasalar da**,** iyi şekillenebilirlik**,** kaynaklanabilirlik**,** işlenebilirlik ve korozyon direnci ile birlikte orta seviyede bir mukavemet sunarlar (Davis,1993). Bu alaşımlar, orta düzeyde mukavemet sağlar. Özellikle otomotiv endüstrisinde şasi parçaları ve tekerleklerde kullanılır (Kaufman, 2000). 6061 alaşımı, bu serinin en yaygın örneklerinden biridir ve hem dövme hem de ekstrüzyon işlemlerine uygundur (ASM International, 1993).

7xxx Serisi (Al-Zn Alaşımları)

Çinko %1 ile %8 arasında bir oranda ana alaşım elementi olarak bulunur. 7xxx serisi alaşımlar, uçak gövdesi yapıları, mobil ekipmanlar ve diğer yüksek gerilimli parçalar gibi uygulamalarda kullanılır. Daha yüksek mukavemetli 7xxx alaşımlar, gerilme korozyon çatlağına karşı daha az direnç gösterir ve genellikle biraz yaşlandırılmış temperde kullanılır. (Davis, 1993) 2024'ten daha yüksek mukavemetlerin gerektiği yerlerde tercih edilir. (Cardarelli, 2008).

8xxx Serisi (Diğer Alaşımlar)

8xxx serisi alaşımlar, lityum (Li) gibi diğer alaşım elementlerini içerir. Bu alaşımlar, özellikle hafiflik ve yüksek mukavemet gerektiren havacılık uygulamalarında kullanılır (Kaufman, 2000).

2.5.2 Dökme Alüminyum Alaşımlar

Dökme alüminyum alaşımları, genellikle metalin eritilerek kalıplara dökülmesiyle şekillendirilir. Bu tür alaşımlar, büyük ve karmaşık şekillerin üretimi için uygundur ve düşük

maliyetli üretim süreçlerine olanak tanır. Dökme alüminyum alaşımlarının genellikle yüksek akma dayanımı, iyi işlenebilirlik ve korozyon direnci gibi özellikleri vardır. Bu alaşımlar dövme alaşımlarına göre daha düşük mekanik özellikler gösterir. Dökme alüminyum alaşımları, otomotiv ve inşaat sektöründe, özellikle motor parçaları, şasi ve yapı bileşenleri gibi alanlarda yaygın olarak kullanılır (Davis, 1993).

Dökme alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve kimyasal bileşimi ekstrüzyonla çekilmiş alüminyum alaşımlarından oldukça farklıdır ve döngüsel davranışta büyük farklılıklara yol açabilmektedir (Lu ve diğerleri, 2025). Dökme alüminyum alaşımları, çeşitli döküm yöntemleri kullanılarak üretilir. Bu yöntemler şunlardır:

- Kum Döküm: Düşük maliyetli ve esnek bir yöntemdir. Özellikle büyük ve karmaşık parçaların üretiminde kullanılır (ASM International, 1993).
- Basınçlı Döküm: Yüksek üretim hızı ve hassas boyut kontrolü sağlar. Otomotiv endüstrisinde yaygın olarak kullanılır (Davis, 1999).
- Alçı Kalıp Döküm: Yüksek yüzey kalitesi ve detay doğruluğu sunar. Özellikle sanatsal dökümlerde tercih edilir (Totten ve MacKenzie, 2003).

Kum dökümleri gibi daha büyük parçalar için alüminyum genellikle dökme demire tercih edilen bir seçenektir. Döküm boyaları gibi daha küçük parçalar için çinkoya güçlü bir alternatif sağlar. Alüminyum dökümlerin güvenilirliği araba tekerlekleri için standart hale gelmesiyle kanıtlanmıştır. (Dwight, 1998).

Tablo 5'te döküm alüminyum alaşımlarının standart gösterimi verilmiştir (Cardarelli, 2008).

Tablo 5

Döküm alüminyum alaşımlarının standart gösterimi

Simge	Açıklama
1xx.x	Saf alüminyum (%99 veya daha fazla Alüminyum)
2xx.x	Al-Cu alaşımlar
3xx.x	Al-Si-Cu-Mg alaşımlar
4xx.x	Al-Si alaşımlar
5xx.x	Al-Mg alaşımlar
6xx.x	Al-Mg-Si alaşımlar
7xx.x	Al-Zn alaşımlar
8xx.x	Al-Sn alaşımlar

Birinci basamak, ana alaşım elementini ifade eder (Al-saadı, Tunay, 2017) İkinci ve üçüncü basamaklar, alaşımın özel türünü veya sınıfını gösterir. Noktadan sonra gelen dördüncü basamak ise malzemenin döküm (0) veya külçe (1, 2) formunda olduğunu ifade eder (Cardarelli, 2008).

2.5.3. Dövme ve Döküm Alaşımlarının Karşılaştırılması

- Dövme alaşımları genellikle daha yüksek mekanik özelliklere (gerilme dayanımı, sertlik) sahipken döküm alaşımları daha düşük mukavemete sahiptir.
- Dövme alaşımları, şekil verilmesi ve işlenmesi açısından daha esneklik sağlar, ancak döküm alaşımları daha karmaşık şekillerin oluşturulmasında daha uygundur.
- Dövme alaşımları hafiflik ve dayanıklılık gerektiren uygulamalarda tercih edilirken döküm alaşımları daha büyük ve karmaşık parçaların üretiminde yaygın olarak kullanılır (Kaufman, 2006).

2.6 Isıl İşlem

Alüminyum alaşımlarında en yaygın kullanılan ısıl işlem yöntemlerinden biri yaşlandırma işlemidir. Bu işlem sırasında mikro yapıda ikincil fazlar oluşur ve bu fazlar, sıcaklık ve zaman parametrelerine bağlı olarak malzemenin mekanik özelliklerini önemli ölçüde iyileştirir (Onur, 2014).

Aşırı doymuş katı eriyiğin çözeltiye alınmasının ardından su verme işlemi uygulanır ve sonrasında oda sıcaklığında (doğal yaşlanma) ya da denge solvüs eğrisinin altında kalan belirli bir sıcaklıkta (suni yaşlanma) bekletilerek çökelme işlemi gerçekleştirilir. Bu süreç, yaşlandırma ya da çökelme ısıl işlemi olarak adlandırılır. Başka bir deyişle, aşırı doymuş katı fazdan zaman ve sıcaklığın etkisiyle yeni bir fazın oluşması, çökelme sertleşmesi ya da yaşlanma olarak tanımlanır. Çözeltiye alma işleminden sonra su verme işlemi uygulanmakta ve ardından yaşlandırma süreci gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin başarılı olabilmesi için, ilgili alaşımın hangi sıcaklık koşullarında yaşlandırılması gerektiği bilinmelidir (Al-saadı, Tunay, 2017).

Alüminyum ve alaşımları arasında 2xxx, 6xxx ve 7xxx ısıl işlem yapılabilen alaşımlardır. (Kumar ve diğerleri ,2022) 1xxx, 3xxx, 4xxx ve 5xxx ısıl işlem yapılamayan alaşımlardır (Dwight,1998).

Alaşımların temper durumunu ifade etmek için belirlenen bazı gösterimler bulunmaktadır. F gösterimi Malzemenin üretildiği andaki durumunu ifade eder. Bu nedenle, belirli bir standardı bulunmaz. 0 gösterimi ekstrüzyon, dövme, haddeleme gibi şekil değiştirme proseslerinin herhangi bir noktasında ısıl işlem uygulandığını ifade eden kondisyondur. H gösterimi ısıl işlem uygulanmayan alaşımların mukavemetlerini gerinim sertleşmesi yoluyla artırıldığını ifade eden kondisyondur. W gösterimi çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanan alaşımları ifade eden kondisyondur. Alaşım çözeltiye alma ısıl işleminden sonra bir ısıl işlem görmez, doğal yaşlanmaya tabii olur. T gösterimi çözeltiye alma işleminden sonra su verme ve doğal ya da yapay yaşlandırma uygulanabilen alaşımlar ifade eder (Cardarelli, 2008).

Alüminyum Birliği (AA) tarafından yönetilen, işlenmiş alüminyum malzemeleri belirlemeye yönelik Amerikan sistemi ile herhangi bir malzeme için iki parçalı bir referans numarası kullanılır. Örneğin; 6082–T6 için kısa çizgiden önceki dört rakamlı sayı alaşımı, ondan sonraki semboller ise alaşımın sağlandığı ısıl işlem koşulunu veya temperi tanımlar. 3103–H14 için H-numarası işlenerek sertleştirilmiş koşulları tanımlar (Dwight,1998).

Tablo 6'da alüminyum alaşım serileri için ısıl işlemi hakkında veriler yer almaktadır (Dwight, 1998).

Tablo 6

Alüminyum alaşım serileri

Simge	**Açıklama**	**Isıl işlem**
1xxx	Saf alüminyum	Isıl işlem yapılamaz
2xxx	Cu	Isıl işlem yapılabilir
3xxx	Mn	Isıl işlem yapılamaz
4xxx	Si	Isıl işlem yapılamaz
5xxx	Mg	Isıl işlem yapılamaz
6xxx	Mg-Si	Isıl işlem yapılabilir
7xxx	Zn-Mg	Isıl işlem yapılabilir

Alaşımların ısıl işlem ile sertleştirilebilmesi çökelme sertleşmesi uygunluğu üzerinden değerlendirilir. Alaşım elementi bu mekanizmayı destekliyorsa ısıl işlem yapılabilir desteklemiyorsa ısıl işlem yapılamaz olarak adlandırılır. Çökelme sertleşmesi sadece ısıl işlemle sertleşebilen alaşım gruplarına yani 2xxx, 6xxx ve 7xxx serisilerine uygulanabilir. İki aşamalı bir ısıl işlemdir. İlk olarak çözeltiye alma ile doymuş katı çözelti elde edilir. Ardından, su verme sonrası gerçekleşen yaşlandırma işlemi hızlandırılarak ikinci bir faz çökeltilir. Bu faz, dislokasyon hareketlerini engelleyerek alaşıma dayanım kazandırır (Cobden, Alcan, Banbury, 1994).

2.6.1. Isıl İşlem Yapılamayan Alüminyum Alaşımları

1xxx seri çeşitli saflıklarda ticari olarak saf alüminyumdan oluşur. Referans numarasındaki üçüncü ve dördüncü haneler, 99,00'ın üzerindeki minimum alüminyum yüzdesini göstererek saflığı tanımlar. Dolayısıyla '1050', saflığı en az %99,50 olan bir malzemeyi ifade eder. Olası saflıklar %99,00 ile %99,99 arasında değişir. Saf alüminyum zayıftır ve mümkün olan maksimum çekme mukavemeti yaklaşık 150 N/mm^2'dir. Kimya tesislerinde olduğu gibi korozyon direncinin kritik olduğu durumlarda seçilir. Saflık ne kadar yüksek olursa, korozyon direnci o kadar iyi olur, ancak mukavemet o kadar düşük olur. O veya F durumunda saf alüminyum nispeten yumuşaktır ve yüksek şekillendirilebilirliğe ihtiyaç duyulduğunda kullanılır.

3xxx serisi alaşımların nispeten düşük manganez içeriği, bazen magnezyum eklenmesiyle, onları saf alüminyumun yarısı kadar güçlü kılarken, korozyona karşı çok yüksek bir direnç sağlar. Çekme mukavemetleri 200 N/mm^2 veya daha fazlasına kadar çıkar. Tamamen sert temper koşulunda inşaatlarda ana uygulamada binaların ve diğer yapıların kaplamasında kullanılabilir.

4xxx serisi alaşımlar döküm ve kaynak dolgu teli uygulamaları içindir. Doğal anotlamayla üzerinde oluşturulabilen çekici koyu kaplama nedeniyle mimari ekstrüzyonlar üretilebilmektedir.

5xxx serisi alaşımlar ısıl işleme tabi tutulamayan alaşımların ana yapısal kullanımını temsil eder. Magnezyum içeriği %1 ila %5 arasında değişir ve genellikle manganez eklenir. Farklı uygulamalara uyacak şekilde farklı dayanım ve süneklik sağlar. Çoğunlukla levha halinde kullanılırlar. İyi şekillendirilebilirliğe sahiptirler ve sac metal imalatları için doğal seçimdirler. Kaynaklı levha yapımında, tipik olarak F durumunda kullanılırlar. Bu tür bir levha, 300 N/mm^2'yi aşan olası çekme mukavemetlerine sahip, sert ve esnektir. 5xxx serisi ekstrüzyonlar için çok az kullanılır. Bunlar yalnızca O ve F koşullarında oldukça düşük dayanıklılık gerilimiyle mevcuttur. Ekstrüde edilebilirlik 6xxx ile karşılaştırıldığında zayıftır ve çok ince kesitlerin alınması imkansızdır (Dwight, 1998).

2.6.2. Isıl İşlem Yapılabilen Alüminyum Alaşımları

2xxx serisi yüksek mukavemetli ürünlerden oluşur ve büyük ölçüde havacılık endüstrisiyle sınırlıdır. Doğal olarak yaşlandırılmış T4 durumunda, bu alaşımlar, 250 N/mm^2'lik tipik dayanım gerilimi, 400 N/mm^2'ye yaklaşan nihai çekme mukavemeti ve iyi süneklik ile yumuşak çeliğe benzer mekanik özelliklere sahiptir. Tam dayanımlı T6 durumunda, dayanıklılık ve nihai gerilim sırasıyla 375 ve 450 N/mm^2'ye ulaşabilir ancak süneklik azalır. 2xxx serisi alaşımların iyi mekanik özellikleri, düşük korozyon direnci, zayıf ekstrüde edilebilirlik, ark kaynağına uygun olmama ve yüksek maliyet gibi çeşitli olumsuz faktörlerle dengelenmektedir. Ancak ince malzemenin korozyon direnci, kaplamalı levha şeklinde kullanılarak artırılabilir .

6xxx serisi Mg ve Si içeren bu malzemeler, ısıl işlem görebilen alaşımlar arasında en büyük tonajlı kullanıma sahiptir. Makul gücü, iyi korozyon direnci ve mükemmel ekstrüde edilebilirlik ile birleştirirler. Ekstrüzyonların yeterli çözelti işlemi genellikle kalıpta püskürtmeli soğutma yoluyla elde edilebilir ve bazı alaşımlarda havayla soğutma mümkündür. 6xxx malzemeler kolayca kaynak yapılır ancak ısıdan etkilenen bölgede şiddetli lokal yumuşama meydana gelir. Genel olarak daha güçlü ve daha zayıf bir tip olarak ayrılırlar. T6 durumundaki daha güçlü tipteki 6xxx malzeme bazen alüminyumun 'yumuşak çeliği' olarak tanımlanır çünkü gerilimli elemanlar için doğal bir seçimdir. Aslında yumuşak çeliğe göre daha zayıf bir malzemedir, benzer dayanıklılık veya akma gerilimine (250 N/mm^2) sahiptir ancak çekme mukavemeti çok daha düşüktür (300 N/mm^2). Aynı zamanda daha az sünektir. Normalde levha olarak sunulmayan 6xxx alaşımının daha zayıf türü, mükemmel bir ekstrüzyon alaşımıdır. İnce, zor bölümlerin ekstrüzyonu için diğer tüm alaşımlardan daha uygundur ve özellikle iyi yüzey kalitesi önemli olduğunda nispeten düşük gerilim seviyesinde çalışan elemanlar için yaygın bir seçimdir.

7xxx serisi alaşımlar esas olarak çinko ve magnezyum içerir. 6xxx serisi gibi bunlar da daha güçlü veya daha zayıf tipte olabilir. Daha güçlü tip, T6 koşulunda 550 N/mm^2'ye kadar çekme mukavemeti ile tüm alüminyum alaşımlarının en güçlüsünü kapsar. Bu tür alaşımların uygulanması neredeyse tamamen uçaklardadır. Düşük korozyon direncine, zayıf ekstrüde edilebilirliğe sahiptirler ve ark kaynağı için uygun değildirler. 2xxx alaşımlarında

olduğu gibi, korozyonu önlemek için sac kaplamalı olarak da temin edilebilir. 6xxx malzemesine göre üstün mekanik özelliklere sahiptir . Ekstrüde edilebilirlik 6xxx serisi kadar iyi değildir ancak içi boş olan köprü kalıplarda ekstrüzyon mümkündür (Dwight, 1998).

2.7. Alaşım Elementlerin Etkileri

2.7.1 Krom

Ticari alüminyumda 5 ila 50 ppm arasında kullanılır. Elektriksel direnç üzerinde önemli bir etkisi vardır. Krom, alüminyum-magnezyum, alüminyum-magnezyum-silikon ve alüminyum-magnezyum-çinko gruplarının birçok alaşımına genel olarak %0,35'i aşmayan miktarlarda eklenen yaygın bir katkı maddesidir. Bu sınırların aşılması durumunda manganez, demir ve titanyum gibi diğer yabancı maddeler veya ilavelerle çok kaba bileşenler oluşturma eğilimi gösterir. Döküm alaşımlarında fazla krom, bekletme sırasında peritektik çökelme nedeniyle çamur üretecektir. Difüzyon hızı yavaş olan krom işlenmiş ürünlerde ince dağılmış fazlar oluşturur. Bu dağılmış fazlar çekirdeklenmeyi ve tane büyümesini engeller. Krom, tane yapısını kontrol etmek, alüminyum-magnezyum alaşımlarında tane büyümesini önlemek ve ısıl işlem sırasında alüminyum-magnezyum-silikon veya alüminyum-çinko alaşımlarında yeniden kristalleşmeyi önlemek için kullanılır. Gelişen lifli yapılar stresli korozyon duyarlılığını azaltır veya dayanıklılığı artırır. Katı çözeltideki ve ince dağılmış fazdaki krom, alaşımların mukavemetini bir miktar artırır. Isıl işleme tabi tutulabilen alaşımlarda kromun ana dezavantajı, sertleşme fazının önceden var olan krom fazı parçacıkları üzerinde çökelme eğilimi göstermesi durumunda soğutma hassasiyetinin artmasıdır. Krom anodik filme sarı renk verir (Aluminum Association, 1984).

2.7.2 Mangan

Manganez alüminyum alaşımlarında gerinim sertleşmesi ve güçlendirilmesinde iyileşme sağlar ancak sünekliği veya korozyon direncini azaltmaz. Isıl işlem görmeyen malzemelerde kullanıldığında mukavemetini korur. 3xxx serisi alaşımların kullanım alanları pişirme aletleri, radyatörler, buharlaştırıcılar, ısı eşanjörleri ve ilgili boru sistemleridir (Sivasankaran, 2017).

2.7.3. Bakır

Bakır, alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri ve korozyon direnci üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Nascimento ve diğerleri , 2019) . Alüminyum alaşımlarına bakır eklendiğinde mekanik mukavemet ve sertlik artar (Grigoriev ve diğerleri, 2021). Bakır, alüminyumla yüksek çözünürlüğe sahiptir ve alaşımda daha iyi fiziksel özellikler sağlar. Yaygın kullanılan bakır ilaveli alüminyum alaşımları ağırlıkça %2-10 Cu içerir.

Ayrıca, bakır içeren alüminyum alaşımları korozyon açısından en düşük negatif potansiyele sahiptir ve bu da onları çevresel kimyasal işlemlere karşı daha dirençli hale getirir (Mahmood, 2018). Bakırın alüminyum alaşımlarına dahil edilmesi yalnızca mekanik özelliklerini arttırmakla kalmaz, aynı zamanda korozyon direncinin arttırılmasında da önemli bir rol oynar. Birçok çalışmada bildirildiği gibi Cu içeriği arttırılırsa Al alaşımının sertliği artar. %1.6 Cu ilavesine bağlı olarak çekme mukavemeti ve uzama değerlerinde önemli ölçüde artış görülmüştür. Al alaşımındaki bakır ilavesi ile oyuklanma korozyonu hasarının azaldığını tespit edilmiştir. Al alaşımına Cu içeriğinin eklenmesiyle gerilim-korozyon çatlaması iyileştirilmiştir (Ahmed ve diğerleri, 2023).

