



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ



Zr VE/VEYA V İLAVESİNİN Al-Si
ALAŞIMLARININ YAPISAL VE MEKANİK
ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN
İNCELENMESİ

Enes CANBAZ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
Anabilim Dalı

Temmuz-2021
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.

Enes CANBAZ

Tarih: 01/07/2021

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Zr VE/VEYA V İLAVESİNİN Al-Si ALAŞIMLARININ YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Enes CANBAZ

Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM

2021, 60 Sayfa

Jüri

Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM
Dr. Öğr. Üyesi İlyas ŞAVKLIYILDIZ
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI

Alüminyum alaşımları yapısal uygulamalarda hafif olmaları, bağlı dayanımlarının yüksek olması ve üstün korozyon/oksidasyon dirençlerinden dolayı çelikten sonra en çok kullanılan ikinci metal grubudur. Alüminyum alaşımlarının üstün fiziksel ve mekanik özellikleri uygulanan ısıtma işlemi ve yapısında bulunan alaşım elementinin türüne ve miktarına bağlıdır. Al-Si esaslı döküm alaşımları ise otomotiv endüstrisinde yakıt tüketiminin azaltılması ve taşıtların hafifletilmesi gibi sebeplerden dolayı en çok tercihe edilen gruptur. Bununla birlikte, Al alaşımlarının taşıtlarda çeliğin yerine kullanılabilmesi için mekanik özelliklerinin daha da artırılması gerekmektedir.

Bu kapsamda otomotiv endüstrisinde kullanılan ve gün geçtikçe kullanım alanı artan ticari alüminyum döküm alaşımlarından AlSi10Mg alaşımının mevcut mekanik özelliklerinin Zr ve/veya V ilavesi ile artırılması amaçlanmıştır. Çalışma kapsamında kullanılan alaşımlar metal kalıba döküm yöntemi ile üretilmiş ve farklı sürelerde T6 ısıtma işlemi (500 °C'de 1 saat çözeltiye alma-190 °C'de 1, 4, 16 ve 64 saat yaşlandırma) uygulanmıştır. Zr ve/veya V ilavesinin ticari AlSi10Mg alaşımının mikroyapısına, faz ilişkilerine, dönüşüm sıcaklıklarına ve mekanik özelliklerine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Alaşımların mikroyapısı optik mikroskop ile faz analizleri X-ışınları kırınımı (XRD) ile ötektik dönüşüm sıcaklıkları ise termal analiz yöntemi ile incelenmiştir. Dökülmüş haldeki ve ısıtma işlemi görmüş numunelerin mekanik özellikleri Brinell sertlik ve çekme testleri ile ölçülmüştür. Zr ve/veya V ilavesinin mikroyapı ve diğer yapısal özelliklere çok fazla etkisi olmamasına rağmen, AlSi10Mg alaşımının mekanik özelliklerinin % 0,2 Zr ve % 0,5 V ilavesi ile önemli ölçüde arttığı gözlemlenmiştir. Hatta, 64 saat yaşlandırılmış % 0,2 Zr ve % 0,5 V ilaveli alaşım sırasıyla 212 ve 250 MPa akma ve çekme dayanımı göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Al-Si alaşımları, Döküm, Yaşlandırma, Mikroyapı, Mekanik özellikler.

ABSTRACT

MS THESIS

EFFECT OF Zr AND/OR V ADDITION ON STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF Al-Si ALLOYS

Enes CANBAZ

**Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Metallurgy and Materials Engineering**

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM

2021, 60 Pages

Jury

**Assoc. Prof. Dr. Mehmet YILDIRIM
Asst. Prof. Dr. İlyas ŞAVKLIYILDIZ
Asst. Prof. Dr. Gökhan ARICI**

Aluminum alloys are the second mostly used metal group after steels due to their light weight, high relative strength and superior corrosion/oxidation resistance in structural applications. The superior physical and mechanical properties of aluminum alloys strongly depend on the applied heat treatment and the type and amount of alloying element. Al-Si based cast alloys are the most preferred group in the automotive industry for reasons such as reducing fuel consumption and lightening vehicles. However, for an Al alloy to be used as a potential material for steel in vehicles, their mechanical properties need to be further increased.

In this manner, it is aimed to increase the mechanical properties of commercial AlSi10Mg cast alloy, which is used in the automotive industry, by addition of Zr and/or V. In the present study, the alloys were produced by metal mold casting method and subsequently heat treated (T6 heat-treatment solutionizing at 500 °C for 1 hour and aging at 190 °C for 1, 4, 16 and 64 hour). The effects of Zr and/or V addition on the microstructure, phase relationships, transformation temperatures and mechanical properties of commercial AlSi10Mg alloy were investigated in detail.

The microstructure of the alloys was investigated by optical microscope, phase analysis was performed with, X-ray diffraction (XRD) and eutectic transformation temperatures were measured by thermal analysis method. The mechanical properties of the as-cast and heat treated samples were determined by Brinell hardness and tensile tests. Although the addition of Zr and/or V did not have much effect on the microstructure and other structural properties, it was observed that the mechanical properties of the AlSi10Mg alloy increased significantly with the addition of 0.2 % Zr and 0.5 % V. Moreover, 64 hours aged 0.2 % Zr and 0.5 % V containing alloy, exhibited yield and tensile strengths of 212 and 250 MPa, respectively.

Keywords: Al-Si alloys, Casting, Aging, Microstructure, Mechanical properties.

ÖNSÖZ

Çalışmalarım sürecinde yardımlarını ve deneyimlerini benden esirgemeyen bana ışık tutan danışmanım Doç. Dr. Mehmet YILDIRIM'a, karşılaştığım sorunları hiçbir zaman çözümsüz bırakmayan, deneyler aşamasında bana her konuda yardımcı olan değerli hocalarım Arş. Gör. Dr. Mehmet Şahin ATAŞ ile Dr. Öğr. Üyesi Gökhan ARICI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Tez kapsamında kullanmış olduğum külçelerin tedarik edilmesi ve üretilmesinde yardımlarını esirgemeyen RMT Metalurji San. Tic. Ltd. Şti. firmasına, çekme çubuklarının işlenmesi konusunda bana yardımcı olan Proton Metal Döküm Talaşlı İmalat San. Tic. Ltd. Şti. firmasına, ergitme işlemi, yaşlandırma, metalografik işlemler ve deneysel işlemler için gereken cihaz, araç ve diğer malzeme ihtiyaçlarımı karşılayan Konya Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümüne ve bölüm laboratuvarlarında çalışan meslektaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Ayrıca çalışmalarım sırasında yanımda olan, maddi ve manevi yardımlarını benden esirgemeyen aileme sonsuz teşekkür ederim.

Enes CANBAZ
KONYA-2021

İÇİNDEKİLER

ÖZET	iv
ABSTRACT.....	v
ÖNSÖZ	vi
İÇİNDEKİLER	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR	ix
ŞEKİL LİSTESİ.....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
1. GİRİŞ	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	3
2.1 Alüminyum	3
2.1.1 Alüminyumun tarihçesi.....	5
2.1.2 Alüminyumun özellikleri.....	6
2.2 Alüminyum Alaşımları.....	7
2.2.1 Alüminyum dövme alaşımları	8
2.2.2 Alüminyum döküm alaşımları	9
2.3 Al-Si Döküm Alaşımları	10
2.3.1 Al-Si ikili alaşımı.....	11
2.3.2 Al-Si-Cu alaşımı	11
2.3.3 Al-Si-Mg alaşımı	12
2.4 Al-Si Denge Diyagramı.....	12
2.5 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri	13
2.6 Alüminyum Alaşımlarına Elementlerin Etkisi.....	16
2.6.1 Bakır etkisi	16
2.6.2 Silisyum etkisi.....	16
2.6.3 Magnezyum etkisi.....	17
2.6.4 Mangan etkisi.....	17
2.6.5 Çinko etkisi	17
2.6.6 Titanyum etkisi	18
2.6.7 Demir etkisi.....	18
2.6.8 Nikel etkisi	18
2.6.9 Sodyum etkisi	18
2.6.10 Fosfor etkisi	18
2.6.11 Hidrojen etkisi.....	19
2.6.12 Kalsiyum etkisi	19
2.6.13 Kurşun etkisi	19
2.6.14 Lityum etkisi	19
2.6.15 Stronsiyum etkisi	19
2.6.16 Zirkonyum etkisi.....	19
2.6.17 Bor etkisi.....	20
2.6.18 Vanadyum etkisi	20

2.6.19	Krom etkisi	20
2.7	Alüminyum Alaşımlarında Mikroyapının Mekanik Özelliklere Etkisi	20
2.7.1	İntermetalik fazlar	20
2.7.2	Dendrit kol aralığı	21
2.7.3	Tane inceltme	21
2.7.4	Ötektik modifikasyon	22
2.8	Al-Si Döküm Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Performansı	23
3.	MATERYAL VE YÖNTEM.....	25
3.1	Üretim	25
3.1.1	Hammaddeler	25
3.1.2	Ergitme ocağı	26
3.1.3	Döküm kalıbı	26
3.1.4	Döküm işlemi	26
3.2	Isıl İşlem	28
3.3	Karakterizasyon	29
3.3.1	Kimyasal analiz	29
3.3.2	Mikroyapı analizi	29
3.3.3	Termal analiz	30
3.3.4	Faz analizi	30
3.3.5	Sertlik testi	31
3.3.6	Çekme testi	32
3.3.7	Aşınma testi	33
4.	ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	34
4.1	Kimyasal Analiz Sonuçları	34
4.2	Faz Analiz Sonuçları	34
4.3	Mikroyapı Analizi Sonuçları	35
4.4	Termal Analiz Sonuçları	39
4.5	Sertlik Sonuçları	40
4.6	Çekme Sonuçları	41
4.7	Aşınma Testi Sonuçları	42
5.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER	44
5.1	Sonuçlar	44
5.2	Öneriler	45
KAYNAKLAR		46
ÖZGEÇMİŞ	Hata! Yer işareti tanımlanmamış.	

SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

%	: Yüzde
Al	: Alüminyum
Al ₂ O ₃	: Alüminyum Oksit
B	: Bor
°C	: Derece Celcius
cm ³	: Santimetreküp
CO ₂	: Karbondioksit
Cr	: Krom
Cu	: Bakır
Fe	: Demir
L ₀	: İlk Boy Ölçüsü
Li	: Lityum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Si	: Silisyum
Sr	: Stronsiyum
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
Zn	: Çinko
Zr	: Zirkonyum

Kısaltmalar

ASTM	: Amerika Malzeme ve Test Standartları Kurumu
cm	: Santimetre
DIN	: Alman Standartları Enstitüsü
DSC	: Diferansiyel Taramalı Kalorimetri
DTA	: Diferansiyel Termal Analiz
EDS	: Enerji Dağılım Spektrometresi
g	: Gram
HB	: Brinell Sertlik
HV	: Vickers Sertlik
kg	: Kilogram
MPa	: Mega Pascal
TGA	: Termogravimetrik Analiz
TSE	: Türk Standartları Enstitüsü
XRD	: X-Işınları Kırınımı
µm	: Mikrometre