2.7.4. Çinko

Çinko yalnızca 7xxx serisi alüminyum döküm alaşımlarında bulunur. Aksi takdirde çinko, birçok ikincil (hurda bazlı) basınçlı döküm alaşımında yalnızca kabul edilebilir bir yabancı madde unsuru olarak bulunur. Bu nedenle çinko oldukça nötrdür; bir alaşımın özelliklerini ne artırır ne de azaltır (Rana, Purohit, Das 2012). Diğer alaşım elementlerini de içeren alüminyum-çinko alaşımları, dövme alüminyum alaşımları arasında en yüksek çekme özellikleri kombinasyonunu sunmaktadır. Alüminyum-çinko alaşımları ticari olarak giderek artan bir şekilde kullanılmaya başlanmıştır. Alüminyumda çinko varlığı, alaşımın çözünme potansiyelini artırır; bu nedenle 7072 alaşımı gibi koruyucu kaplama uygulamalarında ve fedakarlık anodları gibi uygulamalarda tercih edilir.

2.7.5. Silikon

Silikon, alüminyum döküm alaşımlarının çoğunda kullanılan en önemli alaşım elementlerinden biridir. İyi dökülebilirlik yani yüksek akışkanlık ve düşük büzülme, düşük yoğunluk (2,34g/cm^3) özelliğinden sorumludur. Bu, döküm bileşenin toplam ağırlığını azaltmada avantaj sağlayabilir. Alüminyum içinde çok düşük çözünürlüğe sahiptir, dolayısıyla sert olan ve aşınma direncini artıran neredeyse saf Si olarak çökelir. Si, Al-Si alaşımlarının termal genleşme katsayısını azaltır. Alüminyuma silikon ilavesi ile işlenebilirlik zayıflar (Rana, Purohit , Das 2012).

2.7.6. Magnezyum

Alüminyumun sertleşme özelliklerinin önemli ölçüde güçlendirilmesini ve iyileştirilmesini sağlar. İyi korozyon direnci , kaynaklanabilirlik veya son derece yüksek mukavemet kazandırabilir . Silikon, magnezyum ile birleşerek güçlendirmeyi sağlayan sertleşme fazı Mg_2Si'yi oluşturur (Rana, Purohit, Das 2012).

2.7.7. Demir

Alüminyumda en yaygın bulunan yabancı madde olan mukavemet artışını sağlamak için bazı saf alaşımlara demir eklenir (Sivasankaran, 2017). Al-Si alaşımlarındaki demir seviyeleri, özellikle süneklik ve kırılma tokluğu gibi mekanik özellikler üzerindeki zararlı etkilerden kaçınmak için mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Alaşımın silikon içeriği için kritik seviyenin üzerindeki demir seviyeleri, döküm ürününde süneklik kaybına sebebiyet vererek ıskarta oranına ve döküm verimliliğinin düşmesine yol açabilir. Bu nedenle, yüksek demir seviyelerinden kaçınılmalıdır (Rana, Purohit ,Das 2012).

2.6.8.Titanyum

Alüminyum alaşımlarındaki Ti içeriğinin tane inceltme için normal uygulamanın üzerindeki bir seviyeye yükseltilmesiyle bazı iyileştirilmiş korozyon özellikleri elde edilebilir. Bununla birlikte, Ti içeriğini peritektik noktanın (%0,15) üzerine çıkarmak, tane incelmesini etkileyebilir ve döküm zorluklarına neden olabilir. %0,015 aralığındaki normal Ti içerikleri ile tane incelmesinin etkili olduğu bulunmuştur. Bununla birlikte, %0,15 civarındaki seviyelere daha büyük Ti ilaveleri üzerine tane yapısı daha kaba hale gelir. Alüminyum alaşımına eklenen titanyum, birincil alüminyum dendritlerin çekirdeklenmesine hizmet eden $TiAl_3$'ü oluşturur. Dendritlerin daha sık çekirdeklenmesi, çok sayıda daha küçük tanecik anlamına gelir. Tane inceltme, titanyum ve boron birlikte kullanıldığında daha iyi olur. %5 titanyum ve %1 bor içeren ana alüminyum alaşımları bu amaç için yaygın olarak kullanılan katkı maddeleridir (Rana, Purohit , Das 2012).

2.8. Alüminyumun Kullanım Alanları

Yüksek mukavemet gibi arzu edilen bir özelliğin birincil gereklilik olduğu durumlarda, nispeten zayıf korozyon direnci gibi olası istenmeyen bir özelliğin üstesinden gelmek için yüksek mukavemetli alaşım, kaplama gibi koruyucu bir kaplanması gerekmektedir. Tersine, saldırılara karşı direncin birincil gereklilik olduğu durumlarda, korozyona daha dayanıklı alaşımlardan biri kullanılacak ve uygun tasarım yoluyla yeterli mukavemetin güvencesi karşılanacaktır. Dövme ürünlerde tüketici uygulamaları için mukavemet ve korozyon direncinin en iyi kombinasyonu 5xxx ve 6xxx serisi alaşımlar arasında bulunur. Çeşitli döküm alaşımları iyi korozyon direncine sahiptir ve alüminyum dökümler, çeşitli kimyasal uygulamalardaki vanalar, bağlantı parçaları ve diğer bileşenlerin yanı sıra pişirme aletleri ve gıda işleme ekipmanlarının bileşenleri olarak da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Tablo 7 ve 8 'de ısıl işlemle sertleştirilemeyen ve sertleştirilebilen alüminyum alaşımlarının uygulama alanları özetlenmiştir (Epstein, Kaufman, Pollak, 1994).

Tablo 7

Isıl işlemle sertleştirilemeyen dövme alüminyum alaşımlarının tipik uygulamaları

Alaşım Serisi	**Tipik Alaşımlar**	**Tipik Uygulamalar**
1xxx	1350, 1060, 1100	Elektrik iletkeni, kimyasal ekipman, tank araçları, sac metal işleri, mutfak gereçleri, dekoratif
3xxx	3003, 3004	Sac metal işleri, kimyasal ekipman, depolama tankları, içecek kutuları, ısı değiştiriciler
4xxx	4043, 4343	Kaynak elektrotları, sert lehim alaşımları
5xxx	5005, 5050, 5052, 5657	Dekoratif ve otomotiv kaplamaları, mimari ve eloksallı uygulamalar, sac metal işleri, ev aletleri, köprü ve bina yapıları, içecek kutu kapakları
5xxx (> %2.5 Mg)	5083, 5086, 5182, 5454, 5456	Denizcilik, kaynaklı yapılar, depolama tankları, basınçlı kaplar, zırh levhaları, kriyojenik uygulamalar, içecek kutularının kolay açılır kapakları, otomotiv yapıları

Tablo 8

Isıl işlemle sertleştirilebilen dövme alüminyum alaşımlarının tipik uygulamaları

Alaşım Serisi	**Tipik Alaşımlar**	**Tipik Uygulamalar**
2xxx (Al-Cu)	2011	Vida makineleri ürünleri
	2219	Yapısal, yüksek sıcaklık
2xxx (Al-Cu-Mg)	2014, 2024, 2618	Uçak yapıları ve motorları, kamyon şasileri ve tekerlekleri, otomotiv yapıları
6xxx	6061, 6063	Denizcilik, kamyon şasileri ve kasaları, yapılar, mimari, mobilya, köprü döşemeleri, otomotiv yapıları
7xxx (Al-Zn-Mg)	7004, 7005	Yapısal, kriyojenik, füze
7xxx (Al-Zn-Mg-Cu)	7001, 7075, 7178	Yüksek mukavemetli yapısal ve uçak uygulamaları

Dövme alaşımları genellikle otomotiv, havacılık, inşaat , denizcilik endüstrilerinde ve elektronik sektörlerinde kullanılır. Örneğin, otomobil şasileri, uçak gövdeleri ve elektrikli bağlantı elemanlarında bu alaşımlar tercih edilir. Bu alaşımlar alaşımlarının hafifliği, dayanıklılığı ve işlenebilirliği, bu tür uygulamalarda çok büyük avantajlar sağlar. Diğer avantajları ise gerilme dayanımı, sertlik gibi yüksek mekanik özellikler, iyi şekillendirilebilirlik, işlenebilirlik ve korozyona karşı direnç göstermeleridir.

Döküm alaşımları genellikle daha düşük mukavemetli ancak daha iyi şekil alabilirlik ve yüksek akışkanlığa sahip olup, karmaşık şekillerin ve büyük parça üretiminin gerektiği durumlarda tercih edilir. Otomotiv sektöründe motor blokları, şasi parçaları, ısıtıcılar gibi bileşenlerde yaygın olarak döküm alaşımları kullanılır. Ayrıca, döküm alaşımlarının düşük maliyetli üretim süreçleri sayesinde, büyük miktarda parça üretimi yapan sektörlerde tercih edilir. Karmaşık şekillerde ve büyük parçalarda üretim verimliliği sağlaması, yüksek üretim hızı ile düşük maliyetli üretim olanakları ve iyi akışkanlık özellikleri sayesinde ince detayların yapılabilmesi diğer avantajları arasında yer alır.

Bunlara ek olarak inşaat sektöründe, binaların dış cephe kaplamalarında, pencerelerde, kapılarda ve diğer yapısal elemanlarda kullanımı yaygındır. Alüminyumun

korozyona karşı dirençli olması, estetik görselliği ve işlenebilirliği, bu malzemenin tercih edilmesinin başlıca nedenlerindendir. Elektrik ve elektronik sektöründe ise, alüminyum alaşımları elektrik iletimi için kabloların üretiminde önemli bir yer tutar ve ayrıca elektronik cihazların yapısal bileşenlerinde iletkenlik ve ısı yayılımını sağlamak için kullanılır. Ambalaj endüstrisinde, alüminyum folyo, içecek kutuları ve diğer gıda ambalajlarında yaygın bir şekilde tercih edilir, çünkü alüminyumun gıda güvenliği ve dayanıklılık özellikleri, ürünlerin uzun süre taze kalmasını sağlar. Ayrıca, alüminyum alaşımları tıbbi cihazlar, spor ekipmanları, ısıl işlem gerektiren makineler gibi çeşitli endüstriyel uygulamalarda da kullanılır (Kaufman, 2006).

2.9 Ekstrüzyon Prosesi

Ekstrüzyon daha çok hafif metal endüstrisinde karşımıza çıkan bir imalat yöntemi olup silindir şeklindeki bir döküm biyetin kovan olarak adlandırılan bir alıcı içerisinde sıkıştırılarak bir kalıptan geçirilmesi suretiyle, kesit alanının daraltılmasını içeren bir metal şekillendirme işlemidir (Aydın, Şendeniz, Demirci, 2009). Bir külçenin döküm yapısını genel olarak işlenmiş ürün olarak adlandırılan şeye dönüştürürken malzemelerin boyutunu ve şeklini değiştirmenin birincil yolu olarak kullanılan ektrüzyon işlemi tipik olarak nispeten yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilir çünkü malzemenin daha düşük akış gerilimi, daha büyük kesit azaltımlarının elde edilmesine olanak tanırken güç gereksinimlerini ve işlem sürelerini azaltır (Sheppard, 2013). Ekstrüzyon öncesinde ve sonrasında gerçekleştirilen ısıl, mekanik ve kimyasal gibi işlemler ürünün özelliklerini büyük ölçüde etkilemektedir. Alüminyum ekstrüzyon işlemi sıcak olarak yapılır; bu süreçte biyetler 420-470°C aralığında ısıtılır. Kalıplar ise yaklaşık 450°C'ye kadar ısıtılır ve pres sonrası elde edilen profilin sıcaklığı 500°C'nin üzerine çıkar. Ekstrüzyon presinden çıkan profil soğutulur, ardından soğuk germe işlemi uygulanır ve belirlenen boyuta göre kesilir. Sonrasında profiller istenen özelliklere ulaşmak için çeşitli ısıl işlemlerden geçirilir (Aydın, Şendeniz, Demirci, 2009).

Ekstrüzyon prosesinin direkt ve indirekt ekstrüzyon olarak iki çalışma modu bulunmaktadır. En büyük fark, indirekt ekstrüzyonda kütük ile kap arasında sürtünme olmaması, direkt ekstrüzyonda ise kütüğün dış kabuğunun ekstrüzyon ilerledikçe kaba göre hareket etmesidir. Dolayısıyla direkt ekstrüzyonda kütüğün yüzeyi kap duvarında kesilir veya kap duvarı boyunca kayar. Bunun gerçekleştirilme kolaylığı yağlayıcının seçimine ve

uygulanmasına bağlıdır. Her durumda, kütüğün uzunluğuna bağlı olarak ekstrüzyon yükünün bir kısmı, kütük ile kap arasındaki sürtünmenin üstesinden gelmek için veya iç malzemenin kap duvarına bitişik daha yavaş hareket eden çevresel katmandan kesilmesi için harcanır. Bu durum akış davranışında önemli farklılıklara neden olur (Sheppard, 2013).

Ekstrüzyon prosesi entegre birim süreçlerden oluşmaktadır; homojenleştirme, çalışma sıcaklığına ısıtma, ekstrüzyon germe işlemini takiben çözelti işlemi ve yaşlandırma işlemleri yapılır. Alüminyum alaşımlarının özellik kontrolü açısından önem taşıyan mikroyapısal özellikleri şunları içerir:

(a) güçlendirici çökeltilerin tutarlılığı ve dağılımı;

(b) yeniden kristalleşme derecesi;

(c) tane ve/veya alt tane boyutu ve şekli;

(d) kristalografik doku

(e) dispersoidler ve kurucu fazlar dahil olmak üzere intermetalik parçacıkların boyutu ve dağılımı.

Bu değişkenlerin alüminyum alaşımlarının özellikleri üzerindeki etkisinin anlaşılabilmesi, geleneksel birincil işleme yöntemlerinde değişiklikler yapılarak ürün performansının yükseltilmesi çabalarına yol açmıştır.

Ekstrüzyon işlemi biyete yüksek sıcaklık ve basınç altında gerekli şekil değişikliğini sağlar. Sıcaklık, ekstrüzyon sıcaklığının en düşük erime fazının sıcaklığına bölünmesi olarak tanımlanan homolog sıcaklık Th olarak ifade edilir. Alüminyum ve alaşımları yüksek bir istifleme hatası enerjisine sahip olduğundan, sıcak deformasyon sırasında, yani 0,5 T_h'nin üzerindeki sıcaklıklarda, kararlı bir poligonize alt yapıya yol açmak için normalde yeterli dinamik iyileşme meydana gelir. Taneler akış yönünde uzamasına ve yeniden kristalleşmemesine rağmen alt taneler sıcak işleme sırasında eş eksenli kalır . Alaşım ilavelerinin bir kısmı sıcak işlem sırasında çözelti halindedir ancak dispersoid oluşturan geçiş elemanları halihazırda çökelmiştir ve çalışma yönünde yayılabilir. Dispersoidlerin ince bir dağılımı, statik yeniden kristalleşmeyi geciktirir veya önler ve sonraki işlemler sırasında

uzun veya 'lifli' tanelerin tutulmasına yardımcı olur. İşlenmiş ürün istenen mikro yapıyı geliştirmek için ısıl işleme tabi tutulabilir, yani çözelti haline getirilebilir, su verilebilir, gerilebilir ve yaşlandırabilir (Sheppard, 2013). Ekstrüzyon sürecinde gerçekleşen yüksek plastik deformasyon, önemli miktarda sıcaklık artışına yol açar. Bu sıcaklık artışı, malzemenin deformasyon direnci, takozun sıcaklığı ve boyutu, ekstrüzyon hızı ve takım sıcaklıkları gibi faktörlerden etkilenir. Özellikle AA2xxx, AA6xxx ve AA7xxx serisi alüminyum alaşımlarında, bu sıcaklık artışı üründe yırtılmalara neden olabilir ve yüzeyde istenmeyen iri taneli bir yapı oluşumuna sebebiyet verebilir. Sıcaklık artışını kontrol altına almak için, ekstrüzyon öncesinde homojenleştirme ve soğutma gibi işlemler uygulanmalı ve bu işlemler malzemenin yüksek sıcaklık dayanım özelliklerini iyileştirmelidir. Ayrıca, ekstrüzyon parametrelerinin optimize edilmesi de sıcaklık artışının kontrolü için büyük önem taşır (Aydın, Şendeniz, Demirci, 2009).

2.9.1. Homojenizasyon

Homojenleştirme işleminin temel amacı heterojen bir morfoloji sergileyen döküm külçeyle başlayan işlemdeki ayrışmayı azaltmak, düşük erime noktalı fazları çıkarmak ve işlenebilirliği artırmaktır. Bu ısıl işlem aynı zamanda krom, manganez ve zirkonyum gibi dispersoid oluşturan elementlerin çökeltilmesine de hizmet eder, böylece işleme sırasında tane kontrolü rolünü yerine getirebilirler (Sheppard, 2013). Homojenizasyon sırasında katı çözeltide bazı elementlerin yapısal dengelenmesi ve mikrosegregasyonunun azaltılmasıyla eş zamanlı olarak matriste aşırı doymuş elementlerin dispersoidler olarak çökelmesi, kararsız fazların veya çökeltilerin çözünmesi, $Al_6(Fe,Mn)$'nin α-$Al_{12}(Fe,Mn)_3Si$'ye dönüşümü ve kararlı metaller arası parçacığın kabalaşması gibi birkaç yapısal yapısal değişiklik meydana gelir. Homojenizasyon sırasında döküm külçe alaşımın solidus sıcaklığının yaklaşık 10-100°C altı ile istenen ilk sıcak işleme sıcaklığının 20-100°C üstü aralığında bir sıcaklıkta ısıtılır ve bu sıcaklıkta bekletilir (Gandhi, 1999).

Homojenizasyon işlemi, konsantrasyon değişimlerinin kabul edilebilir bir seviyeye inmesini sağlamak için metalin yeterli bir süre boyunca yüksek sıcaklıkta tutulmasını içermesinden dolayı kontrol faktörü, kütle transferinin meydana gelebileceği hızı belirleyen alaşım elementlerinin yayılımıdır. Dolayısıyla homojenleştirme süreci bir kütle aktarım problemidir ve kontrol denklemlerinin üstel bir terim içeren Arrhenius tipinde olması

beklenir. Benzer şekilde, yeniden ısıtma sırasında çökelme, kütle aktarımı sorunu oluşturacaktır. Bunun tipik bir örneği, belirli ısıtma koşulları altında Mg_2Si fazının β' → β" → β"' değiştiği 6xxx alaşımlarının yeniden ısıtılmasıdır. Ekstrüzyon, dislokasyonların yardımıyla atomik düzlemlerin birbiri üzerinden kaydığı ve atomik bağların ayrı ayrı kırıldığı ve yeni bağların oluştuğu bir deformasyon sürecidir. Plastik akış bu eylemin sonucudur ve makroskobik olarak gözlemlenen değişiklik, bireysel atomik olayların toplamıdır. Plastik akışın en önemli iki özelliği, düşük enerji bariyerleri ve malzemenin hareket edebileceği boşluklarla birlikte yüksek enerjili atomik konfigürasyonlar sağlayan dislokasyonlardır. Çözünme (solüsyonlaştırma) ve yaşlanma da difüzyon tarafından kontrol edilir ve bu nedenle termomekanik sürecin bir kütle transferi problemi olduğu sonucuna varılabilir (Sheppard, 2013).

2.8.2. Çalışma Sıcaklığına Isıtma

Ekstrüzyon öncesinde alüminyum biyetlerin uygun sıcaklığa ısıtılması, malzemenin plastik deformasyonunu kolaylaştırır ve enerji tüketimini azaltır (Saha, 2000).

2.9.3. Çökelme Sertleşmesi

Çökelme sertleşmesi işlemi; solüsyona alma, su verme ve yaşlandırma işlemlerinden oluşmaktadır (Dilmeç, Tınkır ve Arıkan, 2015). 6xxx serisi alüminyum alaşımının mukavemeti, temel alaşım elementlerinin varlığı nedeniyle iki aşamalı bir ısıl işlem süreciyle artırılabilmektedir. Bu süreç, çözeltiye alma ve yapay yaşlandırma işlemleri olarak adlandırılan iki temel aşamadan oluşmaktadır (Yüksel, 2017).