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Al-Si faz diyagramı (Murray ve McAlister 1984).....	12
Şekil 2.2 a) Ötektik altı alaşımın mikroyapısı (<%12,6 Si) b) Ötektik alaşımın mikroyapısı (%12,6 Si) c) Ötektik üstü alaşımın mikroyapısı (>%12,6 Si) (Warmuzek, 2004).	13
Şekil 2.3 Isıl işlem prosesi (Uyaroğlu ve ark., 2010).	16
Şekil 3.1 Alaşımlama için kullanılan Al-5V, Al-10Zr külçeleri ve Al-5Ti-1B çubuğu. 25	
Şekil 3.2 Çalışma kapsamında kullanılan rezistanslı döküm ocağı	26
Şekil 3.3 Ocağa Al-5Ti-1B ilavesi	27
Şekil 3.4 Isıtılmış kalıba döküm işlemi	27
Şekil 3.5 Dökülen numuneler	27
Şekil 3.6 Protherm PLF 130/19 serisi kamara fırını	28
Şekil 3.7 Oxford Instruments Foundry Master model optik emisyon spektrometresi....	29
Şekil 3.8 Metkon Forcipol 2V zımpara cihazı.....	29
Şekil 3.9 Nikon Eclipse MA100 model optik mikroskop	30
Şekil 3.10 Mettler Toledo marka DSC analiz cihazı	30
Şekil 3.11 BRUKER D8 ADVANCE X-Işını Difraktometre test cihazı	31
Şekil 3.12 Digirock RBOV sertlik ölçüm cihazı	31
Şekil 3.13 Çekme çubuğu numunesi (verilen değerler mm cinsindedir)	32
Şekil 3.14 İşlenmiş çekme çubukları	32
Şekil 3.15 KT-AS marka çekme cihazı	32
Şekil 3.16 Aşınma testlerinde kullanılan UTS Tribolog aşınma test sistemi	33
Şekil 4.1 XRD sonuçları	35
Şekil 4.2 Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelere ait mikroyapı görüntüleri 100X	36
Şekil 4.3 Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelere ait mikroyapı görüntüleri 200X	37
Şekil 4.4 Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelere ait mikroyapı görüntüleri 500X	38
Şekil 4.5 EDS analizi.....	39
Şekil 4.6 AlSi10Mg, 0,2 Zr ve 0,2 Zr + 0,5 V termal analiz sonuçları	40
Şekil 4.7 Aşınma testi sonucunda elde edilen sürtünme kuvveti-sürtünme katsayısı eğrileri: (a) AlSi10Mg, (b) 0,2 Zr, ve (c) 0,2 Zr + 0,5 V alaşımları.	43

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Ticari AlSi10Mg alaşımının çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri (Geiser, 1982).	2
Çizelge 2.1 % 99.5 saflığa sahip alüminyumun genel özellikleri (Sarsılmaz, 2008).	4
Çizelge 2.2 Alüminyumun tarihsel gelişimi (Töre, 2012).	5
Çizelge 2.3 Alüminyum alaşımlarında ısıtım işlem kısaltmaları (Rooy, 1990).	14
Çizelge 3.1 ETİAL 171 alüminyum alaşımının % kimyasal bileşimi.	25
Çizelge 3.2 Al-5Ti-1B ve Al-10Sr master alaşımlarının % kimyasal bileşimi	25
Çizelge 3.3 Çalışmada yapılan döküm şartları	27
Çizelge 3.4 Aşınma testi parametreleri.....	33
Çizelge 4.1 Kimyasal analiz sonuçları	34
Çizelge 4.2 Termal analiz eğrilerinden ölçülen dönüşüm sıcaklıkları	39
Çizelge 4.3 Sertlik testi sonuçları	40
Çizelge 4.4 Çekme testi sonuçları	41
Çizelge 4.5 Aşınma testi sonuçlarına göre belirlenen sürtünme katsayısı değerleri	42

1. GİRİŞ

Alüminyum alaşımlarının sahip olduğu düşük yoğunluğu üstün mekanik ve yapısal özellikleri, düşük maliyetli olmaları, korozyon-oksidayon dayanımları, farklı üretim teknikleri ile üretilebilme olanakları bakımından demir-çelik esaslı metallere sonra yaygın olarak kullanılan ikinci metal grubu olup farklı sektörlerde sıklıkla kullanılmaktadır (Rooy, 1990; Vatansever ve ark., 2018).

Yakıt tüketiminin doğrudan taşıt ağırlığına bağlı olduğu otomotiv sektöründe araçların hafifletilmesi amacıyla demir-çelik esaslı parçalar yerine dökme demir veya çelikten çok daha hafif alüminyum esaslı alaşımların kullanımı giderek artmaktadır. Al esaslı alaşımlardan üretilen motor bloğu, motor kapağı, pompa, dişli kutusu, silindir başlığı, piston ve çeşitli sacdan imal edilmiş parçalar binek, ticari ve ağır vasıta taşıtlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sigworth, 2014).

Al-Si alaşımları, Al-Cu alaşımlarından sonra kullanılan ikinci en yaygın alaşım grubunu oluşturmaktadır. Si varlığının alaşımın yapısal özelliklerine önemli katkıları vardır: (i) sıvı haldeki alüminyumun akışkanlığı artar, (ii) alaşımın ergime sıcaklığı azalır, (iii) soğuma sırasında çekme olasılığı azalır, (iv) alaşımın maliyeti düşer ve (v) silisyumun da hafif olmasından kaynaklı üretilen parça ağırlığı da önemli ölçüde azalır (Kalhapure ve ark., 2015; Rana ve ark., 2012). Ayrıca alüminyum içerisinde katı hal çözünürlüğünün düşük olması, alüminyum matris fazında silisyum esaslı çökeltilerin oluşumuna sebep olmaktadır. Bu durum alaşımın sertlik ve dayanım gibi oda sıcaklığındaki mekanik özelliklerini arttırmaktadır (Kalhapure ve ark., 2015).

Al-Si esaslı alaşımlar, silisyum içeriklerine göre ötektik-altı, ötektik ve ötektik-üstü olmak üzere üç ana gruba ayrılmaktadır. Ötektik-altı Al-Si alaşımları ağırlıkça % 12'den daha az Si içeren alaşımlar olup genelde % 5-10 aralığında Si içermektedir. Dayanım ve sünekliğin bir arada olması istenilen uygulamalarda kullanılmaktadır. Ötektik Al-Si alaşımları ise ağırlıkça % 12 civarında Si içermekte olup ötektik mikroyapıya sahiptirler. Dar katılaşma aralığına sahip olmaları, yüksek akışkanlık ve dökülebilirlik ötektik alaşımların üst düzey özellikleri olarak ön plana çıkmaktadır. Ayrıca, ötektik Al-Si alaşımları yüksek aşınma direncine ve sünekliğe sahiptirler. Ötektik-üstü Al-Si alaşımları ağırlıkça % 12'den daha fazla Si içeren alaşımlar olup genelde % 15-20 aralığında Si içermektedir. Ötektik-üstü alaşımların üst düzey özellikleri ise, yüksek aşınma direnci ve dayanımıdır. Sahip olduğu bu özelliklerinden

ötürü motor pistonları gibi yüksek aşınma direnci istenen uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Sigworth, 2014).

Tez çalışması kapsamında ötektik-altı bileşime sahip Al-Si esaslı ticari AlSi10Mg alaşımı kullanılmıştır. Ağırlıkça % 9-10 civarında Si içeren ticari AlSi10Mg alaşımı farklı ülke standartlarında farklı isimlerle de adlandırılmaktadır. Ülkemizde ETİAL (Eti Alüminyum)-171 olarak ta bilinen bu alaşımın diğer standartlardaki gösterimleri ENAC-43000, A360, 360.0 ve L-2560 şeklindedir. AlSi10Mg ticari alaşımı çoğunlukla otomotiv ve havacılık sektörleri olmak üzere otomotiv endüstrisinde özellikle ince et kalınlığına sahip karmaşık geometrili parçaların üretilmesinde kullanılmaktadır. Ayrıca diğer özellikleri Çizelge 1.1'de verilmiştir (Geiser, 1982).

Çizelge 1.1 Ticari AlSi10Mg alaşımının çeşitli fiziksel ve mekanik özellikleri (Geiser, 1982).

Yoğunluk (gram/cm ³)	2,68
Erime Noktası (°C)	555-590
Çekme Mukavemeti, döküm (MPa)	176
Çekme Mukavemeti-T6 ısıt işleme (MPa)	245
Uzama (%)	3
Sertlik Değeri (Brinell)	70
Isıl iletkenlik (W/cm K) (25 °C'de)	1,39-1,60

Bununla birlikte Al-Si alaşımlarının 150 °C üstü sıcaklıklardaki çalışma performansı düşük olup benzinli veya dizel motorların silindir başlıkları (kafaları) gibi uygulamalarında büyük problemler ortaya çıkarmaktadır. Bu kapsamda Al-Si döküm alaşımlarına Zr, V ve Ti alaşım ilavesi yapılarak hem tane inceltme hem de yüksek sıcaklık performansının artırılmasına yoğun bir ilgi gösterilmektedir. Bu çalışmada Zr ve/veya V ilavesinin ticari AlSi10Mg alaşımının mikroyapısına, faz ilişkilerine, dönüşüm sıcaklıklarına, mekanik özelliklerine ve yaşlandırma kabiliyetine etkisi detaylı bir şekilde incelenmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

2.1 Alüminyum

Demir ve çelikten sonra dünyada en çok kullanılan metal olan alüminyum; işlenebilme kabiliyeti, dökülebilirliği, hafifliği, üstün korozyon dayanımı ısı-elektrik iletkenliği ve yaşlanma ile dayanımının artırılabilmesi gibi pek çok üstün özelliğinden dolayı elektrik-elektronik, tarım, inşaat, gıda, otomotiv ve havacılık gibi sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Bolton, 1993; Sharma ve ark., 2005).

Periyodik cetvelde 3A grubunda bulunan alüminyum 13 atom numarasına ve 26,981538 g/mol atom ağırlığına sahiptir. İyon ve atom çapı sırasıyla 0,86 ve 1,43 Å'dur. Yüzey merkezli kübik (YMK) kristal yapısına sahip olan Al erime sıcaklığı 658 °C' ye kadar kararlı olup herhangi bir yapısal dönüşüme uğramaz. Al yer kabuğunda % 8 oranı ile en çok bulunan metaldir (Sarsılmaz, 2008).

Temel Al kaynağı alüminyum esaslı hidroksitlerdir ($AlOOH$ ve $Al(OH)_3$). Kostik soda ($NaOH$) çözeltisi ile zenginleştirilen ve Bayer yöntemiyle boksitin kimyasal formülü $Al_2O_3 \cdot 2H_2O$ 'dür. Hidrat suyu içeren diyasporit ($Al_2O_3 \cdot 2H_2O$) ve jipsit ($Al_2O_3 \cdot 3H_2O$) diğer boksit türleri olup alüminyum eksraktif metalürjisinde herhangi bir öneme sahip değillerdir. Al aktif bir metal olup havada bulunan oksijenle kolayca tepkimeye girerek yüzeyinde pasif Al_2O_3 (alümina) filmi oluşur. Alumina filmi ince olmasına rağmen alüminyumun yüksek sıcaklıktaki korozif etkilerden bile korumaktadır (Sarsılmaz, 2008).

SO_2 ve SO_3 gazlarına karşı da dayanıklı olan Al, $NaOH$ ve KOH baz çözeltilerinde kolayca erimekte aynı zamanda toz hali havada hızlıca yanmaktadır. Alüminyumun erime sıcaklığı ile saflık derecesi birbirleri ile doğru orantılı olup saf Al, Al esaslı alaşımlara kıyasla daha yüksek sıcaklıkta erimekte. Erime sırasında alüminyumun hacmi artmaktadır. % 99,65 saflığa sahip alüminyumda hacim artışı % 6,25 civarında iken; % 99,75 saflığa sahip olanda hacim artışı yaklaşık % 6,60 civarındadır. Alüminyumun yoğunluğu hem katı hem de sıvı halde saflığının artmasıyla azalmaktadır. Örneğin, % 99,25 saflıktaki Al 2,727 g/cm³ yoğunluğa sahip iken % 99,40 saflıktaki alüminyumun yoğunluğu 2,706 g/cm³'dür. Ayrıca, saflık derecesinin artmasıyla, alüminyumun ısıl ve elektrik iletkenliği de artmaktadır (Sarsılmaz, 2008).