Bu ısıl işlem, genellikle soğuma veya ısınma sürecinde allotropik bir değişim yaşanmaması sebebiyle, çökelme veya yaşlanma yoluyla mekanik dayanım ve sertlik kazandırma amacıyla uygulanır. Bu işleme tabi tutulan alaşımlar, alaşım elementlerinin sıcaklığa bağlı katı çözünürlüğünü göstermelidir. 6xxx serisi alaşımlarda sertleşme, sıcaklık düştükçe magnezyum (Mg) ve silisyumun (Si) çözünürlüğünün azalmasıyla Mg_2Si bileşiklerinin çökmesi sayesinde gerçekleşir. Alaşımın mekanik özellikleri, oluşan çökeltilerin türüne, boyutuna ve dağılımına bağlı olarak zamanla değişir. Yaşlandırma tepkisini etkileyen bir diğer faktör, parçanın çözündürme sıcaklığından soğuma sıcaklığına

olan hızıdır. Bu hız, alaşımda elde edilen aşırı doygunluk miktarıyla ilişkilidir (Cavazos, Colás, 2001).

2.9.4. Çözeltiye Alma

Bu aşamada, alüminyum alaşımı yüksek bir sıcaklığa (genellikle 450-550°C aralığında) ısıtılır. Bu sıcaklık, alaşım içindeki bakır, magnezyum, silisyum gibi çözünebilir elementlerin katı çözelti haline gelmesini sağlar. Bu işlem, malzemenin homojen bir mikro yapıya sahip olmasını sağlar (Polmear, 2006). 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında çözeltiye alma işlemi, genellikle 460-540°C sıcaklık aralığında uygulanmakta ve ardından su verme işlemi gerçekleştirilmektedir. Bu işlemin temel amacı, tüm alaşım elementlerini çözelti içerisinde çözerek aşırı doymuş α katı eriyiğini oluşturmaktır (Yüksel, 2017).

2.9.5. Hızlı Soğutma

Çözeltiye alma işleminden sonra, malzeme su verme işlemi ile hızla veya hava yolu ile soğutulur. Hızlı soğutma, çözünen elementlerin katı çözelti halinde kalmasını sağlar ve çökelme için gerekli olan aşırı doygun bir yapı oluşturur. Hızlı soğutma, malzemenin oda sıcaklığında kararsız bir duruma gelmesine neden olur (Davis, 1999).

2.9.6. Yaşlandırma

Yaşlandırma işlemi işlemi doğal veya yapay olabilir. Aşırı doygun katı çözelti içinde ikincil fazların çökelmesi işlemidir. Doğal yaşlandırma, malzemenin çözeltiye alınması ve su verilmesinin ardından oda sıcaklığında bekletilerek yapılan bir işlemdir (Dilmeç, Tınkır ve Arıkan, 2015).

Yapay yaşlandırma daha yüksek sıcaklıklarda genellikle 100-200°C'de kontrollü bir şekilde gerçekleştirilir (Saraç, Durna, 2023).

Çökelme sertleşmesi sırasında oluşan çökelmeler, malzemenin dislokasyon hareketini engelleyerek mukavemetini artırır. Bu çökelmeler, özellikle GP bölgeleri (Guinier-Preston zones) ve θ"/θ' fazları gibi ara fazlar şeklinde ortaya çıkar. Bu fazlar,

alaşımın kimyasal bileşimine ve yaşlandırma parametrelerine bağlı olarak değişiklik gösterir (Polmear, 2006).

Özellikle 6xxx serisi alüminyum alaşımlarında, çözeltiye alma ve yaşlandırma sıcaklıkları ile süreleri, elde edilecek sertlik ve mekanik özellikler üzerinde belirleyici etkiye sahiptir. Yaşlandırma aşamasında, aşırı doymuş eriyik içerisinde çökelme süreci, aşağıda belirtilen şekilde meydana gelmektedir.

$\alpha \longrightarrow GP\ (Mg_1Si_1) \longrightarrow \beta''(Mg_5Si_6) \longrightarrow \beta'(Mg_9Si_5) \longrightarrow \beta\ (Mg_2Si)$ (Yüksel, 2017)

Alaşımda en yüksek sertlik, β'' fazının oluşumuyla sağlanabilir çünkü β'' fazının tamamen β fazına dönüşmesi, aşırı yaşlandırma olarak adlandırılır. Yüzey merkezli kübik kristal yapıya sahip denge fazı olan β, alüminyumda sertliğin düşmesine yol açmaktadır. Çökelen fazın özellikleri ve miktarı, alüminyum alaşımının sertlik gibi mekanik özelliklerini ve tane sınırlarında mikrogalvanik hücreler oluşturması nedeniyle taneler arası korozyon direncini belirlemektedir (Yüksel, 2017).

2.9.7. Mikro Yapı ve Çökelti Fazları

Çökelme sertleşmesi sürecinde, 6000 serisi alüminyum alaşımlarında Mg ve Si atomlarının çözünmesi ve Mg_2Si fazının oluşumu kritik rol oynar. Sıcaklık ve zamanın artırılmasıyla, çözünen Mg ve Si oranı artar, bu da yaşlandırma sonrası daha fazla Mg_2Si çökeltisinin oluşmasına ve dolayısıyla sertliğin artmasına yol açar (Saraç, Durna, 2023).

2.10. Mekanik Testler

Bir malzemenin mekanik davranışı, uygulanan yük veya kuvvetle ilişkili olarak tepki veya şekil değişikliğini yansıtır. Malzemelerin mekanik özellikleri, hizmet koşullarını mümkün olduğunca yakından taklit eden dikkatlice tasarlanmış laboratuvar deneyleri yapılarak belirlenir. Dikkate alınması gereken faktörler arasında uygulanan yükün doğası ve süresi, ayrıca çevresel koşullar yer alır. Yük, gerilme, sıkıştırma veya kayma olabilir ve büyüklüğü zamanla sabit kalabilir veya sürekli olarak dalgalanabilir. Uygulama süresi sadece bir saniyenin bir kısmı olabileceği gibi, birçok yıl sürebilir. Hizmet sıcaklığı önemli bir faktör olabilir. Testlerin nasıl yapıldığı ve sonuçlarının nasıl yorumlandığı konusunda bir tutarlılık olması zorunludur. Bu tutarlılık, standartlaştırılmış test teknikleri kullanılarak

sağlanır. Bu standartların oluşturulması ve yayınlanması genellikle profesyonel dernekler tarafından koordine edilir. Amerika Birleşik Devletleri'nde en aktif kuruluş, Amerikan Test ve Malzeme Derneği (ASTM) olup, yıllık ASTM Standartları Kitabı her yıl yayımlanır ve güncellenir (Callister , Rethwisch, 2020).

2.10.1. Sertlik

Önemli bir mekanik özellik olan sertlik malzemenin küçük bir çökme veya çizik gibi yerel plastik deformasyona karşı direncinin bir ölçüsüdür. Küçük bir çentik açıcı, kontrollü yük ve uygulama hızı koşulları altında test edilecek malzemenin yüzeyine zorla sokularak, ortaya çıkan çentik derinliği veya boyutunun ölçülüp sertlik numarası ile ilişkilendirildiği nicel sertlik teknikleri geliştirilmiştir. Malzeme ne kadar yumuşaksa, çentik o kadar büyük ve derin olur ve sertlik endeks numarası o kadar düşük olur. Ölçülen sertlikler yalnızca görece olup farklı tekniklerle belirlenen değerler karşılaştırılırken dikkatli olunmalıdır. Sertlik testleri basitlik, ucuzluk, az deformasyon ve çekme dayanımı gibi diğer mekanik özelliklerin sertlik verilerinden tahmin edilebilirliği birkaç sebepten dolayı diğer mekanik testlerden daha sık yapılır. Rockwell, Brinell ve Knoop ve Vickers Mikroindentasyon gib sertlik testleri yöntemleri bulunmaktadır (Callister , Rethwisch, 2020).

2.10.2. Çekme Testi

En yaygın mekanik gerilme-şekil değiştirme testlerinden biri gerilme testidir. Genellikle çatlama noktasına kadar, uzunlamasına eksende tek eksenli bir şekilde artan bir gerilim yükü uygulanarak şekil değiştirilir. Çekme testi numunesi "kemik" şeklide olup test sırasında şekil değişikliğinin uzunluğu boyunca uniform bir kesite sahip olan dar merkezi bölgeye sınırlanması için seçilmiştir ve uçlarında kırılma olasılığını azaltmak için tasarlanmıştır. Standart çap genellikle yaklaşık 12.8 mm (0.5 inç) olup, daraltılmış bölüm uzunluğunun bu çaptan en az dört katı olması gerekir; yaygın olarak 60 mm (2.25 inç) kullanılır. Gerilme uzunluğu, çekme dayanıklılığı hesaplamalarında kullanılır. Standart değer 50 mm (2.0 inç)dir. Çekme testi numunesi test cihazının tutma kollarına uçlarından yerleştirilir. Çekme test makinesi sabit bir hızda uzatacak şekilde tasarlanmıştır ve yük hücresi ile anlık uygulanan yükü ve ekstensometre kullanılarak meydana gelen uzamaları sürekli ve aynı anda ölçer. Bir gerilme-şekil değiştirme testi genellikle birkaç dakika sürer

ve test örneği kalıcı olarak şekil değiştirerek genellikle kırılır. Çekme testinin çıktısı bir bilgisayar üzerinde, yük veya kuvvet ile uzama arasındaki ilişki olarak kaydedilir. Bu yük-şekil değiştirme özellikleri numunenin boyutuna bağlıdır. Mühendislik gerilmesi (σ), aşağıdaki ilişki ile tanımlanır;

$\sigma = F / A_0$ (Callister, Rethwisch, 2020)

Burada, F, numunenin kesitine dik olarak uygulanan anlık yükü (newton (N) veya pound kuvveti (lbf) cinsinden) ve A_0, herhangi bir yük uygulanmadan önceki orijinal kesit alanını (m^2 veya in^2 cinsinden) ifade eder.

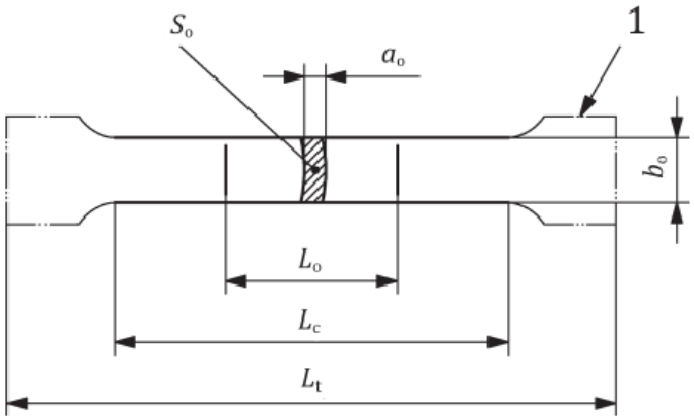
Mühendislik gerilmesinin birimleri, megapaskaller (MPa) (SI) olup, 1 MPa = 10^6 N/m^2 ve inç kare başına pound kuvveti (psi) (geleneksel ABD birimi) cinsindendir. Mühendislik şekil değiştirmesi (ε) ise şu şekilde tanımlanır;

$\varepsilon = l_i - l_0 / l_0 = \Delta l / l_0$ (Callister, Rethwisch, 2020)

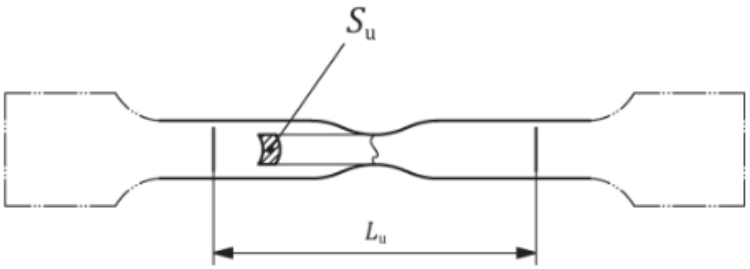
Burada, l_0, herhangi bir yük uygulanmadan önceki orijinal uzunluğu , l_i anlık uzunluğu ifade eder. $l_i - l_0$ miktarı Δl olarak gösterilir ve bu, orijinal uzunluğa referansla, belirli bir anda şekil değiştirme uzaması veya uzunluktaki değişikliktir.

Mühendislik şekil değiştirmesi birimsizdir, ancak genellikle metre/metre veya inç/inç cinsinden kullanılır. Bazen şekil değiştirme, yüzde olarak da ifade edilir; bu durumda şekil değiştirme değeri 100 ile çarpılır (Callister , Rethwisch, 2020).

Şekil 1'de Çekme testi numunesi gösterilmiştir. (TS EN ISO 6892-1)



a)



b)

Şekil 1: Çekme testi numunesi a) test öncesi b) test sonrası

Kaynak: (Callister, Rethwisch, 2020)

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA YÖNTEMİ/MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 . Deneylerde Kullanılan Malzemeler

Bu çalışmada ekstrüzyon sonrası kendiliğinden ve ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulan AA6005 numunelerinin farklı sıcaklık ve sürelerde suni yaşlandırma işlemi ile mekanik özellikleri ve mikroyapısal değişimleri incelenmiştir. Spektral analiz işlemi Arun Techonolgy Spektrometre Artus 8 marka cihaz kullanılarak yapılmıştır.

Kimyasal analiz Spectro/xSort XH003 cihaz ile yapılmıştır. Şekil 2'de kullanımı gösterilmiştir.

Tablo 9'da, AA6005 ekstrüzyon profili numunelerinin kimyasal analiz sonuçları ve TS EN 573-3 +A1 standardına ait veriler sunulmuştur (TSE, 2022).



Şekil 2: Kimyasal analiz

Kaynak: (Çobiltum, 2025)

Tablo 9

TS EN 573-3 +A1 standardı ve AA6005 kimyasal analiz sonuçları

Kimyasal Gösterim	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Diğer	Al
EN AW-Al SiMg Standart	0,6–0,9	0,35	0,1	0,1	0,40–0,6	0,1	0,1	0,15	Kalan
Numune Analizi	0,686	0,23	0,013	0,036	0,53	0,009	0,039	0,09	98,37

3.2. Deneylerin Yapılışı

3.2.1. Eriyik Hazırlama ve Biyet Döküm

Deneylerde kullanılacak numuneler yarı sürekli döküm yöntemi ile AA6005 alaşımına sahip 178 mm çapında biyet formunda üretilmiştir.

Biyetlerin üretimi için Şekil 3'te görüleceği üzere rejeneratif reverber tipli ergitme fırınlarında alaşımlar hazırlanmıştır.

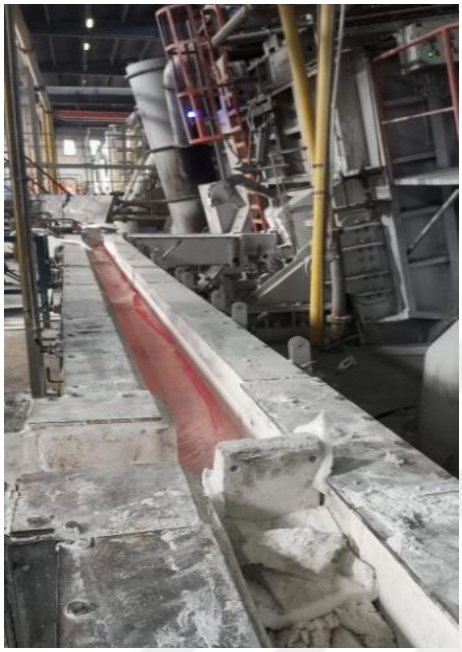


Şekil 3: Ergitme fırını

Kaynak : (Sistem Alüminyum, 2025)

Ergitme fırınında hazırlanan eriyik 720°C'de dökülerek biyet haline getirilmiştir.

Döküm prosesi Şekil 4'te gösterilmiştir.



a)



b)

Şekil 4: Döküm prosesi a) eriyik döküm prosesi b) biyet döküm prosesi

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

AA6005 alaşımındaki biyetler sırası ile 7280 mm boyunda dökülmüş olup, biyet kesim testeresinde döküm başı ve döküm sonu fireleri kesilerek 7000 mm uzunluk elde edilmiştir.

Döküm sonrası oluşan kimyasal ve mikroyapısal düzensizliklerin giderilmesi ve daha iyi şekillendirilebilir ve mekanik özellikler elde edilmesi amacıyla kesilen biyetler homojenizasyon fırınında çözeltiye alma işlemine tabi tutulmuştur.

Homojenizasyon fırını Şekil 5'te verilmiştir



Şekil 5: Homojenizasyon fırını

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

Homojenizasyon işlemi sonrasında biyetler biyet ocağına yüklenmiştir. Biyet ön sıcaklığı 470-485°C ve arka sıcaklığı ise 475-485°C aralığında tutulmuştur. Yüklendikten sonra ısıtılan biyetler 696 mm boyutlarına kesilmiş bu biyetler ekstrüzyon prosesi için hazır hale gelmiştir.

3.2.2. Ekstrüzyon

Kesilen biyetler prosese verilmiştir. Ekstrüzyon işlemi için hava alma basıncı 170 bar ayarlanmıştır. Kendiliğinden soğutulacak profil için çıkış sıcaklığı ekstrüzyon işleminin başlarında 520°C sıcaklık değerlerindeyken; ekstrüzyon kalıbı sürtünme ile ısındıkça ekstürüzyon işlemi sonlarında 540°C seviyelerine çıkmıştır. Ekstürüde edildikten sonra pres çıkış tarafında herhangi bir soğutma işlemi uygulanmadan kendiliğinden soğumaya bırakılan profil şiş yardımı ile birinci dakika sonunda 420°C, ikinci dakika sonunda 335°C ölçülmüştür. Ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulacak profil için çıkış sıcaklığı ekstrüzyon işleminin başlarında 525°C sıcaklık değerlerindeyken ekstrüzyon işlemi sonlarında 540°C seviyelerine çıkmıştır. Ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulan profiller şiş yardımı ile birinci

dakika sonunda 200°C, ikinci dakika sonunda 165°C ölçülmüştür. Şekil 7'de üretilen profilin çıkış sıcaklığının ölçümü paylaşılmıştır.

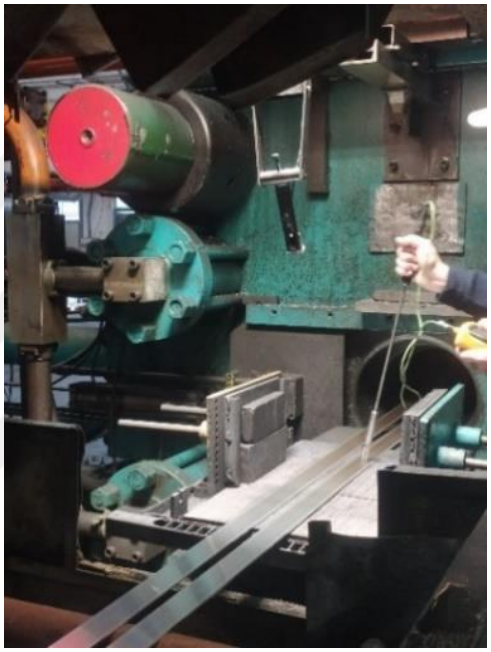
Şekil 6'da kesilen biyetin ektrüzyon prese iletilmesi verilmiştir.

Şekil 7'de üretilen profilin çıkış sıcaklığının ölçümü paylaşılmıştır



Şekil 6: Biyetin ekstrüzyona iletilmesi

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)



Şekil 7: Profilin şiş ile sıcaklık ölçümü

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

Ekstrüzyon işlemi sonrası profillerin bir kısmı kendiliğinden soğutulmuştur. Bir kısmı ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulmuştur.

Profillerin ekstrüzyon sonrası soğuma türleri Şekil 8'de verilmiştir.





a) b)

Şekil 8: Ekstrüzyon işlemi sonrası kendiliğinden soğutma b) ekstrüder fan ve sprey su ile soğutma

Kanyak: (Sistem Alüminyum, 2025)

Oda sıcaklığına getirilen profillere germe işlemi yapılarak 1000 mm boyuna kesilmiştir. Profiller soğutma türüne göre baş kısımlarından boyanmış olup sonra kesim işlemine alınmıştır.

Germe, kesme işlemleri ve kesilen numuneler Şekil 9'da verilmiştir.



a)



b)



c)

Şekil 9: a) Germe işlemi b) kesme işlemi c) kesilen numuneler

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

Solüsyona alma işlemi, alüminyum biyetlere uygulanan homojenizasyon süreci ile başlar ve profilin kalıptan çıktıktıktan sonra soğuma bitene kadar devam eder.