Yüksek saflığa sahip Al, teknik saflığa sahip olana kıyasla çok daha sünek ve yumuşaktır. Ayrıca yüksek saflığa sahip olan alüminyumun dayanımı da oldukça

düşüktür. Örneğin, % 99,25 saflıktaki Al 71 GPa elastisite modülüne sahip iken, çok yüksek saflıktaki Al 71 GPa elastisite modülüne sahiptir. Diğer bir örnekle, % 99,2 saflıktaki alüminyumun sertliği 24-54 HB iken % 99,8 saflıkta olanın sertliği 19-41 HB arasındadır. Yapılan çalışmalar, alüminyumun çekme dayanımının saflık derecesi ile azaldığını göstermiştir. Bununla birlikte, kopma anındaki kesit daralması, en fazla yüksek saflıktaki alüminyumda ($> \% 99,9$) görülmüştür (Çizelge 2.1). Kısacası alaşım içerisindeki Al oranı arttıkça, süneklik artmaktadır.

Yüksek saflıktaki Al soğuk haddeleme sonrası 110-130 MPa çekme dayanımına sahip iken, tavlama sonrası bu değer 35-60 MPa aralığına kadar azalmaktadır. Uzama değerleri de % 5,5 ile % 40-50 mertebelerine kadar değişebilmektedir (Sarsılmaz, 2008).

Çizelge 2.1 % 99.5 saflığa sahip alüminyumun genel özellikleri (Sarsılmaz, 2008).

ÖZELLİK	DEĞER
Atom Numarası	13
Atom Ağırlığı	26,97 g/mol
Kristal Yapısı	YMK
Erime Sıcaklığı	660 °C
Yoğunluk	2,70 g/cm ³
Yeniden Kristalleşme Sıcaklığı	150-320 °C
Buharlaşma Sıcaklığı	2450 °C
Termal Genleşme Katsayısı	23,5 $\mu\text{m m}^{-1} \text{K}^{-1}$
Özgül Isısı	0,224kal/g (100°C'de)
Gizli Erime Isısı	94 kal/g
Çekme Dayanımı	40-100 MPa
Akma Dayanımı	10-30 MPa
Elastisite Modülü	72 x 10 ³ N/cm ²
Kayma Modülü	27 x 10 ⁵ N/cm ²
% Uzama	45
Kopma Uzaması (%)	30-40
Sertlik (Vickers)	20 (HV)
Çentik Darbe Enerjisi	100 J/cm ²
Elektriksel İletkenlik	% 59.5 IACS
Elektriksel Direnç	2,65 x 10 ⁻⁸ ohm metre
Katılma Sırasında Çekme Miktarı	% 6,7

2.1.1 Alüminyumun tarihçesi

Alüminyumun tarihteki ilk kullanımı 1800'lü yıllara dayanmaktadır (Töre, 2012). Geniş insan kitlelerinin alüminyumla tanışması, 1855 yılında Paris'te gerçekleştirilen "Paris Dünya Sergisi" ile olmuştur (Yüksel, 2003). Yaklaşık iki yüzyıldır en önemli mühendislik malzemelerinden biri olma özelliğini korumaktadır. Alüminyumun tarihsel gelişimi Çizelge 2.2'de gösterilmektedir (Töre, 2012).

Çizelge 2.2 Alüminyumun tarihsel gelişimi (Töre, 2012).

Yıl	Gerçekleşen Olay
1821	1. Fransa'da Les Boux köyünde % 52 oranında alüminyum oksit içeren kırmızı renkli toprak bulunması 2. Bu maden ismi yerleşim yerine istinaden "BAUXITE – boksit" olarak adlandırılmıştır.
1827	WOHLER, Almanya'da potasyumla su içermeyen alüminyum klorürü tepkimeye sokarak toz alüminyum elde edilmiştir.
1845	WOHLER, alüminyum yoğunluğunu 2,700 kg/m ³ olarak bulunmuştur.
1854	H. SAINTE – C. DEVILLE Fransa'da ilk ticari alüminyum üretimini gerçekleştirmiştir. O dönemde alüminyumun altın madeninden daha değerli olduğu bilinmektedir.
1855	Alüminyumun geniş kitlelerle tanışması (Paris Dünya Sergisi)
1886	Paul HEROULT ve Charles HALL birbirinden habersiz olarak alüminyum üretimini elektroliz yöntemini bulmuşlardır. Bu buluş Herolt – Hall yöntemi denilmiştir. Bu yöntem alüminyum üretiminin temelini oluşturur.
1888	İlk alüminyum endüstrisi Fransa, İsviçre ve Amerika'da kurulmuştur.
1889	F. BAYER (Avusturya), büyük ölçekli alüminyum üretimi için Bayer işlemini keşfetmiştir. Bu işlemle boksit madeni alüminyuma dönüştürülmektedir.

Yer kabuğunda en fazla bulunan üçüncü element % 8'lik oranıyla alüminyumdur. Alüminyum elementi doğada saf halde bulunmayıp boksit mineralinde (Al₂O₃.NH₂O) bulunduğundan keşfedilmesi biraz geç olmuştur. Alüminyumun ilk keşfi 1825 tarihine dayansa da etkili bir üretim yöntemi bulunduktan sonra kullanılmaya başlanmıştır. 1886 yılında Oberlin Koleji öğrencisi Charles Hall ve Fransız mühendis

Paul Heroult birbirlerinden haberleri olmadan aynı anda alüminadan alüminyum eldesi sağlayan ve pahalı olmayan bir elektroliz prosesi geliştirmişlerdir. 1887 yılında ise Avusturyalı mühendis Karl Josef Bayer boksit mineralinden alümina eldesi sağlayan kimyasal bir proses geliştirmiştir. Bayer prosesi ile boksit mineralinden alümina (Al_2O_3) eldesinden sonra saf alüminyum kazanımı için Hall-Heroult prosesi uygulanmaktadır. Kullanılmaya başladığı tarihten itibaren avantajlı özellikleri sayesinde alüminyumun kullanımı yaygınlaşmıştır. Bugün ise alüminyum dünyada en çok tüketilen demir dışı metaldir (Totten ve MacKenzie, 2003; Yıldırım, 2006).

2.1.2 Alüminyumun özellikleri

Alüminyum, çok çeşitli ticari uygulamalarda kullanılmakta olan gümüş renkli, düşük yoğunluklu ($2,7 \text{ g/cm}^3$) bir metal olup üstün fiziksel mekanik özelliklere sahiptir. Alüminyumun özellikleri şu şekilde sıralanmaktadır:

- Hafif ancak mukavemetli: Demir-çeliğe oranla yaklaşık olarak 1/3 oranındaki ağırlığına rağmen, alüminyum kayda değer bir mukavemet/ağırlık oranına sahiptir. Bir alaşım olarak çeliklere ve titanyuma mekanik özellikler olarak benzer performans sergilemektedir.
- Kolay şekillendirilebilme: Alüminyum sadece hafif değildir. Düşük bir ergime noktasına ($660 \text{ }^\circ\text{C}$) sahiptir ve oldukça sünektir. Bu nedenle kolaylıkla şekillendirilebilmektedir. Ayrıca alüminyumun işleme kabiliyeti de yüksektir.
- Mükemmel korozyon direnci: Alüminyum, yüzeyinde doğal bir Al_2O_3 tabakası oluşturarak kendisini korozyona karşı korumaktadır. Bu özelliği alüminyumu paketleme, inşaat ve taşıtlar için ideal bir malzeme yapmaktadır.
- Kimyasallara karşı direnç: Alüminyum ışık, koku ve kimyasallara karşı sızdırmazlık özelliğinin yanında kirlenmeye karşı dirençli olmasından dolayı temiz bir ortam sağlamaktadır.
- Enerji tasarrufu: Alüminyumun benzersiz özellikleri birçok uygulamada önemli enerji tasarrufu sağlamaktadır; örneğin otomobillerdeki 100 kg ağırlık azaltımında 100 km'de 0,315 litre yakıt tasarrufu sağlarken km başına 8 gram daha az CO_2 salınımı sağlamaktadır. Buna ek olarak, geri dönüştürülmüş alüminyum, birincil üretim enerjisinin sadece % 5'ini kullanan, yüksek enerji verimliliğine sahiptir.

Alaşımsız alüminyum sünek, orta mukavemet göstermekte ve çoğu durumda korozyona karşı oldukça dayanıklıdır. Alüminyum, uygun alaşım elementlerinin (Cu, Mg, Mn, Si, vb.) eklenmesi ve gerektiği durumlarda ısıtılarak uygulanarak mukavemeti arttırılabilmektedir. Hem dövme hem de döküm formlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Sarsılmaz, 2008; Başer, 2013).

2.2 Alüminyum Alaşımları

Alüminyum alaşımları saflık derecelerine ve kullanılan alaşım elementlerine göre sınıflandırılmaktadır. Al alaşımlarının mekanik özellikleri bileşiminde bulunan Cu, Zn, Si, Mg, Fe ve Ti gibi alaşım elementlerinin varlığı ile artmaktadır. Alüminyuma ilave edilen bu alaşım elementleri katı çözümleri veya çökelme sertleştirilmesi oluşturarak mukavemeti arttırmaktadır. Genel olarak ilave edilen alaşım elementinin miktarının artması ile mukavemet de artmaktadır ancak bu durum alaşımın plastik şekil değiştirebilme kabiliyetinin azalmasına sebep olmaktadır. Al alaşımlarının mekanik özellikleri plastik şekil verme işlemi ile uygulanan deformasyon sonucunda büyük ölçüde artabilmektedir (Anık ve ark., 2000).

Alüminyum alaşımlarının sınıflandırılmasında farklı standartlar kullanılmakta olup bunlardan en yaygın kullanılan Alüminyum Birliği'nin (The Aluminum Association) yayınladığı standarttır. Ayrıca TSE, DIN ve ASTM gibi farklı standartlar da kullanılmaktadır. Tüm bu standartların ortak noktası ise alüminyum alaşımlarını; dövme ve döküm alüminyum alaşımları olmak üzere iki ana başlık altında incelemesidir (Askeland, 2002; Eruslu ve ark., 1990). Alüminyumun döküm ve dövme alaşımları isimlendirme konusunda bir takım farklılıklar göze çarpmaktadır.

Alüminyum dövme alaşımları, dört basamaklı bir sayı (XXXX) şeklinde tanımlanmaktadır (Turhan, 2002). Döküm alaşımlarında ise üç basamaklı bir sayı ve gerekli görülmesi halinde alaşım ek işleme tabi tutulursa, üçüncü basamaktan sonra (.) konularak yapılan işlemin özelliğine göre numaralandırma işlemi yapılmaktadır. Eğer döküm yapılan alaşıma ek bir işlem yapılmıyorsa döküm alaşımı üç basamaklı (XXX) sayısı şeklinde görünmektedir. Yapılan numaralandırma işlemi, alüminyumun içerisine ilave edilen ağırlıkça en yüksek metalin türüne göre değişmektedir. Sınıflandırmada ilk rakam ilave edilen alaşım türünü göstermektedir (Töre, 2012).

2.2.1 Alüminyum dövme alaşımları

Alüminyum dövme alaşımları, kütük (ingot) şeklinde dökümü gerçekleştirilen alaşımın, plastik şekil verme suretiyle istenilen ürün haline getirilmesi işlemine denilmektedir. Dövme alaşımları; dövme, haddeleme veya ekstrüzyon yöntemleri gibi plastik şekil verme teknikleriyle üretilmektedirler.

Alüminyum dövme alaşımlarında en yaygın olarak kullanılan isimlendirme metodu Alüminyum Birliği tarafından geliştirilen ve dört rakamdan (XXXX) oluşandır. Dört rakamlı (XXXX) sayının, ilk rakamı; alaşımın sahip olduğu temel alaşım elementini kaynaklanmaktadır (Karabulak, 2007).