3.2.3. Suni Yaşlandırma

Üretim tamamlandığında, AA6005 alaşımındaki kendiliğinden soğutulan ve ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulan profillere ısıl işlem fırınlarında 165-230°C sıcaklık aralığında seçilen 165°C, 180°C, 210°C ve 230°C 'lerde her sıcaklık için 1 saatten başlayarak 10 saate kadar süren sürelerde suni yaşlandırma işlemi yapılmıştır. Toplam 82 adet numune vardır. 80 adeti yaşlandırma işlemi görmüştür.

Suni yaşlandırma süreleri ve sıcaklıkları literatür araştırması ve sanayide uygulanması tercih edilen değerlerden referans alınarak belirlenmiştir. Literatürde AA6005, AA6061 ve AA6082 tipi alaşımlarda çözeltiye alma süresi ve çözeltiye alma sıcaklığı (540 °C) sabit alınarak farklı sıcaklık ve sürelerde yaşlandırma koşullarının etkileri araştırılmıştır. Yaşlandırma sıcaklıkları 170 °C, 200 °C ve 250 °C olacak şekilde , yaşlandırma süreleri ise en düşük 10 dakika ve en yüksek 100 dk olacak şekilde belirlenip 10 dakikalık aralıklarla 10 farklı zamanda çalışıldığı bildirilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda üç alaşım içinde en yüksek sertlik değerlerine 170 °C'de ulaşılmıştır. Suni yaşlandırma sıcaklıklarının artışıyla sertlik verilerinin düşerken en yüksek sertlik değerine ulaşma zamanın da düştüğü de bildirilmiştir. (Saraç, Durna,2023).

Suni yaşlandırma işlemi için Nabertherm marka NA120/650 tip ısıl işlem fırını kullanılmıştır.

Kullanılan ısıl işlem fırını Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10: Isıl işlem fırını

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

Alaşımlar fırınlanmadan önce biaks ile numaralandırılmıştır. 2 farklı yöntem ile soğutulan alaşımlar için aynı sıcaklık ve süreler kullanılmış olup, alaşımlar eş zamanlı olarak aynı fırında yaşlandırılmıştır. Deney numunelerinin soğuma işlemi oda sıcaklığında gerçekleşmiştir.

3.2.4. Çekme Testleri ve Sertlik Ölçümü

Profillerin et kalınlığı 4 mm olup TS EN ISO 6892-1:2019 standartına uygun olacak şekilde CNC ile papyon şeklinde l_0 80 mm, l_c 90 mm ve l_t 300 mm ölçülerinde çekme testi numuneleri hazırlanmıştır. Numunelere oda sıcaklığında, ALŞALAB MCK300 marka cihaz ile çekme testi uygulanmıştır.

Şekil 11' de çekme cihazı ve deneyde kullanılan çekme numunelerinden örnek verilmiştir.





a) b)

Şekil 11: a) Çekme testi cihazı b) çekme testi uygulanan numune

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

Sertlik ölçümü için ayrıca CNC ile numune kesim işlemi de yapılmıştır. Emcotest Duravision markalı makro sertlik cihazı ile numunelerin Brinell sertlik ölçümleri yapılmıştır. Sertlik ölçümlerine hazırlık için numulerin yüzeyleri zımparalanmıştır. Her numunenin zımparalanan yüzeyinden 3 defa ölçüm yapılmıştır ve 3 ölçümün ortalaması alınarak sertlikleri belirlenmiştir. Her bir iz arasında, bilye çapının en az dört katı kadar mesafe bırakılmasına dikkat edilmiştir. Sertlik ölçümleri 2.5 mm çapında bilye, 10 kg ön yük ve 62,5 kg toplam yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Sertlik ölçümü için kullanılan makro sertlik cihazının görseli Şekil 12'de verilmiştir.



Şekil 12: Sertlik ölçüm cihazı

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

3.2.5. Metalografik Çalışmalar

Numuneler metalografik incelemeler yapmak adına Struers marka DISCOTOM10 model metalografik kesme cihazı kullanılarak ekstrüzyon yönüne dik ve paralel olacak şekilde, sıcak bakalit işlemine alınmak üzere 1 cm^3 boyutlarında kesilmiştir.

Şekil 13' de numune kesme cihazı verilmiştir.



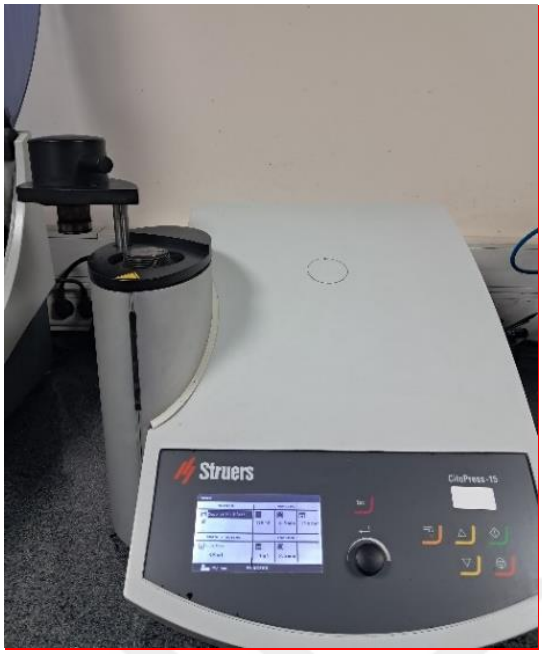
Şekil 13: Numune kesme cihazı

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

Numunelerin kesim işlemi tamamlandıktan sonra Struers marka CITOPRES15 tip sıcak bakalite alma cihazı kullanılarak bakalite alma işlemi yapılmıştır. Belirlenen her sıcaklıktaki, 1 saat , 5 saat ve 10 saat süre ile yaşlandırılan numuneler dik ve paralel kesim yönlerini temsil edecek şekilde ve aynı yönler aynı bakalitte olacak şekilde bakalite alınmıştır.

Bakalite alma işlemi için 29 g sıcak bakalit tozu kullanılmıştır. Dört buçuk dakika, 175 °C ve 250 bar sıkıştırma basıncı ve iki buçuk dakika soğutma işlemi uygulanmıştır.

Şekil 14'de bakalite alma işlemi verilmiştir.



Şekilde 14: Bakalite alma cihazı

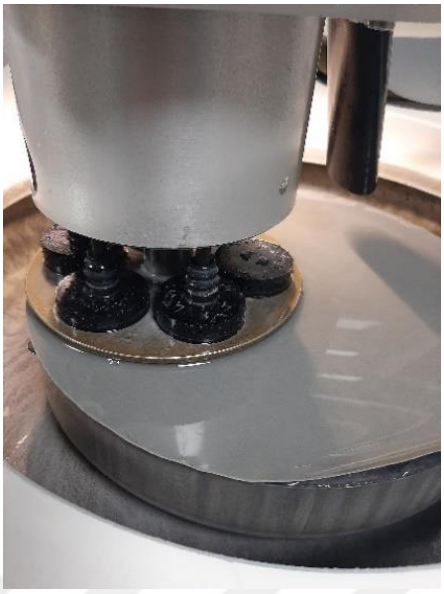
Kaynak : (Sistem Alüminyum, 2025)

Bakalite alma işleminden sonra numuneler Struers marka LABOFORCE100 tip zımparalama, parlatma cihazı ile sırasıyla 600, 1200 ve 2500 mesh numaralı SiC zımparalarla her bi zımpara boyutu için 5 dakika süre ile zımparalanmıştır. Ardından parlatma işlemi için 3 µm çuha üzerine 3 µm elmas süspansiyon yağlayıcı olarak kullanılmıştır. Her 30 saniyede sıkılarak parlatma işlemi 5 dakika boyunca yapılmıştır.

İşlem sonunda numuneler su ve sabun ile temizlenmiştir ve hava tutularak kurulanmıştır. Son olarak colloidal silika çuhası ile 50 nm alkaline kolloidal silika sıkılarak son parlatma işlemi yapılmıştır.

Zımparalama ve parlatma işlemi için kullanılan cihazlar Şekil 15'de verilmiştir.





a) b)

Şekil 15: a) Zımparalama işlemi b) parlatma işlemi

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

İşlem sonunda numuneler dağlama işlemine hazır hale getirilmek üzere tekrar temizlenmiş ve kurulanmıştır. Dağlama işlemi için için %2'lik HF çözeltisi kullanılmıştır. Dağlanmış numunelerin optik mikroskop incelemeleri NIKON ECLIPSE MA200 marka optik mikroskop ile yapılmıştır. SEM-EDS analizleri ise JEOL JCH-6000PLUS model cihaz ile yapılmıştır.

Şekil 16'da kullanılan optik mikroskop verilmiştir.



Şekil 16: Optik mikroskop

Kaynak: (Sistem Alüminyum, 2025)

DÖRDÜNCÜ BÖLÜM
ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu çalışmada AA6005 alaşımına sahip 82 adet deney numunesi hazırlanmıştır. 40 adet kendiliğinden soğutulduktan sonra suni yaşlandırma işlemi yapılan , 40 adet ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra suni yaşlandırma işlemi yapılan ,1 adet kendiliğinden soğutulduktan sonra sonra suni yaşlandırma yapılmayan ve 1 adet ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra suni yaşlandırma yapılmayan numune kullanılmıştır. Bu numunelerinin hepsine çekme deneyi ve sertlik ölçümü yapılmıştır.

Optik mikroyapı analizleri incelenmek üzere örnekleme numune seçilmiştir. 1 adet kendiliğinden soğutulduktan sonra ısıl işlem uygulanmayan , 1 adet ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra ısıl işlem uygulanmayan , 12 adet kendiliğinden soğutulduktan sonra 1, 5 ve 10 saat suni yaşlandırma işlemi yapılan , 12 adet ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra 1, 5 ve 10 saat suni yaşlandırma işlemi yapılan ve 1 adet ekstrüder fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra 7 saat yaşlandırma işlemi yapılan numuneler dik ve paralel yönlerini temsil edecek şekilde bakalite alınmıştır. Toplam 54 adet numune bakalite alınarak optik mikroyapıları incelenmiştir. Yaşlandırma işlemi uygulanan numunelerin mekanik özellikleri üzerindeki değişimler gözlemlenmiştir.

4.1. Sertlik ve Çekme Deneyi Sonuçları

4.1.1. Ekstrüder Fan ve Sprey Su ile Soğutulduktan Sonra Suni Yaşlandırma İşlemi Yapılan Numuneler

Numunelere uygulanan ısıl işlem koşulları, yaşlandırma süresi, sertlik , çekme ve akma verileri Tablo 10'da verilmiştir.

Tablo 10

Fan ve sprey su ile soğutulan numuneler için sertlik, çekme ve akma mukavemetleri

Numara	Isıl İşlem Reçetesi	Yaşlandırma Süresi	Sertlik (HB)	Çekme (N/mm²)	Akma (N/mm²)
1	230^{0}C Fan ve Sprey Su	1 saat	83,2	234,47	212,06
2	230^{0}C Fan ve Sprey Su	2 saat	74,7	227,16	199,88
3	230^{0}C Fan ve Sprey Su	3 saat	70,8	213,85	181,88
4	230^{0}C Fan ve Sprey Su	4 saat	68,6	212,9	180,98
5	230^{0}C Fan ve Sprey Su	5 saat	66,1	206,88	172,81
6	230^{0}C Fan ve Sprey Su	6 saat	66,1	206,67	170,85
7	230^{0}C Fan ve Sprey Su	7 saat	66	205,66	170,01
8	230^{0}C Fan ve Sprey Su	8 saat	65,3	204,88	166,11
9	230^{0}C Fan ve Sprey Su	9 saat	65,1	202,1	164,99
10	230^{0}C Fan ve Sprey Su	10 saat	64,7	200,39	162,88
21	210^{0}C Fan ve Sprey Su	1 saat	92,8	264,17	247,35
22	210^{0}C Fan ve Sprey Su	2 saat	89,7	257,23	239,86
23	210^{0}C Fan ve Sprey Su	3 saat	88,3	259,85	242,93
24	210^{0}C Fan ve Sprey Su	4 saat	87,2	258,06	240,74
25	210^{0}C Fan ve Sprey Su	5 saat	83,1	244,98	223,79
26	210^{0}C Fan ve Sprey Su	6 saat	80,6	245,32	224,45
27	210^{0}C Fan ve Sprey Su	7 saat	76,4	238,61	216,76
28	210^{0}C Fan ve Sprey Su	8 saat	76	237,52	214,31
29	210^{0}C Fan ve Sprey Su	9 saat	75	229,74	203,53
30	210^{0}C Fan ve Sprey Su	10 saat	74,9	227,08	199,53
41	180^{0}C Fan ve Sprey Su	1 saat	77,4	233,67	162,04
42	180^{0}C Fan ve Sprey Su	2 saat	85,2	254,45	205,94
43	180^{0}C Fan ve Sprey Su	3 saat	92	270,44	237,39
44	180^{0}C Fan ve Sprey Su	4 saat	93	275,92	248,72
45	180^{0}C Fan ve Sprey Su	5 saat	94,2	277,3	250,68
46	180^{0}C Fan ve Sprey Su	6 saat	98	284,93	261,73
47	180^{0}C Fan ve Sprey Su	7 saat	98,5	286,28	265,62
48	180^{0}C Fan ve Sprey Su	8 saat	96,3	281,33	261,65
49	180^{0}C Fan ve Sprey Su	9 saat	96,4	280,27	262,11
50	180^{0}C Fan ve Sprey Su	10 saat	96,2	281,13	263,8
61	165^{0}C Fan ve Sprey Su	1 saat	66,9	207,43	119,76
62	165^{0}C Fan ve Sprey Su	2 saat	75,1	228,43	144,75
63	165^{0}C Fan ve Sprey Su	3 saat	80,2	237,04	166,43
64	165^{0}C Fan ve Sprey Su	4 saat	85,9	245,56	182,28
65	165^{0}C Fan ve Sprey Su	5 saat	87,4	252,84	196,69
66	165^{0}C Fan ve Sprey Su	6 saat	90,7	263,67	206,12
67	165^{0}C Fan ve Sprey Su	7 saat	92,7	265,2	217,78
68	165^{0}C Fan ve Sprey Su	8 saat	94,8	269,02	224,33
69	165^{0}C Fan ve Sprey Su	9 saat	97	275,56	237,11
70	165^{0}C Fan ve Sprey Su	10 saat	99	276,47	238,19
102	Fan ve Sprey Su Isıl İşlemsiz	0	61,3	195,71	106,27

Fan ve sprey su ile soğutulan numuneler için en yüksek çekme mukavemeti 286,28 MPa ve en yüksek akma mukavemeti 265,62 MPa elde edilmiş olup 47 numaralı numune için 180^0C'de 7 saat yaşlandırma ile elde edilmiştir. Bu numune için sertlik değeri 98,5 HB ölçülmüştür. Yaşlandırma yapılan numuneler içinde en düşük çekme mukavemeti 200,39 MPa ile 10 numaralı numune için 230^0C'de 10 saat yaşlandırma sonucu görülmüştür. Bu numune için akma mukavemeti için 162,88 MPa , sertlik değeri 64,7 HB olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değeri yaşlandırma yapılan numuneler arasında elde edilen en düşük sertlik değeridir. Yaşlandırma yapılmayan 102 numaralı numunenin çekme mukavemeti 195,71 MPA , akma mukavemeti 106,27 MPa ve sertliği 61,3 HB elde edilmiştir.

230 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için yaşlandırma süresi arttıkça mukavemetin ve sertliğin düştüğü görülmüştür. En yüksek çekme ve akma mukavemet değerleri 234,47 MPa ve 212,06 MPa olarak birinci saatte elde edilmiştir. Sertlik değeri 83,2 HB olarak ölçülmüştür. Süre arttıkça aşırı yaşlanma etkisi görülmüştür.

210 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için yaşlandırma süresi arttıkça mukavemetin ve sertliğin düştüğü görülmüştür. En yüksek çekme ve akma mukavemetleri 264,17 MPa ve 247,35 MPa olarak birinci saatte elde edilmiştir . Sertlik değeri 92,8 HB olarak ölçülmüştür. Süre arttıkça aşırı yaşlanma etkisi görülmüştür.

180 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için 6 ila 10 saat aralığında en yüksek mukavemet ve sertlik değerlerine ulaşmıştır. En yüksek çekme ve akma mukavemetleri 286,28 MPa ve 265,62 MPa olarak yedinci saatte elde edilmiştir. Sertlik değeri 98,5 HB olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma süresi arttıkça sertlik ve mukavemetin arttığı görülmüştür. Yedinci saatten sonra mukavemet ve sertlikte belirgin değişim olmamıştır.

165 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için yaşlandırma süresi arttıkça mukavemet ve sertliğin arttığı görülmüştür. En yüksek çekme ve akma mukavemetleri 276,47 MPa ve 238,19 MPa olarak onuncu saatte elde edilmiştir. Sertlik değeri 99 HB olarak ölçülmüştür.

4.1.2. Kendiliğinden Soğutulduktan Sonra Suni Yaşlandırma İşlemi Yapılan Numuneler

Numunelere uygulanan ısıl işlem koşulları, yaşlandırma süresi, sertlik, çekme ve akma verileri Tablo 11'de verilmiştir.

Tablo 11

Kendiliğinden soğutulan numuneler için sertlik, çekme ve akma mukavemetleri

Numara	Isıl İşlem Reçetesi	Yaşlandırma Süresi	Sertlik (HB)	Çekme (N/mm²)	Akma (N/mm²)
11	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	1 saat	76,1	223,41	197,35
12	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	2 saat	72,4	217,98	189,27
13	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	3 saat	67	207,81	176,75
14	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	4 saat	66,7	201,62	166,57
15	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	5 saat	62,4	190,66	157,01
16	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	6 saat	62,5	189,05	152,25
17	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	7 saat	62,6	190,16	149,09
18	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	8 saat	62,4	191,10	154,88
19	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	9 saat	62,4	191,20	153,15
20	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	62,4	191,91	152,70
31	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	1 saat	78,5	231,81	205,19
32	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	2 saat	79,8	231,63	208,88
33	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	3 saat	83,5	244,43	221,31
34	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	4 saat	83	245,60	222,07
35	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	5 saat	83	245,76	222,67
36	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	6 saat	84,2	250,79	228,68
37	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	7 saat	77,8	237,16	211,67
38	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	8 saat	78,1	238,89	213,98
39	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	9 saat	78,1	238,8	213,5
40	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	78	238,56	213,11
51	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	1 saat	67,6	206,78	134,97
52	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	2 saat	76,6	228,10	172,14
53	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	3 saat	82,4	239,88	197,75
54	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	4 saat	87,7	256,75	220,12
55	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	5 saat	92,1	261,65	233,85
56	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	6 saat	92,6	266,02	240,76
57	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	7 saat	92,9	269,76	244,29
58	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	8 saat	95,1	273,3	242,53
59	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	9 saat	97,8	273,49	248,95
60	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	99	279,70	255,12
71	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	1 saat	55,7	174,52	89,87
72	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	2 saat	67	205,67	125,32
73	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	3 saat	66,7	204,46	155,00
74	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	4 saat	77	229,15	161,65
75	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	5 saat	84,9	242,80	186,93
76	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	6 saat	88,1	253,80	208,76
77	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	7 saat	88,3	256,28	211,32
78	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	8 saat	87	257,08	209,81
79	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	9 saat	90,7	260,40	220,46
80	165^{0}C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	93,5	279,07	233,81
101	Kendiliğinden Isıl İşlemsiz	0 saat	55,6	181,73	91,77

Kendiliğinden soğutulan numuneler için en yüksek çekme mukavemeti 279,7 MPa ve en yüksek akma mukavemeti 255,12 MPa elde edilmiş olup 60 numaralı numune için 180^0C ‘de 10 saat yaşlandırma ile elde edilmiştir. Bu numune için sertlik değeri 99 HB ölçülmüştür. Yaşlandırma yapılan numuneler içinde en düşük çekme mukavemeti 174,52 MPa ile 71 numaralı numune için 165^0C ‘de 1 saat yaşlandırma sonucu görülmüştür. Bu numune için akma mukavemeti için 89,87 MPa , sertlik değeri 55,7 HB olarak elde edilmiştir. Aynı zamanda bu sertlik değeri yaşlandırma yapılan numuneler arasında elde edilen en düşük sertlik değeridir. Yaşlandırma yapılmayan 101 numaralı numunenin çekme mukavemeti 181,73 MPA , akma mukavemeti 91,77 MPa ve sertliği 55,6 HB elde edilmiştir.