1XXX serisi, saf alüminyumu (en az % 99,00) göstermekte olup son iki rakam ise % 99 değerinin virgülden sonraki rakamlarını belirtmektedir. Baştan ikinci rakam ise, özel olarak alaşım elementlerinin sayısını belirtmekte ve 1'den 8'e kadar değişmektedir (Uludağ, 2011).

2.2.1.1 Alüminyum dövme alaşımları grupları

- 1XXX: Saf (yüksek saflıktaki) Al. Çoğunlukla elektrik ve kimya endüstrisinde kullanılmaktadır.
- 2XXX: Al-Cu alaşımları. Temel alaşım elementi Cu olup bileşiminde Mg da bulunabilmektedir. Yüksek dayanım gerektiren havacılık uygulamalarında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.
- 3XXX: Al-Mn alaşımları. Temel alaşım elementi Mn olup boru, sıvı tankları ve mimari uygulamalarda kullanılmaktadır.
- 4XXX: Al-Si alaşımları. Temel alaşım elementi silisyumdur. Isıl genleşme katsayısı düşük, aşınma ve korozyon direnci yüksek alaşımlardır. Kaynaklı yapılarda, levha üretiminde ve otomobil parçaları üretiminde kullanılmaktadır.
- 5XXX: Al-Mg alaşımları. Temel alaşım elementi magnezyumdur. Mg oranı arttıkça sertlik ve mukavemet artmakta ancak süneklik azalmaktadır. Deniz korozyonuna karşı yüksek dirence sahip olduğundan, bu tip ortamlarda çalışacak parçaların üretiminde kullanılmaktadır.
- 6XXX: Al-Mg-Si alaşımları. Ana alaşım elementleri Mg ve Si olup yüksek şekillendirilme kabiliyetine sahiptirler. Ekstrüzyon ile üretilen parçaların imalatında sıklıkla kullanılmaktadırlar.

- 7XXX: Al-Zn alaşımlar. Temel alaşım elementi Zn olup, Mg, Cr ve Zr diğer ilave alaşım elementleridir. 7XXX serisi, Al alaşımlarının en yksek mukavemete sahip olanı olup uçak paręaları gibi yksek dayanım istenen uygulamalarda kullanılmaktadır.
- 8XXX: Al-Li alaşımları: Temel alaşım elementi Li olup, Sn ilavesi de yapılabilir. Özellikle uçak ve uzay yapılarında kullanılmaya başlanan bu alaşım sınıfı, yksek yorulma direnci ve tokluğa sahiptir. Fakat diğer Al alaşımları ile kıyaslandığında üretim maliyetleri yksektir (Öksüz, 1996).

2.2.2 Alüminyum döküm alaşımları

Al döküm alaşımları kum kalıba döküm, kokil döküm ve alęak-yksek basınęlı döküm yöntemleri kullanılarak üretilmektedirler. Üstün fiziksel özellik gösteren bu alaşımlar kaynak edilebilmekte ve aynı zamanda işlenmeye de elverişlidirler. Dövmeye alüminyum alaşımlarına çok yaygın olarak uygulanan ısıl işlemler, döküm alaşımlarının bir kısmına da uygulanabilmektedir.

Al döküm alaşımlarının dayanım ve korozyon dirençleri yksektir. Ayrıca döküm alaşımlarının kimyasal bileşimleri dövmeye alaşımlarından oldukça farklı olup Si % 5-12 oranı ile en önemli alaşım elementidir. Silisyum alüminyum ile birlikte ötektik mikroyapı oluşturmaktadır. Ayrıca, alaşımın akışkanlığını, besleme kabiliyetini ve dayanımı arttırmaktadır. Al-Si döküm alaşımlarına % 0,3-1 oranında Mg ilavesi sonucu ısıl işlem uygulanabilmektedir. Uygulanan ısıl işlem neticesinde çökelen (Mg_2Si) alaşımın mukavemetini arttırmaktadır. Cu, döküm alaşımların yksek sıcaklık direncini arttırmak maksadıyla % 1-4 arasında ilave edilebilmekte ve $CuAl_2$ metallerarası bileşiği çökelmektedir. Çinko da benzer şekilde yaşlandırma ısıl işlemi amacıyla alaşıma ilave edilmekte ve $MgZn_2$ çökeltisi oluşturmaktadır.

B ve Ti Al döküm alaşımlarına tane inceltici olarak, Na ve Sr ise ötektik mikroyapıyı modifiye edici olarak ilave edilmektedir. Sn ve Cr gibi alaşım elementleri de alaşımın diğer özelliklerini kontrol etmek için kullanılmaktadır.

Al döküm alaşımları hafif olmalarından dolayı, özellikle otomotiv sanayisinde çok geniş bir şekilde kullanılmaktadırlar. Al döküm alaşımları genellikle iki fazlıdır: Al ve Si fazları. Süneklik YMK Al fazından, sertlik ve dayanım ise Si fazından kaynaklanmaktadır. Bu alaşımların yapısal, fiziksel ve mekanik özellikleri uygulanan

ıslıl işleme veya dökümden önce ergimiş alaşıma yapılan ön işlemler vasıtasıyla iyileştirilebilmektedir (Uludağ, 2011).

2.2.2.1 Alüminyum döküm alaşımları grupları

- 1XX.X: Saf alüminyum. Döküm içerisinde çok düşük miktarlarda element bulunduğundan ötürü saf alüminyum serisi olarak da adlandırılmaktadır. ıslıl işleme uygun değildir.
- 2XX.X: Esas alaşım elementi bakır olup ıslıl işleme uygundur.
- 3XX.X: Bu döküm alaşımlarında Silisyum + Bakır + Magnezyum veya Silisyum + Magnezyum alaşımlarının olduğu döküm alaşım serisidir (Smallman, 1983). Uygulamada kullanılan döküm alaşımlarının % 90'ı bu alaşımdır. Ayrıca 3XX.X serisi ıslıl işleme uygun alüminyum döküm serisi olarak karşımıza çıkmaktadır.
- 4XX.X: Temel alaşım elementi Si.
- 5XX.X: Temel alaşım elementi Mg.
- 6XX.X: Kullanılmayan seri numarası.
- 7XX.X: Temel alaşım elementi Zn.
- 8XX.X: Temel alaşım elementi Sn (Can, 2006).

2.3 Al-Si Döküm Alaşımları

Al-Si bazlı alaşımlar dökümü en fazla yapılan alüminyum alaşımıdır. Sınıflandırmada 4XX.X olarak numaralandırılan bu alaşımların içerisinde magnezyum ve/veya bakır da bulunuyorsa 3XX.X olarak numaralandırılmaktadır.

Silisyum, alüminyum döküm alaşımlarının tartışmasız en önemli alaşım elementidir. Bunun nedeni çok iyi dökülebilirlik sağlayarak kalıbı tam doldurma ve dökümden sonra katılma sırasında sıcak yırtılma veya ıslıl gerilme çatlağı oluşturmamasıdır.

Silisyum aşağıdaki nedenlerden dolayı alüminyum alaşımlarında önemli bir rol oynar:

- Silisyumun yüksek ergime derecesi sayesinde alaşımın akışkanlığına çok yüksek derecede katkı sağlamaktadır.
- Silisyum fazı çok sert bir fazdır. Bu nedenle alaşımın mekanik özelliklerine ve aşınma direncine önemli ölçüde katkı sağlamaktadır.

- Silisyum diğer alaşım elementleriyle birlikte alaşımın dayanımını ve ısıl işlem uygulanabilirliğini arttırmaktadır.
- Ayrıca silisyum alaşımın yoğunluğunu ve ısıl genleşmeyi azaltmaktadır (Apelian, 2009).

2.3.1 Al-Si ikili alaşımı

Al-Si alaşımları mükemmel akışkanlık, dökülebilirlik ve korozyon direncine sahip olup işlenebilirlik kabiliyeti ve mukavemeti nispeten düşüktür. Al-Si ötektik modifikasyonu ile bu alaşımların mukavemet, dökülebilirlik ve sünekliği geliştirilebilmektedir. Özellikle kum kalıba dökümde sodyum, kalsiyum veya stronsiyum ile yapılan modifikasyon etkilidir. Kalsiyum zayıf bir modifikatördür fakat antimon ile etkisi artırılabilir. Stronsiyum ise oldukça güçlü bir modifikatördür (Kaufman ve Rooy, 2004).

Al-Si alaşımlarına yaygın olarak eklenen iki alaşım elementi bakır ve magnezyumdur. Bu iki element uygulanan çökelti sertleştirilmesi sonucunda 190 °C uygulama sıcaklığına kadar alaşımın sertlik ve mukavemetini arttırmaktadır. 200 °C'nin üzerindeki sıcaklıklara çıktığında ise oluşan ve sertliği arttıran $\theta(\text{Al}_2\text{Cu})$, $\beta(\text{Mg}_2\text{Si})$ ve/veya $S(\text{Al}_2\text{CuMg})$ fazları kararsız hale gelerek çözünmekte ve istenmeyen bir mikroyapının oluşmasına neden olmaktadır. Bu durum yüksek sıcaklık uygulamaları için istenmeyen bir durumdur (Zamani, 2017).

2.3.2 Al-Si-Cu alaşımı

Silisyum ve bakır oranlarının varlığı alaşımlarda geniş ölçüde değişmektedir. Bakır dayanım ve işlenebilirlik sağlarken silisyum dökülebilirlik sağlayıp ısıl gerilme çatlama önlemektedir. % 5,6 oranından daha az bakır içeren Al-Si-Cu alaşımları ısıl işlemle sertleştirilebilirken, bu alaşım ailesindeki en önemli alaşımlar magnezyum içerenlerdir, çünkü magnezyum ısıl işlemin etkisini arttırmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

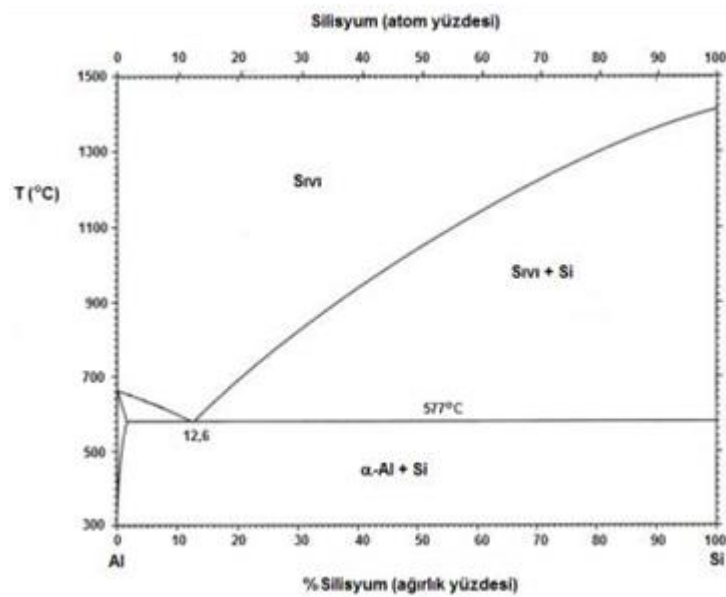
Al-Si alaşımlarındaki bakır, ısıl işlem sonrasında Al_2Cu bileşiği oluşturarak ham döküm ve yüksek sıcaklık dayanımını artırırken sünekliği azaltmaktadır. Alaşıma ana sertleştirici olarak eklenmektedir. Genel olarak Al-Si ikili alaşımına bakır eklenmesi uygulanan ısıl işlem sırasında çökelti sertleşmesi sağlayarak sertlik ve mukavemetin artırılmasına katkı sağlamaktadır (Hernandez ve ark., 2017).

2.3.3 Al-Si-Mg alaşımı

Al-Si ikili alaşımına magnezyum çökelti sertleştiricisi olarak eklenmektedir. Uygulanan çökelti sertleştirmesi ısıl işlemi sonrasında Mg_2Si bileşiği matrise homojen şekilde dağılarak mekanik özellikleri arttırmaktadır. Magnezyumun eklenmesiye ısıl işlemden sonra Al-Si-Mg alaşımları döküm ve diğer özellikleri optimum bir şekilde sağlamaktadır. Mekanik özellikler Al-Cu ve Al-Si-Cu kadar yüksek olmasa da birkaç Al-Si-Mg alaşımı yüksek mukavemet değerlerine sahiptir. Bunun yanında bu alaşım grubu çok iyi korozyon direnci ve düşük bir termal genleşme katsayısına sahiptir (Kaufman ve Rooy, 2004; Hernandez ve ark., 2017).

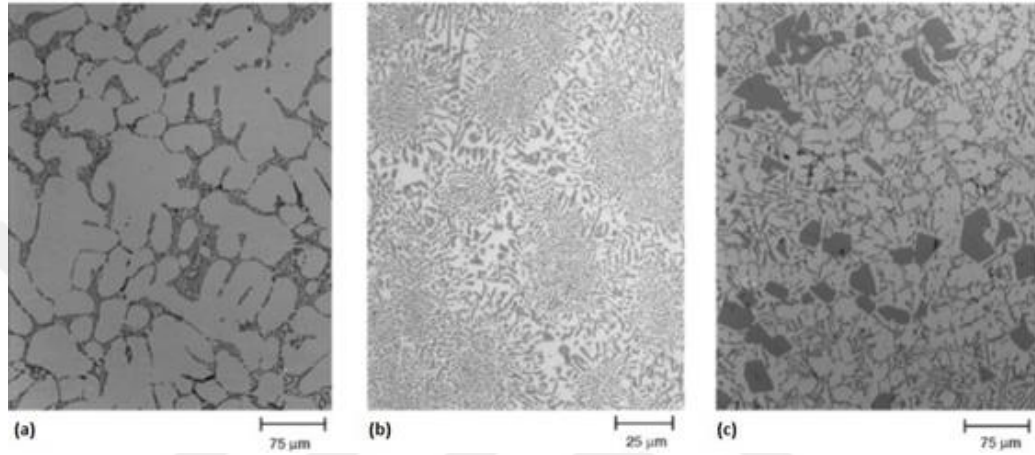
2.4 Al-Si Denge Diyagramı

Al-Si alaşımlarında ağırlıkça % 12,6'dan az silisyum içeren alaşımlar ötektik altı, % 10-13 silisyum içerenler ötektik ve % 12,6'dan fazla silisyum içerenler ötektik üstü alaşım olarak adlandırılmaktadır. şekil 2.1'deki Al-Si faz diyagramında gösterildiği gibi ötektik reaksiyon 577 °C'de gerçekleşmektedir ve silisyumun alüminyum içerisindeki çözünürlüğü maksimum % 1,65'tir. Ticari alüminyum alaşımları genellikle silisyuma ek olarak bakır ve magnezyum gibi diğer alaşım elementlerini de içermektedir. Bakır ve magnezyumun oluşturduğu intermetalik fazlar ötektik reaksiyondan sonra ortaya çıkmaktadır (Zamani, 2017).



şekil 2.1 Al-Si faz diyagramı (Murray ve McAlister 1984).

Şekil 2.2’de ticari bir Al-Si alaşımasının katılaştırılması sonucu oluşan mikroyapı fotoğrafları gösterilmiştir. Ötektik altı alaşımanın mikroyapısı birincil alüminyum dentritleri ve ötektik faz, % 12,6 silisyum içeren alaşımanın mikroyapısı tamamen ötektik faz, ötektik üstü alaşımanın mikroyapısı ise iri silisyum taneleri ve ötektik faz içermektedir. Ötektik üstü alaşımda alüminyum dentritleri bulunmamaktadır (Warmuzek, 2004).



Şekil 2.2 a) Ötektik altı alaşımanın mikroyapısı (<math>< 12,6 \text{ Si}</math>) b) Ötektik alaşımanın mikroyapısı ($12,6 \text{ Si}$) c) Ötektik üstü alaşımanın mikroyapısı ($> 12,6 \text{ Si}$) (Warmuzek, 2004).

2.5 Alüminyum Alaşımlarının Isıl İşlemleri

Isıl işlem metallerin içyapısını, dolayısıyla sertlik, mukavemet gibi mekanik özelliklerini geliştirmek amacıyla uygulanan ısıtma ve soğutma işlemlerinin genel adıdır. Alüminyum alaşımlarında kullanılan ısıl işlemler sırasıyla çözeltili alma, hızlı soğutma (su verme) ve yaşlandırma basamaklarından ibarettir.

Al alaşımlarına uygulanan ısıl işlem ile mekanik özelliklerin geliştirilmesi alaşımı oluşturan bileşenlerin çözünürlüğünün sıcaklık ile değişmesi mekanizmasına dayanmaktadır. Alaşımı sertleştiren Cu ve Mg elementlerinin solidüs sıcaklığındaki katı hal çözünürlüğü yüksektir. Bu çözünürlük sıcaklığın düşmesi ile belirgin ölçüde azalmaktadır. Çözeltili alma işlemi katı çözeltilide çözünen bileşimin miktarını arttırmak amacıyla ötektik sıcaklığın hemen altında bir sıcaklıkta ısıtma yapılarak bu sıcaklıkta çözünme işleminin gerçekleşmesi için bir süre beklenilmesinden ibarettir.

Çözeltili alma işleminden sonra alaşıma su verilerek “hızlı soğuma” sağlanır ve böylece yüksek sıcaklıkta alaşım içerisinde çözülmüş olan elementler ile fazların

çökmesi önlenerek düşük sıcaklıklarda aşırı doymuş bir matris elde edilmektedir. Bu işlemin sağlıklı bir şekilde gerçekleşebilmesi için optimum bir soğuma hızı sağlanmalıdır. Düşük hızda gerçekleşen bir soğuma işlemi kalıntı gerilme ve çarpılma riskini azaltırken, lokal bölgelerde aşırı yaşlanma, tane sınırlarını azaltma, korozyona olan eğilimi artırma ve yaşlandırma işlemine olan eğilimi azaltma gibi istenmeyen sonuçlar doğurabilir. Buna karşın yüksek hızda gerçekleşen soğutma işlemi ise yüksek dayanım ve süneklik özelliklerini beraberinde getirmektedir. Su verme işlemi için soğutma hızı seçimi istenilen mikroyapı ve özellikler gözetilerek gerçekleştirilmelidir.

Çözeltiye alma işleminden sonra uygulanan diğer bir işlem yaşlandırmadır. Yaşlandırma işleminin amacı kararlı çökeltilerin oluşmasını sağlayarak malzemenin sertliğinin artırılmasıdır. Yaşlandırma işlemi oda sıcaklığında yapılırsa “doğal yaşlandırma”, daha yüksek sıcaklıklarda yapılırsa “yapay yaşlandırma” olarak adlandırılır (Mohamed ve Samuel, 2012).

Alüminyum alaşımları için kullanılan temper ve ısıl işlem kısaltmaları Çizelge 2.3’te verilmiştir (Rooy, 1990).

Çizelge 2.3 Alüminyum alaşımlarında ısıl işlem kısaltmaları (Rooy, 1990).

ISIL İŞLEM KODU	AÇIKLAMA
F	Mekanik veya ısıl işlem görmemiş (döküm, dövülmüş vb.) halde
O	Tavlanmış ve yeniden kristalleşmiş
H	Şekil değiştirme sertleşmesi uygulanmış
W	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış
T	Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve yaşlandırılmış

T1: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş ve doğal yaşlandırılmış

T2: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş, soğuk şekil değiştirilmiş ve doğal yaşlandırılmış

T3: Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış, soğuk şekil değiştirilmiş ve doğal yaşlandırılmış

T4: Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve doğal yaşlandırılmış

T5: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş ve yapay yaşlandırılmış

T6: Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve yapay yaşlandırılmış

T7: Çözeltiye alma ısıl işlemi uygulanmış ve aşırı yaşlandırılmış

T8: Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış, soğuk şekil değiştirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

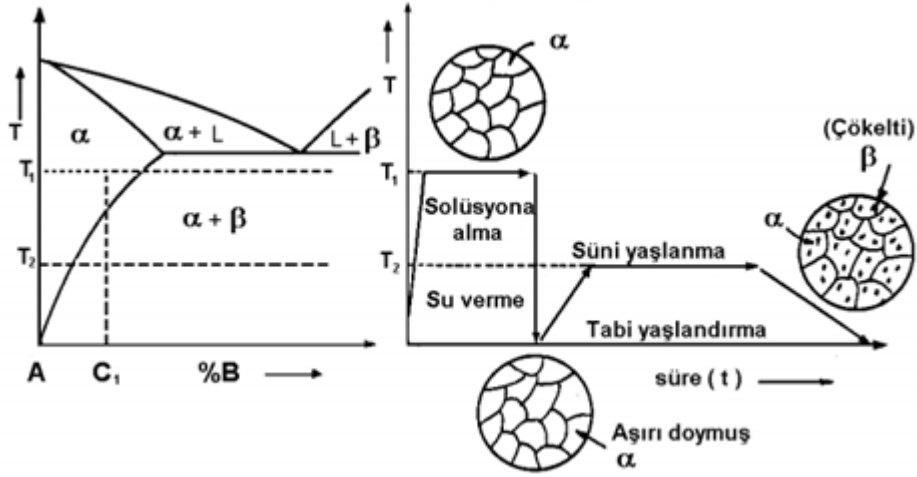
T9: Çözeltiye alma ısıtma işlemi uygulanmış, yapay yaşlandırılmış ve soğuk şekil değiştirilmiş

T10: Yüksek sıcaklıkta şekil değiştirilip soğutulmuş, soğuk şekil değiştirilmiş ve yapay yaşlandırılmış

Alüminyum döküm alaşımlarına uygulanan ısıtma işlemlerde önemli etkiye sahip faktörler; çözeltiye alma sıcaklığı ve süresi, su verme hızı, yaşlandırma sıcaklığı ve süresidir. Şekil 2.3'te ısıtma işlem prosesi gösterilmiştir. Ticari Al-Si-Mg esaslı döküm alaşımlarından üretilen, istenilen dayanım değerlerine sahip olmak için çoğunlukla T6 ısıtma işlemine maruz bırakılmaktadırlar.

T6 olarak isimlendirilen ısıtma işlemde döküm parçalar sırasıyla uygun bir süre ötektik altı sıcaklıkta (465-565 °C arasında) çözeltiye alma, ardından su verme ve sonrasında da 150-200 °C civarlarında yapay yaşlandırmaya tabi tutulmaktadırlar. Çözeltiye alma sırasında, Mg ve bir miktar Si çözünerek homojen bir katı çözelti oluşturmaktadır. Yaşlandırmada ise, Mg ve Si, birincil katılaştıran Al esaslı dendritler arasında Mg₂Si olarak çökmesine sebep olmaktadır.

Ayrıca sıvı metale uygulanan işlemlerin, ısıtma işlem esnasında meydana gelebilecek mikroyapısal değişiklikler üzerinde önemli etkileri vardır. Örneğin; ergimiş alaşımın Na veya Sr modifikasyonu tanelerin küreselleşmesini sağladığı ve aynı zamanda büyüme kinetiklerini değiştirdiği bilinmektedir. Bu şekilde, çözeltiye alma süresinin ciddi bir şekilde kısalması mümkün olabilmektedir. Bununla birlikte, ergimiş metale tane inceltici olarak ilave edilen TiAl₃ partikülleri Mg₂Si çökeltilerinin yaşlandırma esnasında çökme kinetiğini geciktirebilmektedir (Uyaroğlu ve ark., 2010).



Şekil 2.3 Isıl işlem prosesi (Uyaroğlu ve ark., 2010).