230 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için en yüksek çekme ve akma mukavemet değeri 223,41 MPa ve 197,35 MPa olarak birinci saatte elde edilmiştir. Sertlik değeri 76,1 HB olarak ölçülmüştür. Yaşlandırma süresi arttıkça mukavemet ve sertliğin düştüğü, beşinci saatten sonra belirgin bir değişimin olmadığı görülmüştür. Süre arttıkça aşırı yaşlanma etkisi görülmüştür.

210 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için en yüksek çekme ve akma mukavemetleri 250,79 MPa ve 228,68 MPa olarak altıncı saatte elde edilmiştir. Sertlik değeri 84,2 HB olarak ölçülmüştür. Altıncı saate kadar mukavemet ve sertlik değerlerinin arttığı, altıncı saatte en yüksek mukavemet ve sertlik değerine ulaştıktan sonraki sürelerde belirgin bir değişikliğin olmadığı görülmüştür.

180 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için yaşlandırma süresi arttıkça mukavemet ve sertliğin arttığı görülmüştür. En yüksek çekme ve akma mukavemetleri 279,70 MPa ve 255,12 MPa olarak onuncu saatte elde edilmiştir. Sertlik değeri 99 HB ölçülmüştür.

165 ^{0}C de yaşlandırma işlemi yapılan numuneler için yaşlandırma süresi arttıkça mukavemet ve sertliğin arttığı görülmüştür. En yüksek çekme ve akma mukavemetleri değerleri 279,07 MPa ve 233,81 MPa olarak onuncu saatte elde edilmiştir. Sertlik 93,5 HB olarak ölçülmüştür.

Fan ve sprey ile soğutulan ve ısıl işlemsiz olan 102 numaralı numune için 61,3 HB sertlik, 195,71 MPA çekme mukavemeti ve 106,27 MPa akma mukavemeti elde edilmiştir. Kendiliğinden soğutulan ve ısıl işlemsiz olan 101 numaralı numune için 55,6 HB sertlik, 181,73 MPa çekme mukavemeti ve 91,77 MPa akma mukavemeti elde edilmiştir. Fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra ısıl işlem uygulanmayan numunenin sertlik, çekme ve akma mukavemet değerleri kendiliğinden soğutulan ve ısıl işlem uygulanmayan numune göre daha yüksek olduğu görülmüştür. 102 numaralı numunenin 101 numaralı numuneden daha yüksek sertlik ve mukavemete sahip olması ekstrüzyon esnasındaki çözeltiye alma işleminde profilin soğuma hızı ile ilgilidir. Ekstrüzyon pres sonrası fan ve sprey su ile soğutulan 102 numaralı numunelerde Mg_2Si fazları ince çökeltiler oluşturduğundan soğuma hızı daha yavaş olan 101 numaralı kendiliğinden soğutulan numuneye göre daha fazla sertlik almıştır.

4.2. Örnekleme XRF Sonuçları

10, 70 ve 60 numaralı numuneler için XRF analiz sonuçları Tablo 12'de verilmiştir.

Tablo 12

XRF analiz sonuçları

Element	70 Numaralı Numune % Element	60 Numaralı Numune % Element	10 Numaralı Numune % Element	Sapma Oranı
Si	0,669	0,730	0,746	0,036
Cu	0,0098	0,0119	0,0094	0,0024
Mn	0,0425	0,0434	0,0387	0,0032
Zn	0,0326	0,0271	0,0237	0,0022
Fe	0,4144	0,4123	0,3868	0,0071
Ti	0,0241	0,0212	0,0215	0,0044
V	0,0227	0,0153	0,0258	0,0041
Ga	0,0101	-	0,0112	0,0014
Mg	-	0,38	-	0,16
Al	98,76	98,31	98,69	0,31

4.3. Optik Mikroyapı Analizleri

Optik mikroyapılar örnekleme incelemek üzere toplam 27 adet numune bakalite alınmıştır. Ekstrüzyon sonrası kendiliğinden ve fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra suni yaşlandırma işlemi yapılmayan, ekstrüzyon sonrası kendiliğinden ve fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra 1, 5 ve 10 saat süre ile suni yaşlandırma yapılan numuneler bakalite alınmıştır. Ekstrüzyon sonrası fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra yaşlandırma yapılarak elde edilen en yüksek ve en düşük çekme mukavemetlerine sahip olan 47 ve 10 numaralı numune, kendiliğinden soğutulduktan sonra yaşlandırma yapılarak elde edilen en yüksek ve en düşük çekme mukavemetlerine sahip olan 60 ve 71 numaralı numuneler de bakalite alınanlar arasındadır. Bakalite alınan numunelerden ekstrüzyon yönüne dik ve paralel olacak şekilde optik görüntüler alınmıştır. Görüntüler 100x , 200x, 500x ve 1000x büyütmede alınmıştır.

Tablo 13'de bakalite alınan numuneler için özet tablo verilmiştir.

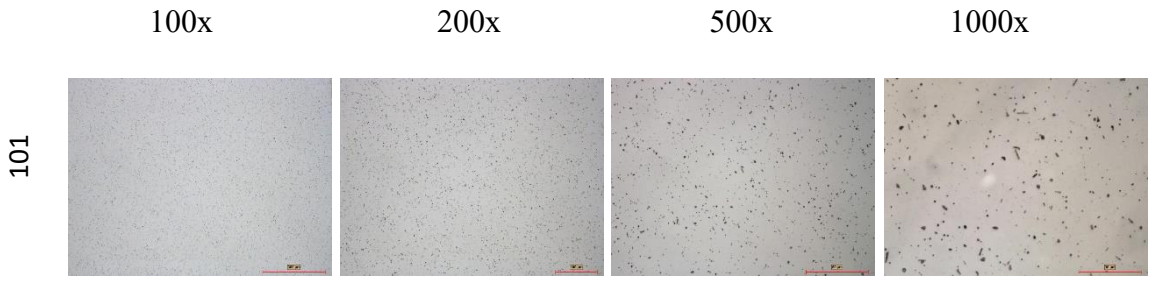
Optik mikroyapı görüntüleri incelendiğinde; ekstrüzyon yönüne dik ve paralel numunelerin benzer davranış sergilediği görülerek yüksek büyütmelerde çökelti fazları ve dağılımları görülmüştür. AA6605 alaşımındaki çökelti partiküllerinin homojen dağılımının, düşük büyütmelerde dahi belirgin olduğu tespit edilmiştir.

Tablo 13

Bakalite alınan numuneler için özet

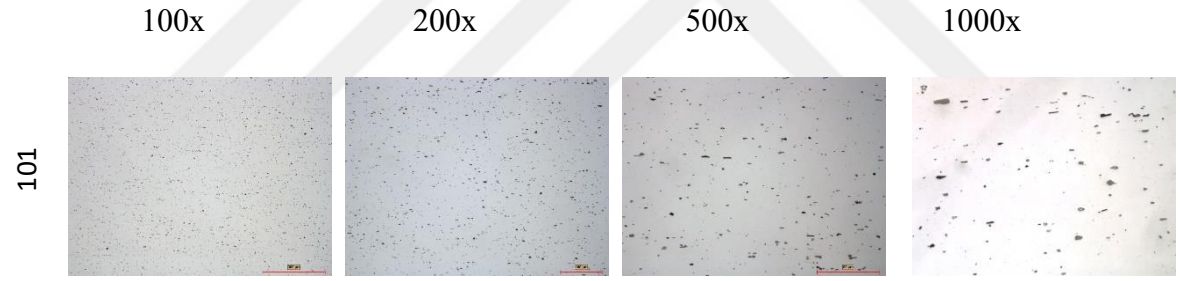
Numara	Isıl İşlem Reçetesi	Yaşlandırma Süresi	Sertlik (HB)	Çekme (N/mm²)	Akma (N/mm²)
1	230^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	1 saat	83,2	234,47	212,06
5	230^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	5 saat	66,1	206,88	172,81
10	230^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	10 saat	64,7	200,39	162,88
11	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	1 saat	76,1	223,41	197,35
15	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	5 saat	62,4	190,66	157,01
20	230^{0}C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	62,4	191,91	152,70
21	210^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	1 saat	92,8	264,17	247,35
25	210^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	5 saat	83,1	244,98	223,79
30	210^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	10 saat	74,9	227,08	199,53
31	210^{0}CKendiliğinden Soğuma	1 saat	78,5	231,81	205,19
35	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	5 saat	83,0	245,76	222,67
40	210^{0}C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	78,0	238,56	213,11
41	180^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	1 saat	77,4	233,67	162,04
45	180^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	5 saat	94,2	277,30	250,68
47	180^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	7 saat	98,5	286,28	265,62
50	180^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	10 saat	96,2	281,13	263,80
51	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	1 saat	67,6	206,78	134,97
55	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	5 saat	92,1	261,65	233,85
60	180^{0}C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	99,0	279,70	255,12
61	165^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	1 saat	66,9	207,43	119,76
65	165^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	5 saat	87,4	252,84	196,69
70	165^{0}CFan ve Sprey Su Soğuma	10 saat	99	276,47	238,19
71	165^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	1 saat	55,7	174,52	89,87
75	165^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	5 saat	84,9	242,80	186,93
80	165^{0}C Fan ve Sprey Su Soğuma	10 saat	93,5	279,07	233,81
101	Kendiliğinden Isıl İşlemsiz	0	55,6	181,73	91,77
102	Fan ve Sprey Su Isıl İşlemsiz	0	61,3	195,71	106,27

4.3.1. Kendiliğinden Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numunesi için Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri



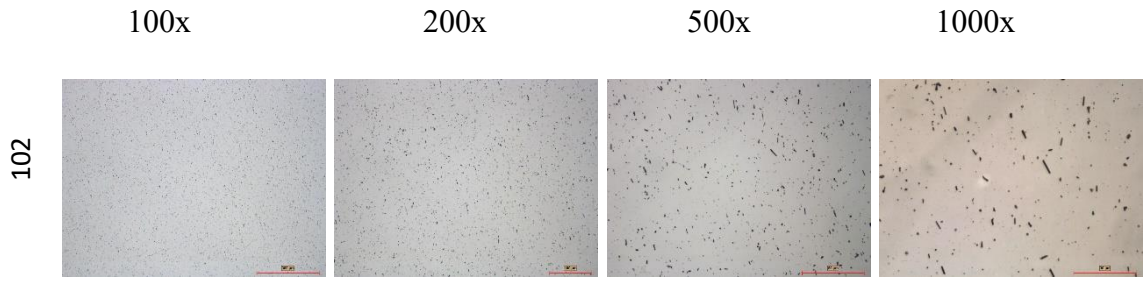
Şekil 17: Kendiliğinden soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri

4.3.2. Kendiliğinden Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numune için Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri



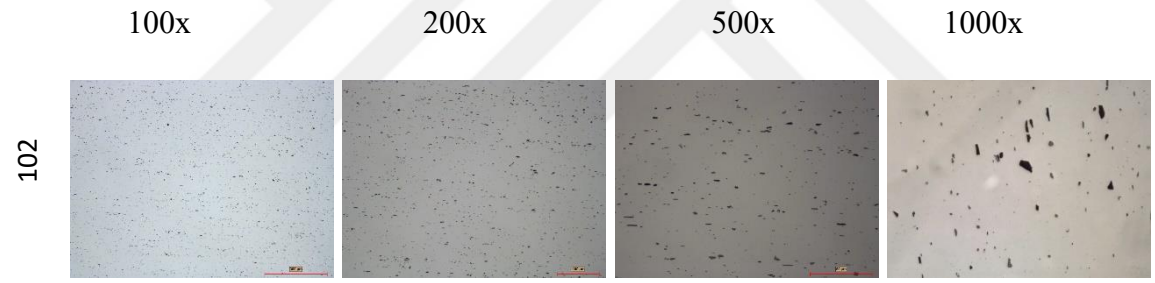
Şekil 18: Kendiliğinden soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri

4.3.3. Fan ve Sprey Su ile Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numunesi için Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri



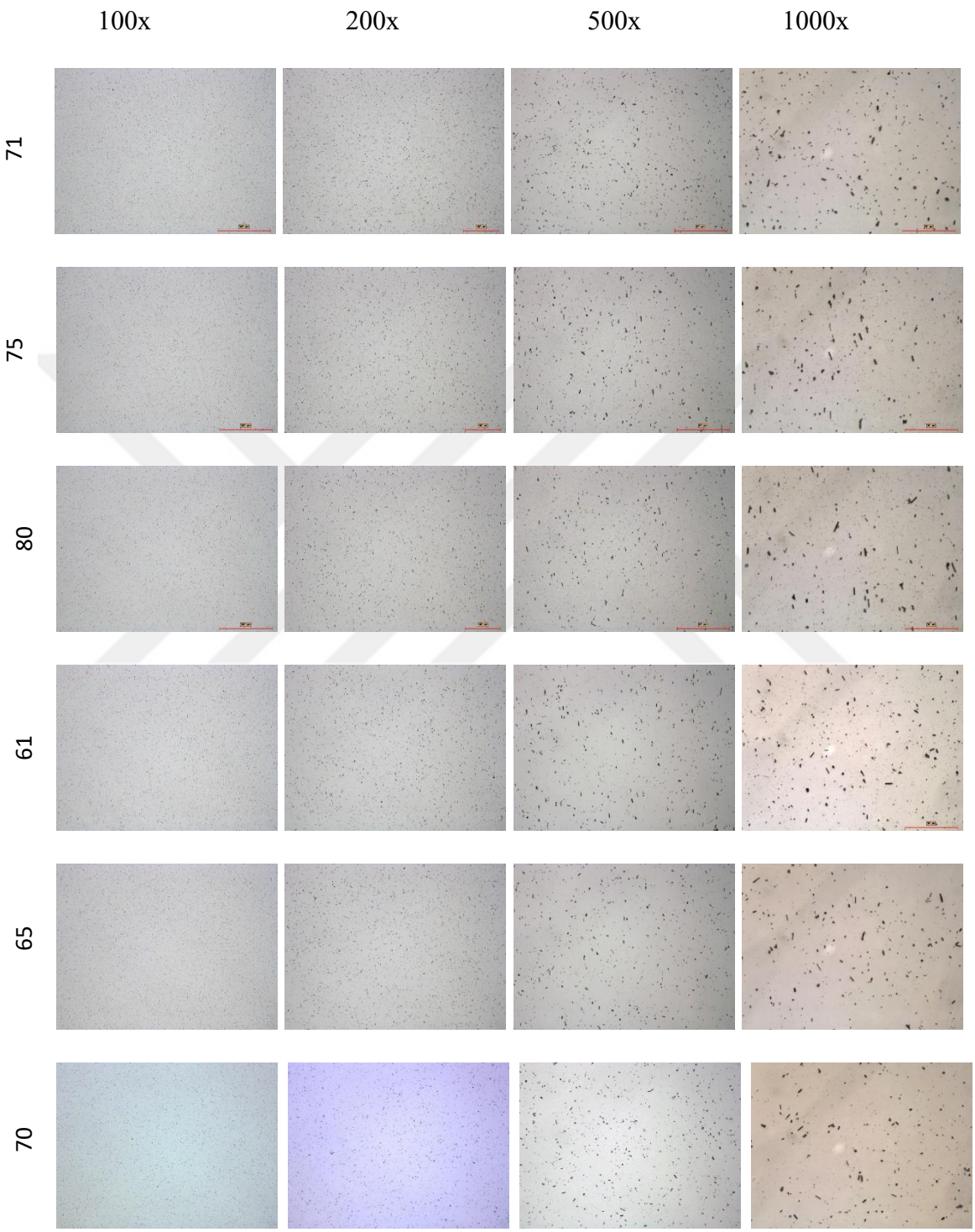
Şekil 19: Fan ve sprey su ile soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri

4.3.4. Fan ve Sprey Su ile Soğutulan Isıl İşlemsiz AA6005 Alaşım Numune için Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri



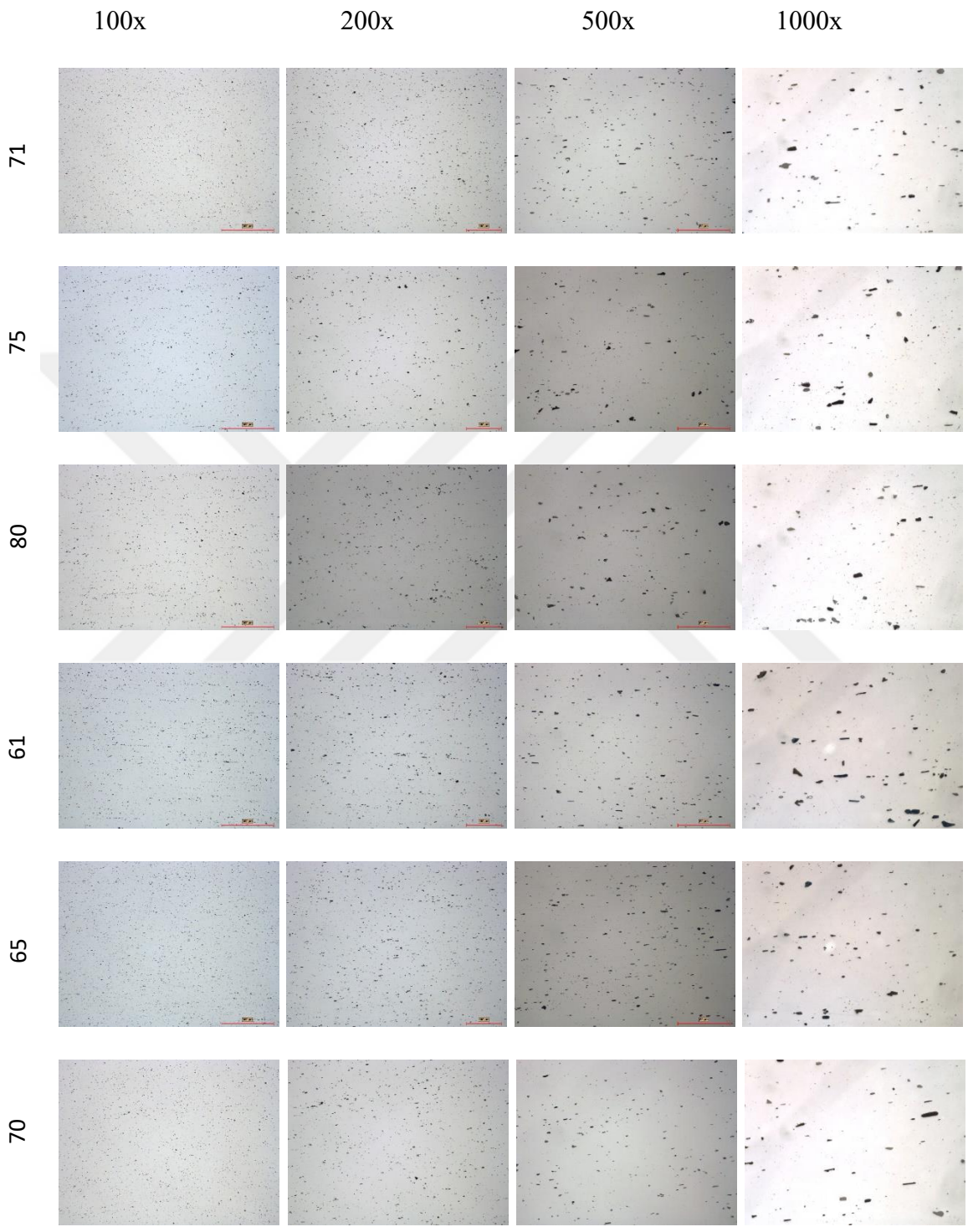
Şekil 20: Fan ve sprey su ile soğutulan ısıl işlemsiz numune için ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri

4.3.5. 165 ^{0}C'de yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri



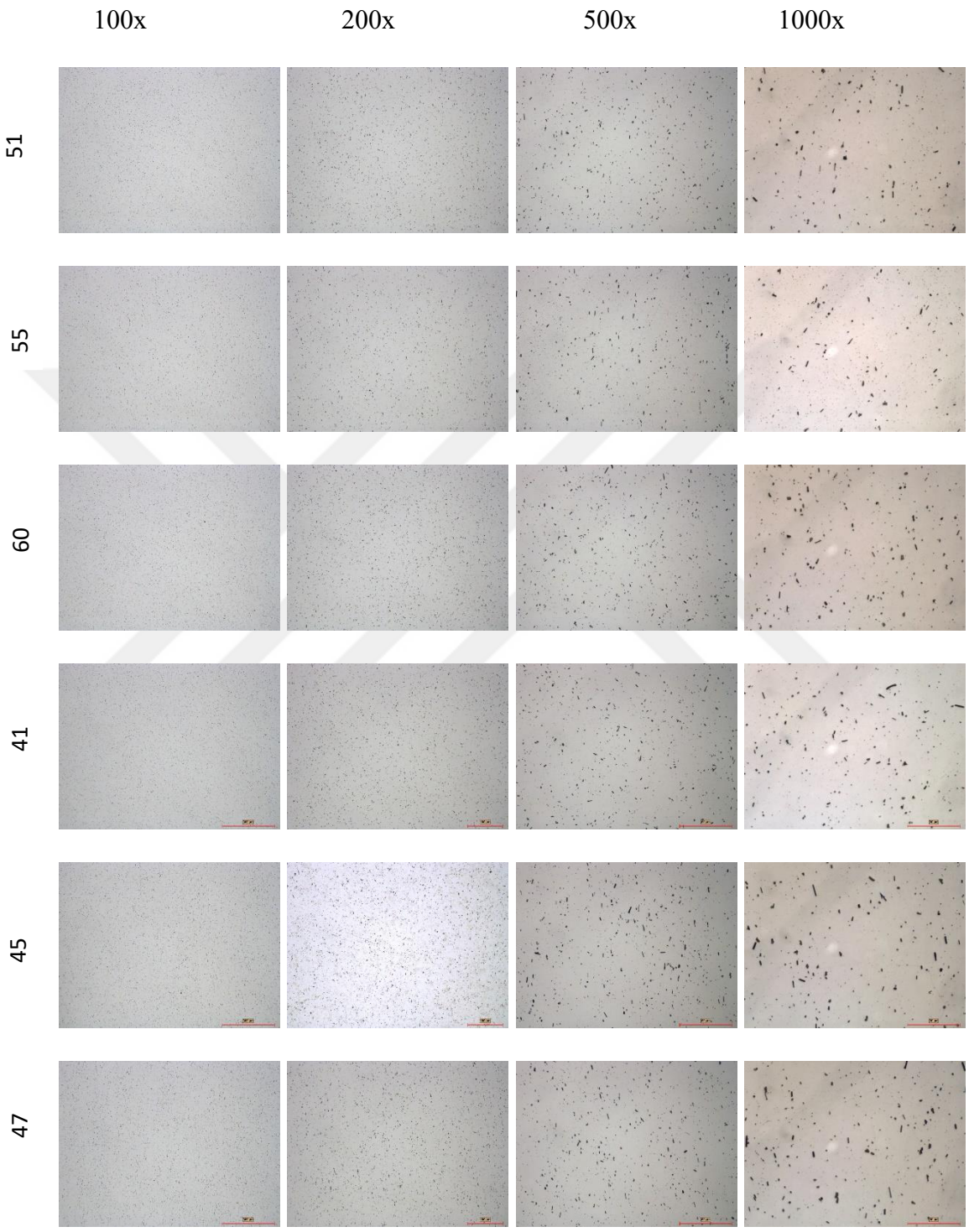
Şekil 21: 165 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri

4.3.6. 165 ^{0}C'de yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri



Şekil 22: 165 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri

4.3.7. 180 ^{0}C'de Yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri

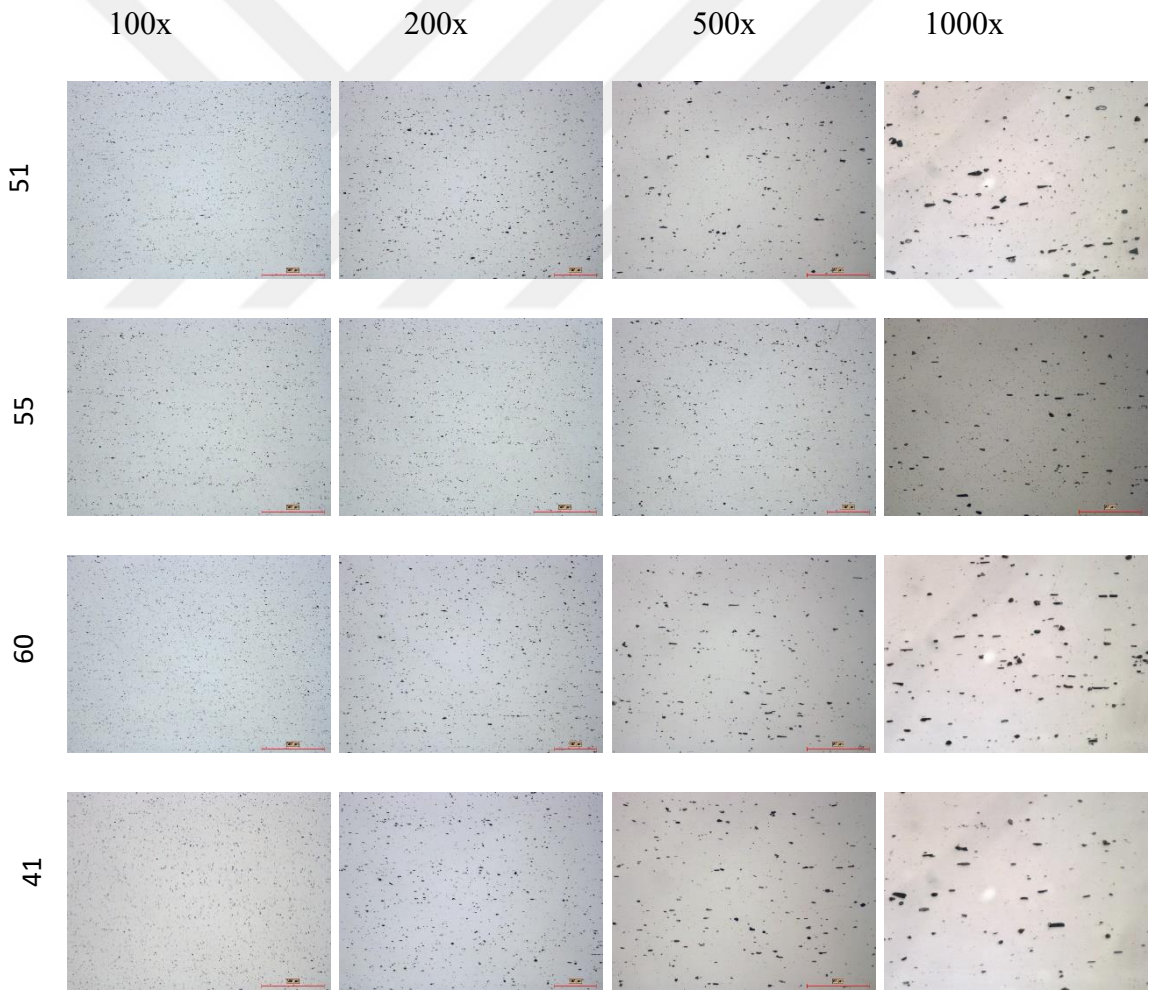


Şekil 23'ün devamı

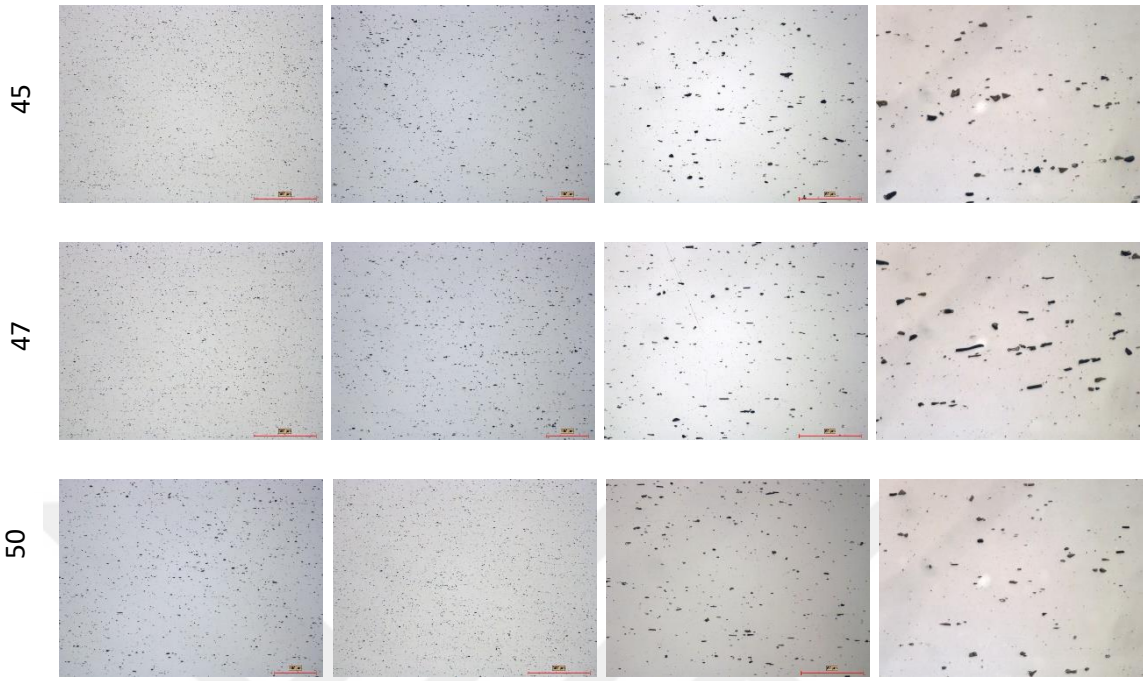


Şekil 23: 180 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri

4.3.8. 180 ^{0}C'de yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri

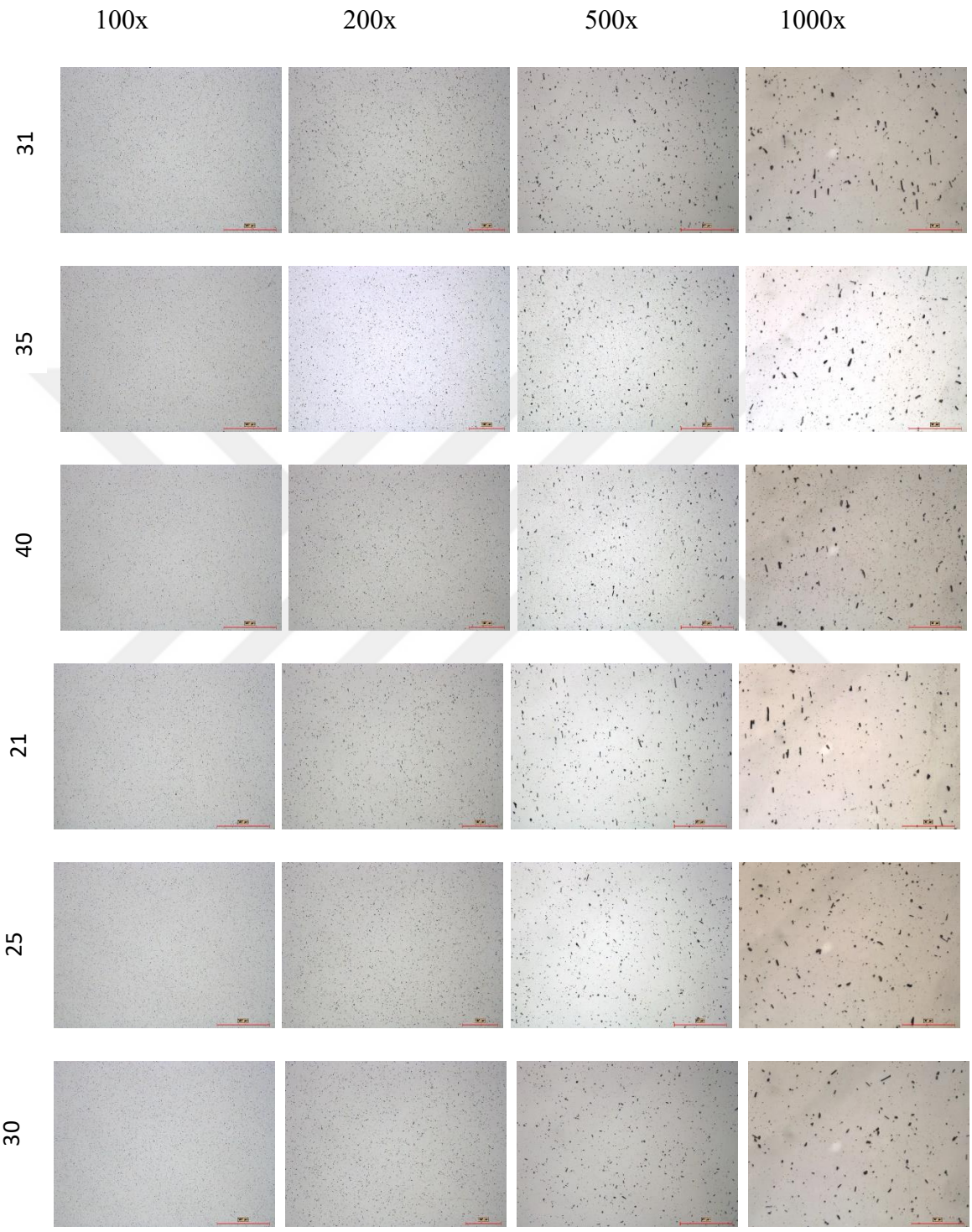


Şekil 24'ün devamı



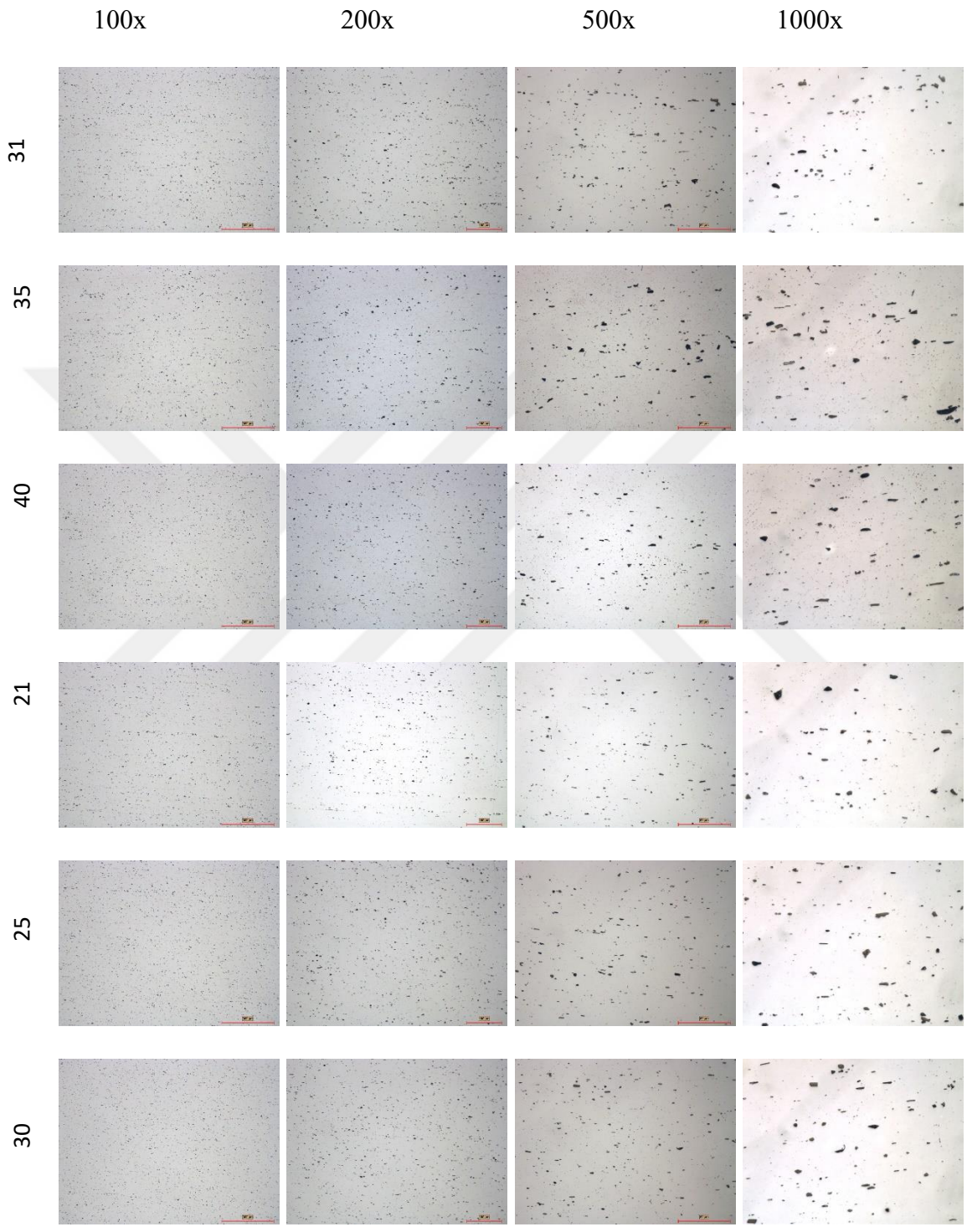
Şekil 24: 180 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri

4.3.9. 210 ^{0}C'de yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri



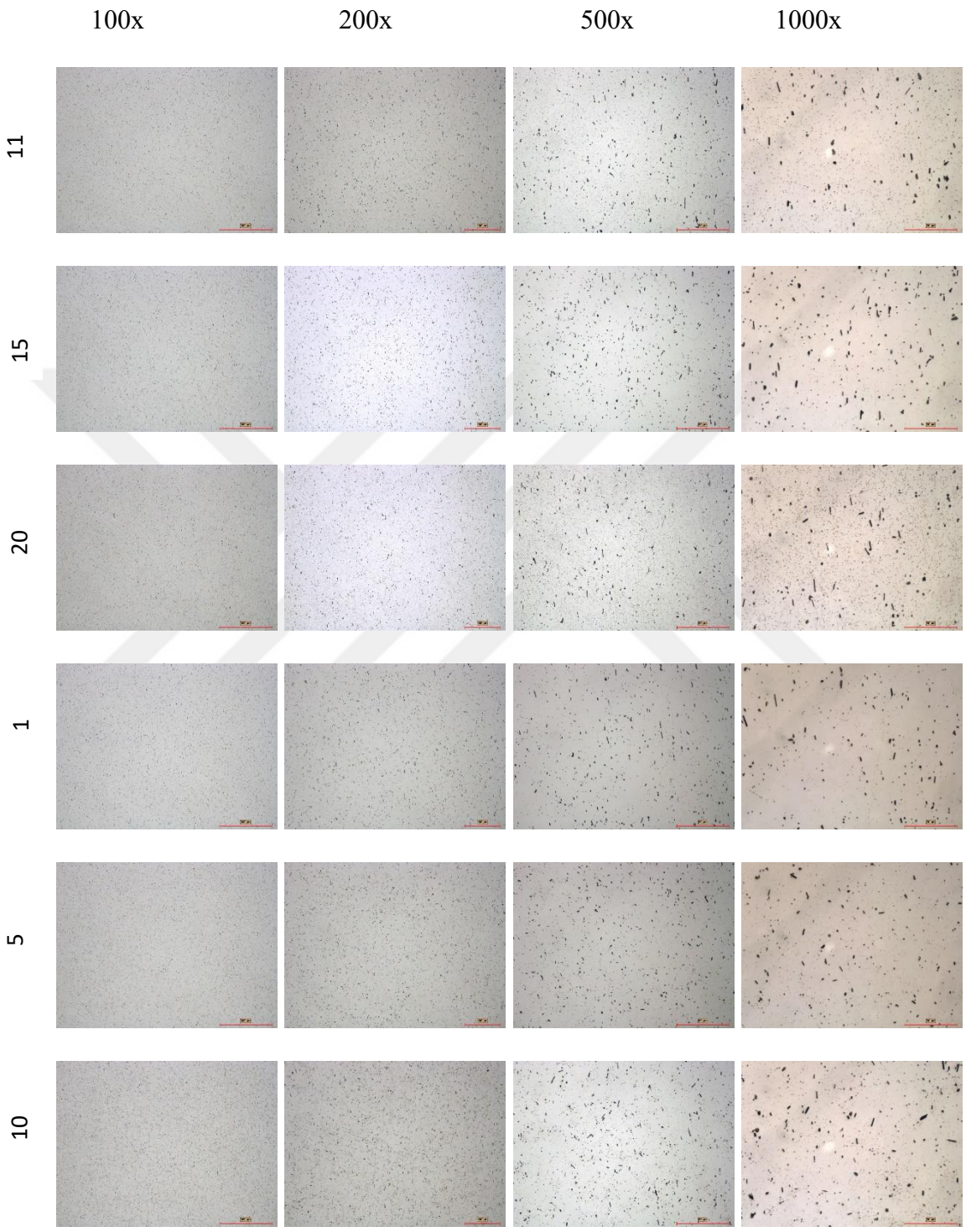
Şekil 25: 210 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri

4.3.10. 210 ^{0}C'de yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri



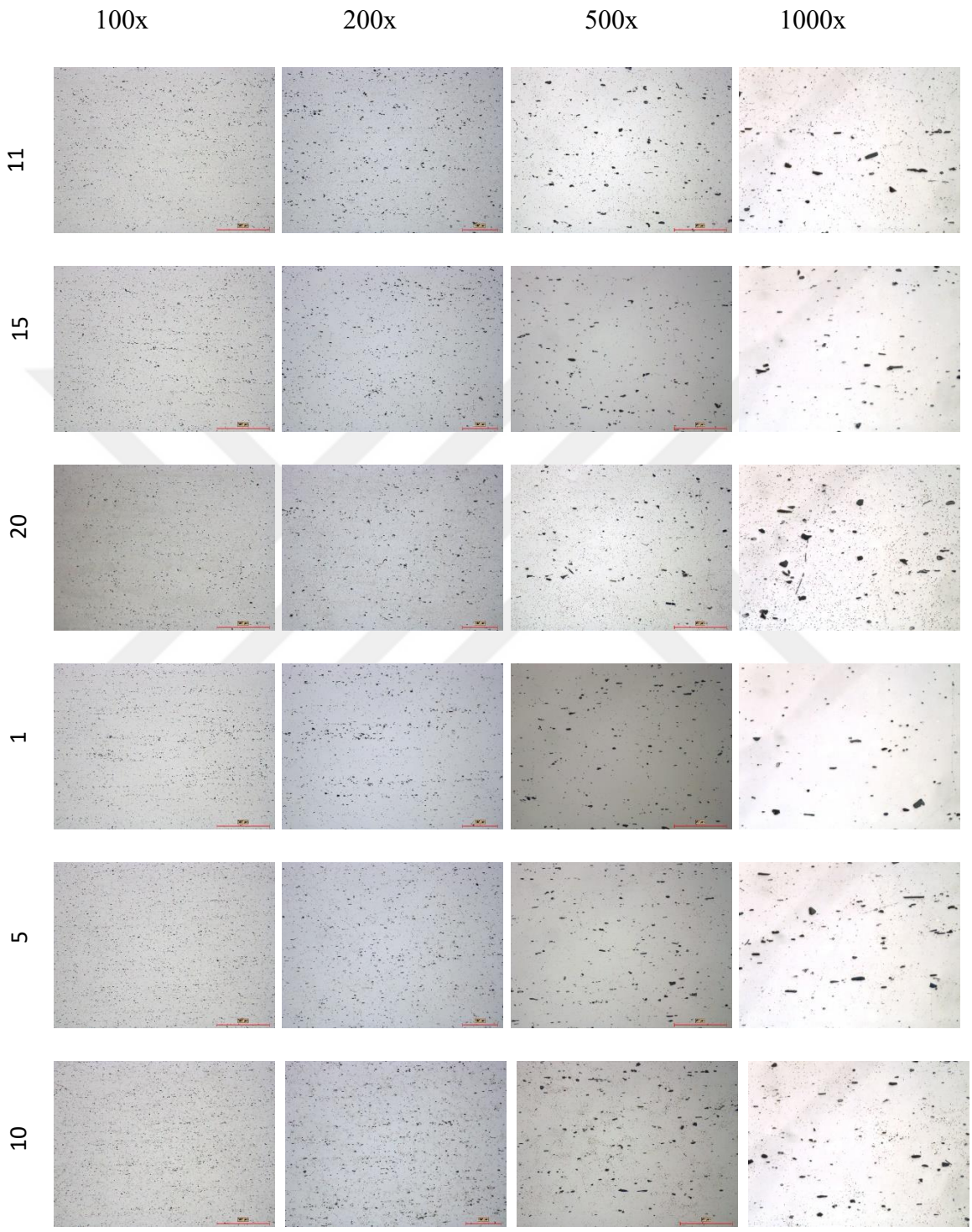
Şekil 26: 210 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri

4.3.11. 230 ^{0}C'de yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Dik Mikroyapı Görüntüleri



Şekil 27: 230 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne dik mikroyapı görüntüleri

4.3.12. 230 ^{0}C'de yaşlandırma Yapılan Numunelerin Ekstrüzyon Yönüne Paralel Mikroyapı Görüntüleri



Şekil 28: 230 ^{0}C'de yaşlandırma yapılan numunelerin ekstrüzyon yönüne paralel mikroyapı görüntüleri

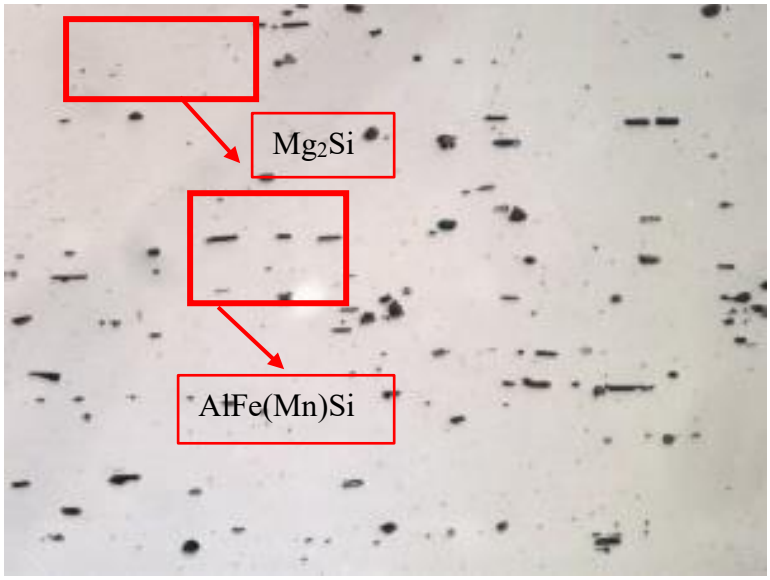
4.3.13. Optik Mikroyapıdaki Çökeltiler

Alaşım tane sınırlarında AlFe(Mn)Si intermetalik fazı ve tane içlerinde Mg-Si çökeltilerinden oluşmaktadır.

47 ve 60 numaralı numune için 1000x büyütmedeki mikroyapı Şekil 29 ve 30'de verilmiştir.



Şekil 29: 47 numaralı numune için mikroyapı incelemesi



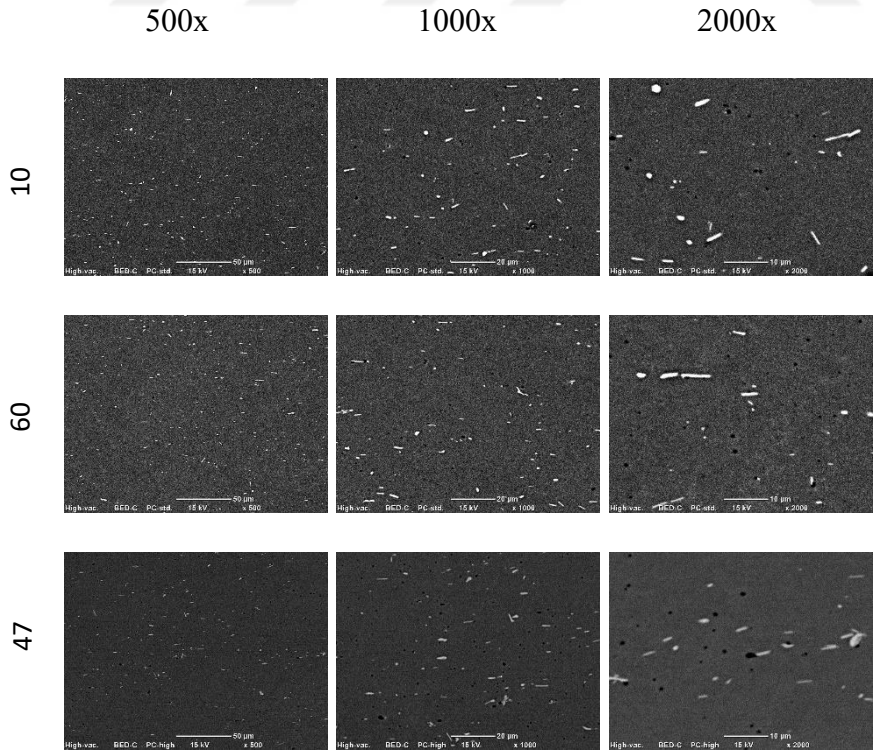
Şekil 30: 60 numaralı numune için mikroyapı incelemesi

Literatür taramasında 6005 alaşımı için çoğunlukla AlFeSi ve Mg_2Si fazlarının oluştuğu bildiriliyor. Hücre sınırlarında dağılmış halde β-AlFeSi ve α-AlFeMnSi intermetalik fazlarının zaman zaman kaba Mg_2Si ile birleştiğinden de bahsediliyor. (Mrówka-Nowotnik , Sieniawski, 2005).

4.4. SEM Analizleri

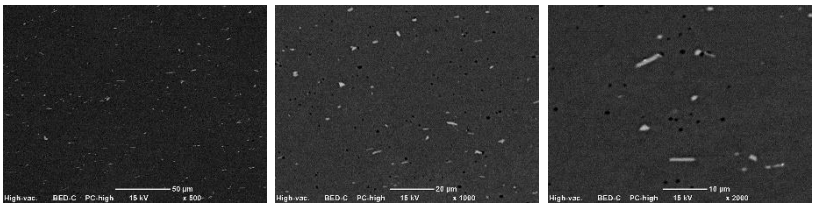
Ekstrüzyon sonrası kendiliğinden ve fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra suni yaşlandırma işlemi yapılarak elde edilen en yüksek ve en düşük çekme mukavemeti ve sertlik değerlerine sahip numuneler için oluşan fazların yüzey morfolojilerini ve dağılımını inceleme amaçlı SEM analizleri yapılmıştır.

10, 47, 60 ve 71 numaralı numuneler için SEM görüntüleri 500x, 1000x ve 2000x büyütmede çekilmiş olup Şekil 31'de verilmiştir.



Şekil 31’in devamı

71

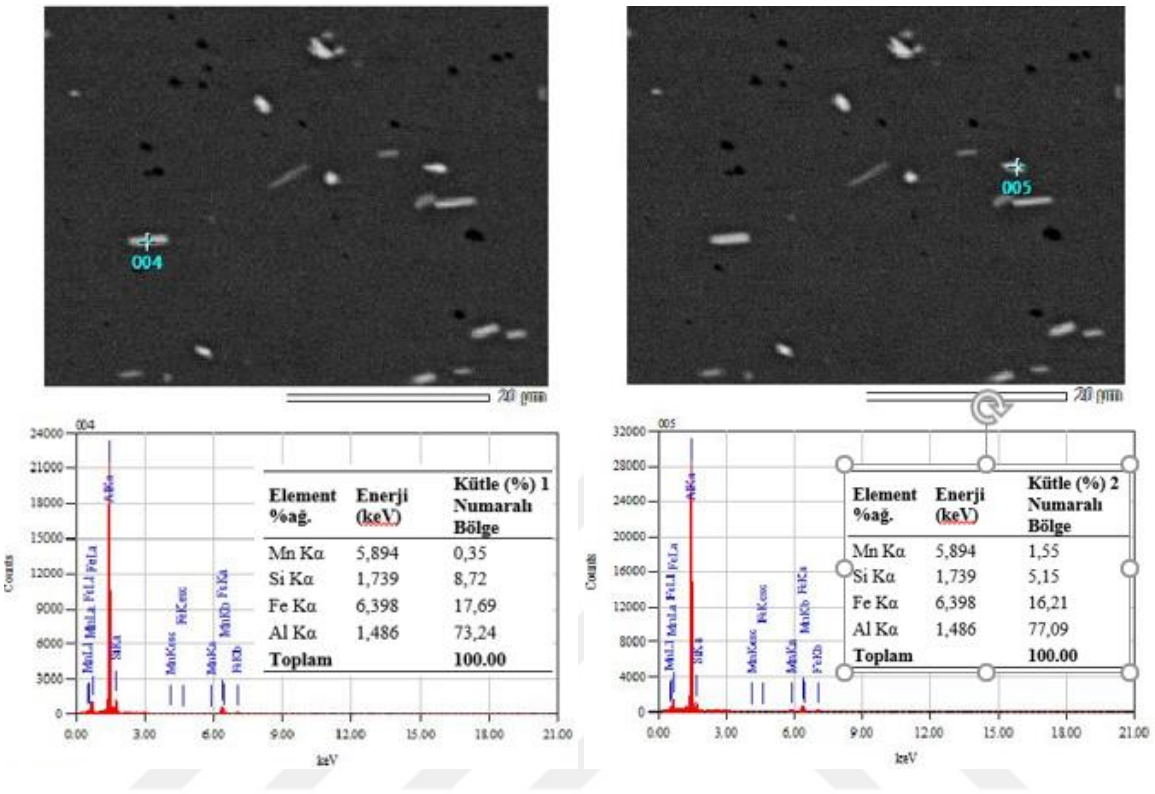


Şekil 31: 10, 47, 60 ve 71 numaralı numuneler için 500x, 1000x ve 2000x büyütmede sem görselleri

4.5. EDS Analizleri

10, 47, 60 ve 71 numaralı numunelerin elementel bileşimini analiz etmek için EDS kullanılmıştır. Çubuksu beyaz yapıların AlFe(Mn)Si, yuvarlak siyah yapıların ise Mg_2Si intermetaliği olduğu söylenebilir. AlFe(Mn)Si intermetaliği net görülmüş olup Mg_2Si intermetaliği ince boyutlu çökeltiler olması kaynaklı optik analizde daha net görülmektedir. En yüksek mukavemete sahip 47 ve 60 numuneler için Mg_2Si intermetalik fazının tane içinde ince çökeltiler oluşturarak sertliği arttırdığı söylenebilir.

4.5.1. 60 Numaralı Numune için Analiz Sonuçları

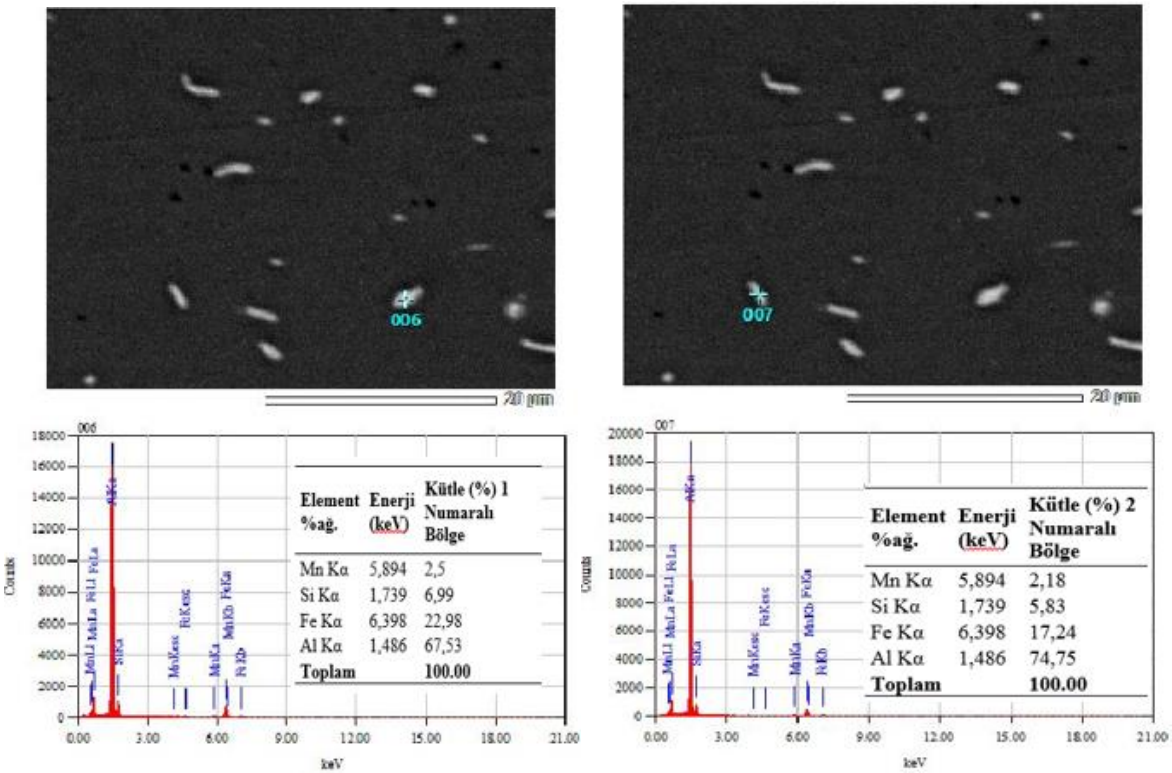


a) Birinci bölgeden analiz b) ikinci bölgeden analiz

Şekil 32: 60 numaralı numune için a) birinci ve b) ikinci bölgeden eds analizleri ve %kütle oranları

Görseldeki beyaz çubuksu görünen birinci bölgeden analiz yapıldığında en yüksek % ağırlık oranı 73,24 ile Al elementi tespit edilmiştir. Alüminyumdan sonra ağ.% 17,69 Fe, ağ.% 8,72 Si ve ağ.% 0,35 Mn elementleri bulunmuştur. İkinci beyaz bölge için analiz yapıldığında en yüksek % ağırlık oranı 77,09 ile Al elementi tespit edilmiştir. Alüminyumdan sonra ağ.% 16,21 Fe, ağ.% 5,15 Si ve ağ.% 1,55 Mn elementleri bulunmuştur.

4.5.2. 47 Numaralı Numune için Analiz Sonuçları



a) Birinci Bölgeden Analiz b) İkinci Bölgeden Analiz

Şekil 33: 47 numaralı numune için a) birinci ve b) ikinci bölgeden eds analizleri ve %kütle oranları

Görseldeki beyaz görünen birinci bölgeden analiz yapıldığında en yüksek % ağırlık oranı 67,53 ile Al elementi tespit edilmiştir. Alüminyumdan sonra ağ.% 22,98 Fe, ağ.% 6,99 Si ve ağ.% 2,5 Mn elementleri bulunmuştur. İkinci bölge için analiz yapıldığında en yüksek % ağırlık oranı 74,75 ile Al elementi tespit edilmiştir. Alüminyumdan sonra ağ.% 17,24 Fe, ağ.% 5,83 Si ve ağ.% 2,18 Mn elementleri bulunmuştur.

Yapıya birincil olarak mukavemeti veren Mg_2Si intermetaliğidir. İnce boyutlu çökeldiği için EDS analizi yapılamamıştır fakat optik analizde gösterilmiştir. Yapıdaki Al, Fe, Si ve Mn elementlerinin AlFe(Mn)Si intermetaliğini oluşturduğu söylenebilir.

4.6. Çökelti Boyutu Dağılımı

Çökelti boyut dağılımları için NIKON ECLIPSE MA200 marka optik mikroskop kullanılmıştır.

4.6.1. 47 Numaralı Numune için Çökelti Boyut Dağılımı

Taranan alanda en yoğun miktar için 74 parça tespit edilmiş olup boyutları 0.50–0.58 µm aralığındadır. Bu boyut aralığı, tüm parçacıkların % 9,11'ini oluşturmuştur. Sonraki çökelti boyutu en yoğun olan aralıklar 1.93–2.24 µm (%8,25) , 0.78–0.91 µm (%7,76) ve 0.58–0,67 µm (%7,14). İnce çökeltili bir çökelti olarak analiz edilebilir çünkü çökeltilerin %74,88'i 0,50-2,60 µm aralığındadır. 180^0C'de 7 saat yaşlandırma yapılan bu numune için 286,28 MPa çekme mukavemeti ve 98,5 HB sertlik elde edilmiştir. Mg_2Si ince çökeltilerinin yapıya mukavemet kazandırdığı sonucu çıkarılabilir.