2.6 Alüminyum Alaşımlarına Elementlerin Etkisi

Alüminyum alaşımlarına yaygın olarak ilave edilen başlıca alaşım elementleri, bakır, silisyum, magnezyum, demir, çinko, krom, kalay, mangan, nikel, titanyum, zirkonyum, fosfor, sodyum ve lityumdur (Smallman, 1983).

2.6.1 Bakır etkisi

Alüminyum alaşımlarında bakır ilavesi; sertlik, dayanım, yüksek dökülebilirlik ve işlenebilirlik kolaylığı gibi önemli özellikler kazandırmasına rağmen sünekliği ve korozyon direncini düşürmektedir (Töre, 2012). Bakır dövme alaşımlarında, % 3-5 arasında kullanılmakta olup daha yüksek miktarlarda alaşımın işlenebilirlik kabiliyetini, elektrik iletkenliğini ve korozyon direnci de düşürmektedir (Eruslu ve ark., 1990). Dövme alaşımlarında maksimum % 12'ye kadar Cu kullanılabilir. Cu, Al-Si alaşımlarının dayanımını artırırken alaşımın deniz suyuna, zayıf asitlere ve kötü atmosfer şartlarına karşı korozyon direncini azaltmaktadır. Ayrıca Al-Si alaşımlarında Cu ilavesiyle düşük termal genleşme katsayısı gözlemlenmektedir (Turhan, 2002).

2.6.2 Silisyum etkisi

Si ilavesi ile Al alaşımlarının akışkanlık, korozyon direnci, kaynak kabiliyeti, dökülebilirlik özellikleri iyileşmektedir. Ayrıca tane boyutu inceltme ve ötektik modifikasyonu ile de işlenebilirlik kabiliyeti artmaktadır. Silisyum ilavesiyle çok iyi

döküm özellikleri elde edilirken; süneklik ve işlenebilirlik kabiliyeti azalmaktadır. Al-Si esaslı ötektik altı alaşımlarda, silisyum ergime derecesini önemli ölçüde düşürmektedir (Töre, 2012). Bu durumda enerji tasarrufu konusunda önemli bir kazanım ortaya çıkmaktadır. Silisyumun, mekanik özelliklere etkisinde alaşımın kimyasal bileşiminden ziyade, Si fazının morfoloji (şekil) ve dağılımı daha etkilidir. İnce ve yuvarlak birincil faz yüksek mukavemet sağlamakta, iğne şeklindeki faz ise çekme mukavemetini arttırmaktadır (Eruslu ve ark., 1990).

2.6.3 Magnezyum etkisi

Mg, Al alaşımlarına ilave edilen en önemli alaşım elementlerinden birisi olup alaşıma yüksek dayanım ve mükemmel oksidasyon-korozyon direnci kazandırmakta ve kaynak kabiliyetini arttırmaktadır (Eruslu ve ark., 1990). Bununla birlikte, magnezyum alaşımın dökülebilirlik kabiliyetini düşürmektedir (Töre, 2012). Ayrıca Mg ötektik altı Al-Si alaşımlarında demirin mekanik özelliklere yaptığı kötü etkiyi gidermekte ve aynı zamanda dayanım, korozyon-oksidasyon ve aşınma dirençlerini arttırmaktadır. Buna rağmen sünekliği azaltmaktadır. Al-Si alaşımları katı çözümlü bölgesinin dar olması sebebiyle ısı ile sertleştirilemezler. Fakat, az miktarda Mg ilavesiyle birlikte ısı ile sertleşebilme yeteneği kazanmaktadırlar (Eruslu ve ark., 1990).

2.6.4 Mangan etkisi

Mn, Al alaşımlarının çekme dayanımını arttırmaktadır. Bununla birlikte alaşımın yeniden kristalleşme sıcaklığını korozyon direncini olumsuz yönde etkilemeden 50-60°C kadar yükseltmektedir. Mn, Mg gibi Al-Si alaşımlarında demirin mekanik ve fiziksel özelliklere yaptığı olumsuz etkiyi gidermekte, böylece dayanım ve korozyon direnci artmaktadır. Ayrıca kaynaklanabilirlik ve dökülebilirlik kabiliyetini arttırmaktadır. Tane yapısını kontrol ederek tane büyümesine engel olmaktadır (Töre, 2012).

2.6.5 Çinko etkisi

Çinko ilavesi ile tüm Al alaşımlarının çekme mukavemeti, haddelenebilme ve işlenebilme kabiliyeti artmaktadır. Zn, Mg ile birlikte ilave edildiğinde yüksek darbe direnci kazandırmaktadır. Zn, Al-Si alaşımlarında çökelme sertleşmesine sebep olduğu

için aşınma direncini de arttırıcı etki yapmaktadır. Bununla birlikte alaşımın dökülebilirlik özelliğini düşürmektedir (Töre, 2012).

2.6.6 Titanyum etkisi

Ti, Al alaşımlarına tane inceltici etkisi sebebiyle ilave edilmektedir. En iyi etkiyi B ile beraber kullanıldığında göstermektedir. Ti, Al alaşımlarında çekme mukavemeti ve sünekliliği arttırmakta fakat elektrik iletkenliğini azaltmaktadır (Töre, 2012).

2.6.7 Demir etkisi

Alüminyum içinde doğal olarak bulunmaktadır. Demir alüminyum alaşımlarında tane inceltici etki göstermekte ve mukavemeti arttırmaktadır. Fakat genel itibariyle demir Al-Si alaşımlarının mekanik özelliklerini olumsuz etkilemektedir. Yüksek oranda Si içeren alaşımlarda demir kaba ve gevrek bir yapının oluşmasına neden olmaktadır (Töre, 2012).

2.6.8 Nikel etkisi

Ni, Al alaşımlarına yüksek sıcaklık dayanımı ve boyutsal kararlılık sağlamak için ilave edilmektedir. Al-Si alaşımlarına Ni ilave edildiğinde alaşımın aşınma direnci artmakta, genleşme katsayısı ve korozyon direnci azalmaktadır (Töre, 2012; Torabian ve Pathal, 1994).

2.6.9 Sodyum etkisi

Sodyum Al-Si alaşımlarına içyapıyı modifiye etmek amacıyla katılmaktadır. Al-Si alaşımlarına % 0,001-% 0,003 oranlarında ilave edilen Na modifiye edilmiş ve ince ötektik mikroyapının ortaya çıkmasını sağlamaktadır. Na, yüksek sıcaklıkta işlenen Al-Mg alaşımlarında çatlak hatalarının ortaya çıkmasına neden olmakta, Mg miktarı % 2'den fazla ise gevreklik sorunu ortaya çıkarmaktadır (Eruslu ve ark., 1990).

2.6.10 Fosfor etkisi

Alaşımın ötektik üstü fazında iyileştirme elementi olarak kullanılmaktadır. Silisyum elementini tane incilmesi sağlayarak talaş kaldırma özelliklerini arttırmaktadır (Töre, 2012).

2.6.11 Hidrojen etkisi

Alüminyum alaşımlarında istenmeyen elementtir. Sıvı haldeki alaşım içerisinde havadaki rutubetten dolayı çözünmekte ve katılaşma esnasında gaz boşlukları oluşturmaktadır. Ayrıca, tane sınırlarında gerilmeli korozyona sebep olmaktadır. Alüminyum alaşımlarında hidrojeni engellemek amacıyla kalsiyum, berilyum, bakır, kalay ve silisyum elementleri kullanılmaktadır (Töre, 2012).

2.6.12 Kalsiyum etkisi

Alüminyum alaşımlarına az miktarda eklendiği zaman yapı içindeki hidrojeni ayırmaktadır. İletkenliği arttırmakta, sıcak kırılgenliğine ve alüminyumun tekrar kristalleşme özelliğine etkisi vardır (Töre, 2012).

2.6.13 Kurşun etkisi

Talaşlı imalat kabiliyetini geliştirmekte ve korozyon direncine olumsuz katkı sağlamaktadır (Töre, 2012).

2.6.14 Lityum etkisi

Mukavemeti arttırmakta olup alüminyumun yoğunluğu azaltarak ağırlık kazancı sağlar. Soğutma uygulamalarında tokluk özelliklerini geliştirme özelliği gösterir (Töre, 2012).

2.6.15 Stronsiyum etkisi

Silisyumun alüminyum içindeki çökelme şeklini düzenlemektedir. % 0,008-0,04 oranlarında eklendiğinde Al-Si ötektik fazını modifiye etmektedir. Daha yüksek seviyelerde eklendiğinde poroziteye neden olmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004; Brown, 1999).

2.6.16 Zirkonyum etkisi

Alüminyumun tane yapısını kontrol etmek için kullanılmaktadır. Tekrar kristalleşmesini engelleyici özelliğindedir. Yüksek kalınlıktaki plakalarda yüksek mukavemet oluşmasını sağlamaktadır (Töre, 2012).

2.6.17 Bor etkisi

Genellikle % 0,01 oranında kullanılmakta olup Ti ile beraber iyi bir tane incelticidir. B kullanılmadığı zaman titanyumun tane inceltme etkisi, tekrar ergitme esnasında azaltılmaktadır. Ti gibi B da çekme mukavemetini ve sünekliği artırmaktadır (Töre, 2012).

2.6.18 Vanadyum etkisi

Isıl işlem esnasında tane büyümesini önlemesi ve tanelerin ince kalmasını sağlamanın yanı sıra yüksek sıcaklık dayanımını da arttırmaktadır (Töre, 2012).

2.6.19 Krom etkisi

Genellikle % 0,1-0,6 oranlarında ilave edilmektedir. Tane küçültücü rol oynamaktadır. Titanyumla beraber kullanılmaktadır. Al-Zn-Mg alaşımlarına, korozyon direncini artırmak ve gerilim çatlaklarını azaltmak için ilave edilmektedir. Kromun alüminyum içindeki çözünürlüğü çok düşük olup ikinci faz parçacıkları oluşmamaktadır. Bu nedenle Al-Cr alaşımlarına ısıl işlem uygulanamaz. Oluşan Cr-Al bileşikleri yüksek sıcaklıklarda mukavemeti artırıp, malzemeyi korozyona dayanıklı hale getirmektedir. Krom da mangan gibi alaşımın ergime sıcaklığını yükseltici etkiye sahiptir (Töre, 2012).

2.7 Alüminyum Alaşımlarında Mikroyapının Mekanik Özelliklere Etkisi

Mikroyapısal özellikler metal kimyası ve katılma koşullarının ürünleridir. Mekanik özellikleri yapıdaki hatalar hariç en fazla etkileyen unsurlar aşağıdaki gibidir:

- İntermetalik fazların boyut, şekil ve dağılımı
- Dentrit kol aralığı
- Tane boyutu ve şekli
- Ötektik modifikasyon ve tane inceltme (Kaufman ve Rooy, 2004).

2.7.1 İntermetalik fazlar

Katılma sırasında ortaya çıkan intermetalik fazlar mikroyapı ve mekanik özellikleri olumsuz etkilediğinden dolayı element miktar ve oranlarının kontrol altında

tutulması gerekmektedir. Katılma hızı ve katılma sonrasındaki soğuma hızı intermetaliklerin morfolojisini etkileyerek yapıda homojen bir boyutta ve dağılımda olmasını teşvik etmektedir. Daha düşük soğuma hızları kaba intermetaliklerin oluşmasına ve tane sınırlarında ikincil faz miktarının artmasına yol açmaktadır. Faz dönüşümünün difüzyon kontrollü olması daha hızlı katılma, katılmadan sonra oda sıcaklığına daha hızlı bir soğuma, daha fazla oranda katı çözelti ve daha ince parçacıkların yapıda homojen dağılımını sağlamaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

2.7.2 Dendrit kol aralığı

Yarı-katı (semi-solid) döküm haricindeki tüm ticari proseslerde ilk katılma sıvı çözültiden dendritlerin oluşumuyla meydana gelmektedir. Dendrit kol aralığı ne kadar fazla ise mikroyapı o kadar kaba olmaktadır ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi daha da belirginleşmektedir. Çekme mukavemeti ve uzama değerlerinin dendrit hücre boyutuna bağlı değişmektedir. Yüksek mekanik değerler elde etmek için daha ince dendrit kol aralığı gerekmektedir. Soğuma hızı mekanik özellikleri ve sünekliği etkileyen dendrit kol aralıklarını kontrol etmede doğrudan etkilidir (Kaufman ve Rooy, 2004).

2.7.3 Tane inceltme

Mekanik özellikler tanelerin boyutundan direkt olarak etkilenmektedir. İnce taneli yapıların mekanik özellikleri daha yüksek olurken kaba taneli yapıların mekanik özellikleri azalmaktadır. Tane inceltme işlemi hızlı soğuma ile sağlanabilmektedir fakat sadece hızlı soğuma yapmak mekanik özellikleri maksimum derecede arttırmamaktadır. Etkili bir tane inceltme işlemi Al-Si alaşımlarında çeşitli master alaşımlar kullanılarak yapılabilmektedir. Bu master alaşımların her birinin bir takım avantaj ve dezavantajı bulunmaktadır (Kaufman ve Rooy, 2004).

Döküm alaşımlarındaki tane inceltme işlemi porozite miktarını ve porların boyutunu azaltmaktadır. Böylece tane inceltme işlemi özellikle yorulma dayanımı başta olmak üzere mekanik özellik değerlerini yükseltmektedir. Ayrıca beslenebilirliği de arttırmaktadır. Bu nedenle çoğu alüminyum alaşımı dökümünde tane inceltme işlemi uygulanmaktadır (Sigworth ve Kuhn, 2007).

Alüminyumda tane inceltme işlemi ilk olarak 1930'ların başında eriyiğe titanyum ilaveleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Malzemenin dökülebilirliği yani

akışkanlığı önemli olduğundan ve döküm parçanın içyapısında meydana gelen değişiklik dikkat çekici olduğundan titanyum ile tane inceltme hemen yaygınlaşmıştır. Ardından yapılan çalışmalarla alüminyum alaşımlarında Al-Ti master alaşımına bor ilavesinin tane inceltme işlemini geliştirdiği bilinmektedir. Borun rolü 1950'lerin başlarında laboratuvarlarda incelenmiştir. Bu çalışma, bor ile titanyumun çok daha iyi tane inceltme sağladığını göstermiştir. Bu keşfin ilk ürünü olarak Al-Ti-B çubukları üretilmiştir. Bor içeren yeni tane incelticiler çok daha güçlü ve ekonomik olduğundan daha önce alüminyum alaşımlarında kullanılan Al-Ti ürünlerinin çoğu Al-Ti-B master alaşımları ile değiştirilmiş ve hala günümüzde kullanılan ticari uygulamaların temelini oluşturmuştur (Sigworth ve Kuhn, 2007; Ibarra, 1999).

2.7.4 Ötektik modifikasyon

Ötektik altı Al-Si alaşımlarının özellikleri ötektik fazın morfolojisinin modifiye edilmesiyle geliştirilebilmektedir. Daha ince ve lifli ötektik yapı katılma hızının artırılması ve çeşitli kimyasal modifikatörler ile elde edilmektedir. Ötektik yapının modifiye edilmesi mekanik özellikleri güçlendirmekte aynı zamanda sünekliği de arttırmaktadır. Kalsiyum, sodyum, stronsiyum ve antimon elementlerinin katılma sırasında ötektik modifikasyon derecesini etkilediği bilinmektedir.

Sodyum tartışmasız en güçlü modifikatördür ancak oksidasyon ve buhar basıncı kayıpları nedeniyle etkisi geçicidir. Stronsiyumun etki süresi daha uzundur fakat yavaş katılma koşullarında modifikasyon için daha az etkilidir. Kalsiyum ticari değeri düşük olan zayıf bir modifikatördür. Antimonun etki süresi kısıtlı değildir fakat lifli bir ötektik yapı yerine ince lameller ortaya çıkarmaktadır.

Stronsiyum ötektik modifikasyonu için bilinen en yaygın elementtir ve ilavesi genellikle % 10'dan fazla Sr içeren master alaşımlar ile yapılmaktadır. Stronsiyum yapıdaki demir intermetaliklerinin zararlı etkilerini azaltmaktadır fakat hidrojen çözünürlüğünü arttırıp veya yüzey gerilimini azaltarak hidrojen porozitesi oluşturma eğilimindedir. En önemli avantajı, etki süresinin diğer modifikatörlere göre uzun olmasıdır. Bu yüzden bu işlem için en çok tercih edilen element stronsiyumdur (Kaufman ve Rooy, 2004).

2.8 Al-Si Döküm Alaşımlarının Yüksek Sıcaklık Performansı

Günümüzde Al-Si alaşımı ailesinden olan Al-Si-Mg ve Al-Si-Cu-Mg alaşımları yüksek mukavemet, üstün dökülebilirlik özellikleri ve yaşlandırma ile mekanik özellikleri iyileştirilebildiğinden dolayı, otomotiv, uçak vb. sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bu sektörlerde kullanılan alaşımlara farklı elementler ilave edilerek veya uygun ısıl işlemler uygulanarak mekanik özellikleri veya diğer özellikleri iyileştirilebilmektedir. Bu doğrultuda geçmişte yapılan çalışmalar ile mekanik özelliklerin iyileştirilmesi için alaşımlamalar yapılmış böylece yapıda intermetalik fazlar oluşturulmuş, yapılan ısıl işlemler ile de mikroyapıdaki ve mekanik özelliklerdeki değişimler incelenmiştir.

Shaha ve ark. (2014), yılında yaptıkları çalışmada Al-Si-Cu-Mg döküm alaşımının, yüksek sıcaklıklarda çalışabilme performansını iyileştirmek için, alaşıma Ti-V-Zr ilave etmişlerdir. Hâli hazırda kullanılan Al-Si-Cu-Mg alaşımı içindeki Al_2Cu , Mg_2Si veya Al_2CuMg gibi güçlendirme fazları genellikle $170\text{ }^{\circ}C - 300\text{ }^{\circ}C$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda sertleşmekte veya çözünmektedir. Bu da motor blokları ve silindir başlıkları gibi parçaların pratik uygulamalarını sınırlandırmaktadır. Bu doğrultuda bu alaşımların yüksek sıcaklıkta çalışma özelliklerini ve mekanik özelliklerini iyileştirmek için geçiş metallere olan Zr, Ti ve V ilave edilmiş, $(AlSi)_x (TiVZr)$ fazları oluşturulmuştur. Cu ve Mg bakımından zengin fazlar $300-500\text{ }^{\circ}C$ arasındaki sıcaklıklarda çözünürken, $(AlSi)_x (TiVZr)$ fazlarının $696-705\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar dayandığı ispatlanmıştır. Böylece bu çalışma geçiş metalleri ilaveleri ile Al-Si alaşımlarının yüksek sıcaklıklarda çalışabilme kapasitesini arttırmış ve bu alaşımların ısıl işlem ile ilgili potansiyelini geliştirmiştir.

Shaha ve ark. (2015), yılında yaptıkları diğer bir çalışmada ise ağırlıkça (%) Al-7Si-1Cu-0.5Mg içeren bir alaşıma Ti, V ve Zr ilavesi yapmış, elde edilen alaşımın $300\text{ }^{\circ}C$ 'ye kadar sıcaklıklardaki mikroyapısal ve mekanik özelliklerini incelemiş, A380 alüminyum alaşımı ile karşılaştırmışlardır. Alaşımlamada ve karşılaştırmada kullanılan her iki alaşımın da mikroyapısında üçlü Al- Al_2Cu -Si fazı ve Al-Si ötektik fazı ile çevrili Al dendritleri bulunduğu bilinmektedir. Fakat A380 alaşımında $Al_{15}(FeCrMn)_3Si_2$ fazları bulunurken, yapılan yeni alaşımlama ile Ti / Zr / V fazlarının, Al ve Si fazları ile birlikte nasıl bir yapı oluşturacağı deney sonunda belirlenmiştir. Elde edilen alaşımın

kimyasal modifikasyonun bir sonucu olarak deneyde kullanılan A380 alaşımına göre % 20-40 daha yüksek mukavemet gösterdiği ve 1,5 ila 5 kat daha yüksek süneklığe sahip olduğu tespit edilmiştir.

Zhang ve ark. (2021), yılında yaptıkları çalışmada ise, geçiş metallereinden olan Cu, Zr ve V'un Al-Si-Mg döküm alaşımlarının mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. İlk olarak Al-Si-Mg alaşımlarının döküm mikroyapısının (özellikle ötektik Si ve intermetaliklerin) dönüşümü incelemiş ve bu alaşımların mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için yol gösterici olduğu ifade edilmiştir. Bu tanelerin boyutlarına, morfolojilerine ve dağılımlarına bağlı olarak mekanik özellikler olumlu veya olumsuz yönde etkilenebilmektedir. Yapılan çalışmalar doğrultusunda Cu ilavesinin ikincil dendrit kol aralığını azalttığı ve kaba Si parçacıklarının oluşumuna yol açtığı bulunmuştur. Ayrıca Al-Si-Mg döküm alaşımlarına, Cu eklendiğinde ikincil dendrit kol aralığının azalması nedeniyle akma ve çekme mukavemeti artarken, Zr ve V ilave edildiğinde süneklkte ve çekme mukavemetinde önemli bir azalmanın meydana geldiği görülmüştür. Al-Si-Cu-Mg alaşımının içindeki Zr-Ti-V içeren iğne şeklindeki fazlardan dolayı erken kırılma ve süneklkte azalma gözlemlenmiştir.

Daha önce yapılan çalışmalarda görüldüğü üzere Al-Si alaşımlarının yüksek sıcaklıktaki çalışma performansı ve diğer geçiş elementleri ile yapılan alaşımlamaları araştırma konusu olarak incelenmiştir. Yaptığımız çalışmada ise Al-Si-Mg alaşımlarından olan ticari AlSi10Mg (ETİAL 171) alaşımına Al-5Ti-1B ilavesi ile tane yapısı küçültülecek, geçiş metallere arasında gösterilen Zr/V elementleri ilave edilerek mikroyapıda ve mekanik özelliklerde meydana gelecek değişimler detaylı bir şekilde incelenecektir.

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Üretim

3.1.1 Hammaddeler

Tez çalışması kapsamında AlSi10Mg, % 0,2 Zr alaşımlı AlSi10Mg ve % 0,2 Zr + % 0,5 V alaşımlı AlSi10Mg olmak üzere üç farklı bileşimde alaşım üretilmiştir. Alaşımlar üretiminde Konya Konsan Sanayi Sitesi'nde faaliyet gösteren RMT Metalurji isimli firmadan temin edilen ticari saflıkta (Çizelge 3.1) ve 6 kg ağırlığındaki AlSi10Mg (ETİAL 171) külçeleri kullanılmıştır. Zr ve/veya V alaşımlama için Marmara Metal isimli firmadan satın alınan Al-10Zr ve Al-5V master alaşımları kullanılmıştır. Tane inceltici ve modifikatör olarak ise sırasıyla kimyasal bileşimleri Çizelge 3.2'de verilen ticari Al-5Ti-1B ve Al-10Sr kullanılmıştır. Kullanılan külçe, master alaşımları ve tane incelticilere ait fotoğraflar Şekil 3.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 3.1 ETİAL 171 alüminyum alaşımının % kimyasal bileşimi.

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti	Pb
89,0	9,36	0,274	0,056	0,533	0,473	0,062	0,078	0,012	0,047	0,007
Sn	Sr	V	Zr	B	Ga					
< 0,01	0,02	0,009	0,006	0,001	0,007					

Çizelge 3.2 Al-5Ti-1B ve Al-10Sr master alaşımlarının % kimyasal bileşimi.