Tablo 14

47 numaralı numune için çökelti boyutu dağılımı

Başlangıç (µm)	Bitiş (µm)	Adet	Miktar %	Kümülatif %
0,50	0,58	74	9,11	9,11
0,58	0,67	58	7,14	16,26
0,67	0,78	22	2,71	18,96
0,78	0,91	63	7,76	26,72
0,91	1,06	50	6,16	32,88
1,06	1,23	56	6,9	39,78
1,23	1,43	57	7,02	46,8
1,43	1,66	53	6,53	53,33
1,66	1,93	50	6,16	59,49
1,93	2,24	67	8,25	67,74
2,24	2,6	58	7,14	74,88
2,6	3,02	48	5,91	80,79
3,02	3,5	28	3,45	84,24
3,5	4,07	41	5,05	89,29
4,07	4,73	42	5,17	94,46
4,73	5,49	23	2,83	97,29
5,49	6,4	7	0,86	98,15
6,4	7,4	5	0,62	98,77
7,4	8,6	9	1,11	99,88
8,6	10	1	0,12	100

4.6.2. 10 Numaralı Numune için Çökelti Boyut Dağılımı

Taranan alanda en yoğun miktar için 201 parça tespit edilmiş olup boyutları 0.79–0.99 µm aralığındadır. Bu boyut aralığı, tüm parçacıkların %13,45'ini oluşturmuştur. Sonraki çökelti boyutu en yoğun olan aralıklar 0,50–0,63 µm (%12,45) , 1,24–1,55 µm (%10,78) ve 0.99–1,24 µm (%9,64)'dir. Çökeltilerin %72,97 'si 0,50–2,45 µm aralığındadır. 230^0 C'de 10 saat yaşlandırma yapılan bu numune için çekme mukavemeti 200,39 MPa ve sertlik 64,7 HB elde edilmiştir. Bu numune için yaşlandırma süresinin uzun ve sıcaklığın yüksek olması kaynaklı aşırı yaşlanma etkisi görülerek dislokasyon hareketlerinin engellenmesi ile çekme ve akma mukavemetlerinde düşüş yaşanmıştır. Başlangıçta küçük ve düzgün dağılmış olan çökeltiler zamanla irileşmiştir. İri çökeltilerin

boyutların % miktar oranı 47 numaralı numuneye göre daha fazladır. Bu numunede çökelti boyutu 15 µm 'a kadar çıkarken 47 numaralı numunede en yüksek 10 µm analiz edilmiştir. Bu durumu açıklamaktadır.

Tablo 15

10 numaralı numune için çökelti boyutu dağılımı

Başlangıç (µm)	Bitiş (µm)	Adet	Miktar %	Kümülatif %
0,50	0,63	186	12,45	12,45
0,63	0,79	141	9,44	21,89
0,79	0,99	201	13,45	35,34
0,99	1,24	144	9,64	44,98
1,24	1,55	161	10,78	55,76
1,55	1,95	138	9,24	65
1,95	2,45	119	7,97	72,97
2,45	3,07	109	7,3	80,27
3,07	3,85	103	6,89	87,16
3,85	4,8	58	3,88	91,04
4,8	6,1	60	4,02	95,06
6,1	7,6	44	2,95	98,01
7,6	9,5	19	1,27	99,28
9,5	12	9	0,6	99,88
12	15	2	0,13	100

4.6.3. 60 Numaralı Numune için Çökelti Boyut Dağılımı

Taranan alanda en yoğun miktar için 131 parça tespit edilmiş olup boyutları 1,43–1,66 µm aralığındadır. Bu boyut aralığı, tüm parçacıkların %9,69'unu oluşturmuştur. Sonraki çökelti boyutu en yoğun olan aralıklar 0,50–0,58 µm (%8,65) , 1,06–1,23 µm (%8,28) ve 0,78–0,91 µm (%7,69)'dir. Çökelti boyutu dağılımı Tablo 16'da verilmiştir. Çökeltilerin %70,77'si 0,5–2,24 µm aralığındadır. Bu aralık ince çökelti dağılımını ifade etmektedir .180 ^{0}C 'de 10 saat yaşlandırma yapılan bu numune için sertlik çekme mukavemeti 279,7 MPa ve sertlik 99 HB elde edilmiştir. Mg_2Si ince çökeltilerinin yapıya mukavemet kazandırdığı söylenebilir.

Tablo 16

60 numaralı numune için çökelti boyutu dağılımı

Başlangıç (µm)	Bitiş (µm)	Adet	Miktar %	Kümülatif %
0,5	0,58	117	8,65	8,65
0,58	0,67	94	6,95	15,61
0,67	0,78	36	2,66	18,26
0,78	0,91	104	7,69	25,95
0,91	1,06	104	7,69	33,64
1,06	1,23	112	8,28	41,92
1,23	1,43	91	6,73	48,65
1,43	1,66	131	9,69	58,34
1,66	1,93	90	6,66	65
1,93	2,24	78	5,77	70,77
2,24	2,6	73	5,4	76,17
2,6	3,02	77	5,7	81,87
3,02	3,5	60	4,44	86,31
3,5	4,07	67	4,96	91,27
4,07	4,73	48	3,55	94,82
4,73	5,49	30	2,22	97,04
5,49	6,4	16	1,18	98,22
6,4	7,4	13	0,96	99,18
7,4	8,6	9	0,67	99,85
8,6	10	2	0,15	100

4.6.4. 71 Numaralı Numune için Çökelti Boyutu Dağılımı

Taranan alanda en yoğun miktar için 256 parça tespit edilmiş olup boyutları 0,79–0,99 µm aralığındadır. Bu boyut aralığı, tüm parçacıkların %14,41'ini oluşturmuştur. Sonraki çökelti boyutu en yoğun olan aralıklar 0,50–0,63 µm (%11,94) , 1,24–1,55 µm (%11,77) ve 0,99–1,24 µm (%11,37)'dir. Çökelti boyut dağılımı Tablo 17'de verilmiştir. 165^0C de 1 saat yaşlandırma yapılan numune için çekme mukavemeti 174,52 MPa ve sertlik 55,7 HB ölçülmüştür. Çökeltilerin %70,6'sı 0,50–1,95 µm aralığındadır. Bu aralık ince çökelti dağılımını ifade ettiği söylenebilir. Mukavemetin düşük olması yaşlandırma süresinin ilk saati olması kaynaklıdır. Yaşlandırma süresi arttıkça sertlik ve mukavemetin arttığı görülmüştür.

Tablo 17

71 numaralı numune için çökelti boyutu dağılımı

Başlangıç (µm)	Bitiş (µm)	Adet	Miktar %	Kümülatif %
0,5	0,63	212	11,94	11,94
0,63	0,79	189	10,64	22,58
0,79	0,99	256	14,41	36,99
0,99	1,24	202	11,37	48,36
1,24	1,55	209	11,77	60,13
1,55	1,95	186	10,47	70,6
1,95	2,45	158	8,9	79,5
2,45	3,07	143	8,05	87,55
3,07	3,85	83	4,67	92,22
3,85	4,8	68	3,83	96,05
4,8	6,1	44	2,48	98,53
6,1	7,6	16	0,9	99,43
7,6	9,5	8	0,45	99,88
9,5	12	2	0,11	100

BEŞİNCİ BÖLÜM
SONUÇ VE ÖNERİLER

5.1. Sonuç

Çalışmada AA6005 alüminyum alaşımı iki farklı soğutma yönetimi ile soğutulmuştur. Birinci grup numuneler ekstrüzyon sonrası kendiliğinden yani havada soğutulmuştur. İkinci grup numuneler ekstrüzyon sonrası fan ve sprey su ile soğutulmuştur. Daha sonra iki grup numune de 165^0C , 180^0C , 210^0C ve 230^0C 'lerde her sıcaklıklık için 1 saatten başlayarak 10 saate kadar suni olarak yaşlandırma fırınında yaşlandırılmıştır. Her saat sonunda numuneler fırından çıkarılarak oda sıcaklığında soğumaya bırakılmıştır. Bu numunelerin hepsine çekme testi , sertlik ölçümü ve optik analiz yapılmıştır. Fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra yaşlandırma yapılan numunelerden en yüksek çekme/akma ve sertliğe sahip 47 numaralı numune ve en düşük çekme/akma ve sertliğe sahip 10 numaralı numune için çökelti boyutu dağılım analizi ve SEM/EDS analizi yapılmıştır. Kendiliğinden soğumaya bırakıldıktan sonra suni yaşlandırma işlemi yapılan numunelerden en yüksek çekme/akma mukavemetine ve sertliğe sahip 60 numaralı numune ve en düşük çekme/akma mukavemetine ve sertliğe sahip 71 numune için de çökelti boyutu dağılım analizi ve SEM/EDS analizi yapılmıştır.

Bu numuneler için mekanik değerlerin yer aldığı özet veriler Tablo 18'de verilmiştir.

Tablo 18

Yaşlandırma sonrası en yüksek ve en düşük mukavemet değerleri

Numara	**Isıl İşlem Reçetesi**	**Yaşlandırma Süresi**	**Sertlik (HB)**	**Çekme (N/mm²)**	**Akma (N/mm²)**
47	180^0C Fan ve Sprey Su	7 saat	98,5	286,28	265,62
60	180^0C Kendiliğinden Soğuma	10 saat	99	279,7	255,12
10	230^0C Fan ve Sprey Su	10 saat	64,7	200,39	162,88
71	165^0C Kendiliğinden Soğuma	1 saat	55,7	174,52	89,87

İki farklı soğuma türü için de yaşlandırma sonrası yüksek çekme/ama dayanımları ve sertlik elde edilmiştir.

Optik görseller ve SEM analizinde çökeltilerin genellikle çubuklar ve küreler şeklinde olduğu ve homojen olarak dağıldığı gözlemlenmiştir. Çubuksu tanelerin AlFeSi ve küresel tanelerin Mg_2Si çökeltileri olduğu literatür bilgileri ile de doğrulanmıştır (Gümüşsoy, A. 2024).

Çökelti boyut analizinde incelenen dört numune için de tanelerin %70 inin ortalama 0,5-2,60 µm aralığında olduğu görülmüştür. Bu da ince dağılımlı bir çökelti yapısını göstermektedir.

47 numara için çökeltilerin %74,88'i 0,50-2,60 µm aralığındadır.

10 numara için çökeltilerin %72,97 'si 0,50–2,45 µm aralığındadır.

60 numara için çökeltilerin %70,77'si 0,5–2,24 µm aralığındadır.

71 numara için çökeltilerin %70,6'sı 0,50–1,95 µm aralığındadır.

5.2. Öneriler

Fan ve sprey su ile soğutulduktan sonra yaşlandırma yapılan numuneler için yüksek sıcaklıkta (230 °C ve 210 °C) yaşlandırma, mukavemet değerlerini daha kısa sürede arttırsa da hızla aşırı yaşlandırmaya geçiş yaptığı görülmüştür. Bu nedenle bu sıcaklıklar kontrollü uygulanmalıdır. Düşük sıcaklıkta (180 °C ve 165 °C'de) daha uzun süreli yaşlandırmaların daha dengeli çökelme davranışları sağladığı görülmüştür. Bu durum çökelme sertleşmesi ile açıklanabilir.

Kendiliğinden soğutulduktan sonra yaşlandırma yapılan numuneler için yüksek sıcaklıklarda (230 °C ve 210 °C) aşırı yaşlanma etkisi hakim olup, düşük sıcaklıkta (180 °C ve 165 °C'de) sertlik ve mukavemet değerlerinin zamana bağlı artığı gözlemlenmiştir. Düşük sıcaklıklarda sürenin de kontrollü bir şekilde uygulandığı yaşlandırma işlemi yapıya istenilen mukavemeti kazandırıcaktır. Çökeltiler ince taneler şeklinde çökelecek ve dislokasyon hareketi zorlaşacaktır.

Alüminyum alaşımlarının dayanımı, katı hal çekirdeklenmesi ve büyümesi sonucu oluşan ince çökelti dağılımından kaynaklanır. Yüksek mukavemet, dislokasyon hareketine direnç gösteren yoğun , ince taneli ve sıkı aralıklı çökeltilerin varlığı sayesinde kazanılacaktır (Ologunye, Azeez, Fadarat, Hadı ,2023).

Çökelti boyut dağılımları incelendiğinde dağlama etkisi kaynaklı düşünülen fazlarda belirgin bir fark çıkmamıştır. Çökelti boyutundan alaşımın mukavemet değerleri hakkında daha net yorum yapmak için farklı bir dağlayıcı kullanılabilir.

Ekstrüzyondan sonra profilin doğal yaşlandırma süresini daha uzun tuttuktan sonra suni yaşlandırma denenebilir. Doğal yaşlanma süresi uzun olan profilin mukavemeti daha iyi olacaktır ve buna uygulanacak ısıl işlem etkileri araştırabilir.

Fan ve sprey su ile soğutulan ve kendiliğinden soğutulan numuneler için 165^0C ‘de 10 saat üzeri yaşlandırma deneyleri devam edilebilir.

KAYNAKÇA

Ahmed, M. S., Anwar, M. S., Islam, M. S., Arifuzzaman, M. (2023). Experimental study on the effects of three alloying elements on the mechanical, corrosion and microstructural properties of aluminum alloys. Results in Materials, 20, 100485.

Al-Saadı, H. I. A., Tunay, R. F. (2017). Suni yaşlandırma işleminin alüminyum alaşımının sertliği üzerine etkisi. Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 5(3), 525–532.

Aluminum Association. (1984). Aluminum: Properties and physical metallurgy. ASM International.

Ashkenazi, D. (2019). How aluminum changed the world: A metallurgical revolution through technological and cultural perspectives. Technological Forecasting and Social Change, 143, 101–113.

ASM International, (1993). Aluminum and Aluminum Alloys.

Atwood, D. A., Yearwood, B. C. (2000). The future of aluminum chemistry. Journal of Organometallic Chemistry, 600, 186–197.

Aydın, H., Şendeniz, M., Demirci, A. H. (2009). Ekstrüzyon öncesi ve sonrası uygulanan ısıl işlemlerin AA 6063 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 14(2).

Callister, W. D., Jr., Rethwisch, D. G. (2020). Callister's materials science and engineering. John Wiley and Sons.

Cardarelli, F. (2008). Materials handbook: A concise desktop reference.

Cavazos, J. L., Colás, R. (2001). Precipitation in a heat-treatable aluminum alloy cooled at different rates. Materials Characterization, 47(3-4), 175-179.

Cobden, R., Banbury, A. (1994). Aluminium: Physical properties, characteristics and alloys. Training in aluminium application technologies. Alcan. Banbury: European Aluminium Association.

Çobiltum (2025). Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Merkezi.

Davis, J. R. (1993). Aluminum and aluminum alloys. ASM International.

Davis, J. R. (Ed.). (1999). Corrosion of aluminum and aluminum alloys. ASM International.

Dilmeç, M., Tınkır, M., Arıkan, H. (2015). Al 2024 alaşımının çökelme sertleşmesi işlemi koşullarının şekillendirilebilirliğe etkisinin incelenmesi. Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 30(1), 231-248.

Dwight, J. (1998). Aluminium design and construction. CRC Press.

Epstein, S. G., Kaufman, J. G., Pollak, P. (1994). Aluminum and its alloys. Washington, DC: Aluminum Association.

Gandhi, C. (1999). Effect of homogenization on the microstructural development in a DC cast AA3104 aluminum alloy used for canbody stock (Doctoral dissertation, University of British Columbia).

Grigoriev, S. N., Mironov, A., Kuznetsova, E., Pristinskiy, Y., Podrabinnik, P., Pinargote, N. W. S., Smirnov, A. (2021). Enhancement of the mechanical and tribological properties of aluminum-based alloys fabricated by SPS and alloyed with Mo and Cr. Metals, 11(12), 1900.

Gümüşsoy, A. (2024). EN AW-6082 alüminyum alaşımında soğuma hızının mikroyapı ve mekanik özelliklere etkisinin incelenmesi (Yüksek Lisans tezi, Marmara Üniversitesi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi. https://tez.yok.gov.tr

Hasanov, R. I., Giyasova, Z., Musayeva, R., Zemri, B. E., Kazimova, A. (2024). Examining the relationship between primary aluminium production and accident rates. International Journal of Safety and Security Engineering, 14(5), 1403–1408. http://iieta.org/journals/ijsse

Hussey, R. J., Wilson, J. (2013). Light Alloys: Directory and Databook. Springer Science and Business Media.

Kaufman, J. G. (2000). Introduction to aluminum alloys and tempers. ASM International.

Kaufman, J. G. (2006). Aluminum alloys. Materials and Mechanical Design, 59, 59–116.

Kumar, N. S., Pramod, G. K., Samrat, P., Sadashiva, M. (2022). A critical review on heat treatment of aluminium alloys. Materials Today: Proceedings, 58, 71–79.

Lumley, R. (Ed.). (2010). Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications. Elsevier.

Mahmood, N. J. (2018). The effect of adding different percentages of copper on corrosion of pure aluminum. Tikrit Journal of Pure Science, 23(2), 123–128.

Mazzolani, F. M. (2004). Competing issues for aluminium alloys in structural engineering. Progress in Structural Engineering and Materials, 6(4), 185–196.

Mondolfo, L. F. (1976). Aluminum alloys: Structure and properties. Boston: Butterworths.

Mrówka-Nowotnik, G., Sieniawski, J. (2005). Influence of heat treatment on the microstructure and mechanical properties of 6005 and 6082 aluminium alloys. Journal of Materials Processing Technology, 162, 367-372.

Nascimento, M. S., Santos, G. A. D., Teram, R., Santos, V. T. D., Silva, M. R. D., Couto, A. A. (2019). Effects of thermal variables of solidification on the microstructure, hardness, and microhardness of Cu-Al-Ni-Fe alloys. Materials, 12(8), 1267.

Ologunye, O., Azeez, R., Fadarat, G., Hadı, I. (2023). Precıpıtatıon hardenıng of Alumınum Alloys-A.

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

Peng, M., Li, C., Wei, H., Lv, Q., Li, Z., Zhang, F. (2024). Study on the mechanism of improvement of mechanical properties of Al–Mg–Si aluminum alloys by Cu and Ce. Journal of Materials Research and Technology, 33, 3790–3808.

Polmear, I. J. (2006). Light alloys: From traditional alloys to nanocrystals. Butterworth-Heinemann.

Rana, R. S., Purohit, R., Das, S. (2012). Reviews on the influences of alloying elements on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloys and aluminum alloy composites. International Journal of Scientific and Research Publications, 2(6), 1–7.

Saha, P. K. (2000). Aluminum extrusion technology. ASM International.

Saraç, İ., Durna, M. A. (2023). Ekstrüzyon yöntemiyle üretilmiş AA6060 profilde ön ısıtma sıcaklığının sertliğe etkisinin deneysel olarak araştırılması. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 6(2), 219–231.

Sheppard, T. (2013). Extrusion of aluminium alloys. Springer Science and Business Media.

Sistem Alüminyum (2025). Sistem Alüminyum Sanayi ve Ticaret Anonim Şirketi

Sivasankaran, S. (Ed.). (2017). Aluminium alloys: Recent trends in processing, characterization, mechanical behavior and applications.

Sun, Y. (2023, November). The use of aluminum alloys in structures: Review and outlook. Structures, 57, 105290. Elsevier.

TSE, Türk Standardları Enstitüsü. Alüminyum ve alüminyum alaşımları – Kimyasal bileşim ve biçimlendirilebilir ürünlerin şekli - Bölüm 3: Kimyasal bileşim Türkiye: Türk Standardları Enstitüsü, Kabul Eylül 2022, ICS 77.120.10; 77.150.10

Totten, G. E., MacKenzie, D. S. (2003). Handbook of aluminum: Volume 1: Physical metallurgy and processes. Marcel Dekker.

Wang, D., Xu, G., Tan, T., Liu, S., Dong, W., Li, F., Liu, J. (2022). The oxidation process and methods for improving reactivity of Al. Crystals, 12(9), 1187. https://doi.org/10.3390/cryst12091187MDPI

Yüksel, B. (2017). 6063 alüminyum alaşımının sertliği ve taneler arası korozyonu üzerine suni yaşlandırmanın etkisi. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 23(4), 395–398.