% Master Alaşımı	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	B	Ti	Sr	Al
Al-5Ti-1B	0,10	0,30	0,02	0,02	0,02	0,10	0,9 1,1	4,5 5,5	-	Kalan
Al-10Sr	0,20	0,30	-	-	-	-	-	9-11	0,03	Kalan



Şekil 3.1 Alaşımlama için kullanılan Al-5V, Al-10Zr külçeleri ve Al-5Ti-1B çubuğu.

3.1.2 Ergitme ocağı

Alaşımların üretiminde Şekil 3.2’de gösterilen, Konya Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesinde bulunan 15 kg kapasiteli elektrik rezistanslı döküm ocağı kullanılmıştır. Rezistans ocağı 2 kW gücünde, 1000 °C maksimum çalışma sıcaklığına sahiptir. Direnç teli olarak 1,5 mm çapında Cr-Ni alaşımlı kanthal tel kullanılmıştır. Ocağın sıcaklık kontrolü K tipi termokupl (1,5 mm çapında NiCr-Ni) ve elektronik termostat ile sağlanmaktadır. Ocak içerisinde yalıtım sağlamak amacıyla CaO esaslı refrakter tuğlalar kullanılmıştır. Alaşımların ergitilmesi SiC esaslı potalarda gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.2 Çalışma kapsamında kullanılan rezistanslı döküm ocağı.

3.1.3 Döküm kalıbı

Alaşımların dökümünde GGG50 (EN-GJS-500-7) küresel grafitli dökme demirden imal edilmiş kokil kalıp (Şekil 3.4) kullanılmıştır. Kalıp içerisinde 6 adet 15x200 mm boyutlarında boşluklar bulunmaktadır. Döküm öncesinde kalıplar numunelerin kalıptan kolayca ayrılması için kokil kalıp boyası ile boyanmıştır.

3.1.4 Döküm işlemi

Döküm aşamasında şarjda kullanılacak malzemelerin ağırlıkları Çizelge 3.3’te verilmiştir. Bu şarj hesabına göre 3 aşamalı bir döküm işlemi uygulanmıştır. İlk olarak Zr ve/veya V içermeyen AlSi10Mg alaşımının dökümü gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi 750 °C sıcaklıkta yapılmış olup bu sıcaklığa yaklaşık 1,5 saatte ulaşılmıştır. Bu sıcaklıkta sıvı metale tane inceltici olarak Al-5Ti-1B ilavesi yapılmış, Şekil 3.3’te

gösterilmiştir. Döküm işlemi Şekil 3.4'te gösterilmiştir. Ardından sırasıyla % 0,2 Zr ve % 0,2 Zr + % 0,5 V içeren alaşımların dökümü benzer bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 3.3 Çalışmada yapılan döküm şarjları.

DÖKÜM	RMT Külçeleri (g)	Al-5Ti-1B (g)	Al-10Zr (g)	Al-5V (g)	Toplam (g)
1	9250	750	---	---	10.000
2	8970	750	280	---	10.000
3	8150			450	8600



Şekil 3.3 Ocağa Al-5Ti-1B ilavesi.



Şekil 3.4 Isıtılmış kalıba döküm işlemi.

Döküm işleminden hemen önce çatlama riskini önlemek için kokil kalıba yaklaşık 200 °C'de ön ısıtma işlemi uygulanmıştır. Şekil 3.5'te dökülen numuneler ve yolluk kısmı gösterilmiştir. Döküm işleminden sonra yolluk ve çubuk şeklinde numuneler kesilerek çıkartılmıştır.



Şekil 3.5 Dökülen numuneler.

3.2 Isıl İşlem

Çökelme sertleştirilmesi olarak bilinen ısıl işlem alaşımın mikroyapısında nispeten daha az miktarda bulunan ikinci fazın parçacıklar halinde matris fazı içerisinde çökmesinin sağlanması ve böylelikle alaşımın dayanımının artmasını sağlamaktadır. Bu yöntem alaşımların dayanımlarını arttırmada kullanılan en etkili yöntemlerden biri olup çoğunlukla demir dışı metal alaşımlarında (Al, Ti, Mg) kullanılmaktadır (Kayalı, 1991).

Çökelme sertleştirilmesi ile dayanım artışındaki temel mekanizma aşırı doymuş Al matris fazı içerisinde yaşlandırma ısıl işlemi ile birlikte oluşacak çökeltilerin diskolasyon hareketlerini engellemesi ile açıklanmaktadır (Novikov, 2012). Al-Cu-Mg, Al-Si-Mg veya Al-Zn-Mg esaslı Al alaşımları çökelme sertleşmesi uygulanabilir alaşımlar olarak bilinmektedirler. Çökelme sertleştirilmesi ısıl işlemi temelde üç ana basamakta gerçekleştirilmektedir. Bu basamaklar sırasıyla; çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma ısıl işlemidir (Kayalı, 1991).

Bu çalışmada üretilen numunelere 3 aşamalı T6 ısıl işlemi uygulanmıştır. Isıl işlemlerde Konya Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü bünyesindeki Protherm marka PLF 130/19 serisi kamara fırını (Şekil 3.6) kullanılmıştır. Numuneler ilk olarak 1 °C/dakika ısıtma hızıyla 500 °C sıcaklığa ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 1 saat boyunca bekletilmek üzere çözeltiye alma işlemi uygulanmıştır. Daha sonra numunelere oda sıcaklığında su verilmiştir. Son olarak numunelere 190 °C'de 1, 4, 16 ve 64 saat süresince yaşlandırma işlemi uygulanmıştır.



Şekil 3.6 Protherm PLF 130/19 serisi kamara fırını.

3.3 Karakterizasyon

3.3.1 Kimyasal analiz

Dökümü yapılan numunelerin kimyasal bileşimi RMT Metalurji firmasında bulunan Oxford Instruments Foundry Master model optik emisyon spektrometresi (Şekil 3.7) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir numuneden iki farklı ölçüm alınmış ve ortalamaları hesap edilmiştir.



Şekil 3.7 Oxford Instruments Foundry Master model optik emisyon spektrometresi.

3.3.2 Mikroyapı analizi

İlk olarak çubuk şeklindeki dökülmüş haldeki ve ısıl işlem görmüş numunelerden mikroyapı incelemesi için 15 mm çapında ve 10 mm yüksekliğindeki numuneler abrasif kesici ile kesilerek elde edilmiştir.

Sonrasında, sırasıyla 180, 320, 400, 600, 800 ve 1000'lik SiC zımparalar ile Şekil 3.8'de gösterilen Metkon marka Forcipol 2V model zımpara cihazında zımparalanmış ardından 1 µm alümina çözeltisi kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numuneler keller dağlayıcısı ile dağlanmış ve Şekil 3.9'da gösterilen Nikon Eclipse marka MA100 model optik mikroskop ile 100, 200, 500X büyütme yapılarak mikroyapıları incelenmiştir.



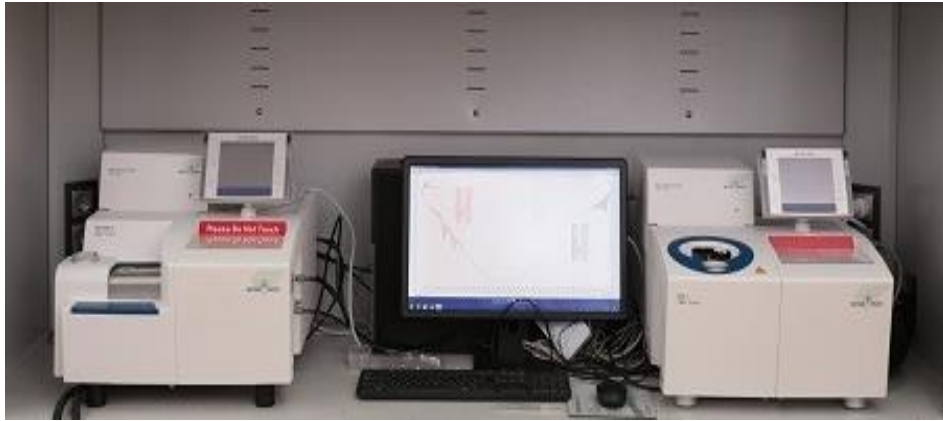
Şekil 3.8 Metkon Forcipol 2V zımpara cihazı.



Şekil 3.9 Nikon Eclipse MA100 model optik mikroskop.

3.3.3 Termal analiz

Çalışma kapsamında araştırılan numunelerin ötektik reaksiyon sıcaklığı ve likidüs sıcaklığı gibi dönüşüm sıcaklıklarını belirlemek amacıyla termal analiz ölçümleri yapılmıştır. Termal analiz ölçümleri Şekil 3.10’da görülen Mettler Toledo marka diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) ile 25-1000 °C aralığında, azot gazı atmosferinde 10 °C/dakika ısıtma/soğutma hızında yapılmıştır.



Şekil 3.10 Mettler Toledo marka DSC analiz cihazı.

3.3.4 Faz analizi

Çalışma kapsamında numunelerin faz analizleri oda sıcaklığında X-ışınları kırınım (XRD) analizleri kullanılarak yapılmıştır. XRD analizleri Şekil 3.11’de görülen BRUKER marka D8 ADVANCE model Difraktometre ile yapılmıştır. XRD ölçümleri 2°/dakika tarama hızı ile $2\theta=10-90^\circ$ aralığında ve dalga boyu 1.5406 Å olan Cu-K α

işıması kullanılarak gerçekleştirilmiştir. X-işınlarını üretmek için tüpe 40 Kv-40 mA büyüklüğünde gerilim ve akım uygulanmıştır.

Elde edilen XRD kırınım desenleri, difraktometreye bağlı Diffrac Eva programına ve ICCD (International Center For Diffraction Data) verilerine göre değerlendirilmiştir.



şekil 3.11 BRUKER D8 ADVANCE X-Işını Difraktometre test cihazı.

3.3.5 Sertlik testi

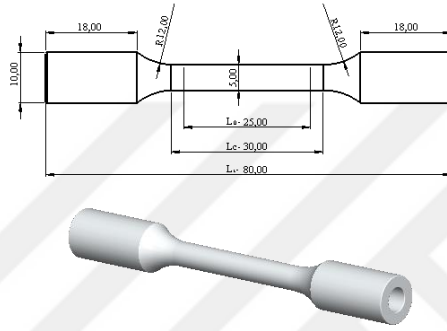
Dökülmüş haldeki ve ısıl işlem görmüş numunelerin sertlik lmleri Digirock RBOV sertlik ölçüm cihazı (şekil 3.12) kullanılarak yapılmıştır. lmler Brinell (HB) yöntemine göre 62,5 kgf yük altında ve 2,5 mm bilya ile yapılmıştır. Numunelerden birbirinden bağımsız en az 5 farklı ölçüm alınarak ortalama sertlik değerleri hesap edilmiştir. Numune üzerinde lmlerin sağlıklı olması açısından üç farklı ve birbirinden bağımsız noktalardan lmler alınarak ortalama sertlik sonucu hesap edilmiştir.



şekil 3.12 Digirock RBOV sertlik ölçüm cihazı.

3.3.6 Çekme testi

Dökülmüş haldeki ve ısıl işlem görmüş numunelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi için oda sıcaklığında çekme testi yapılmıştır. Çekme testleri ASTM E8/E8M-16a (Metalik malzemelerin çekme test standartları) standardın esas alınarak yapılmıştır. Bu doğrultuda her dökülmüş haldeki ve ısıl işlem süresi için ikişer adet numune olacak şekilde 30 adet çekme çubuğu Proton Metal Döküm Talaşlı İmalat San. Tic. Ltd. Şti. firması bünyesindeki cnc torna tezgâhında Şekil 3.13’de ki ölçülere göre işlenmiş ve çekme testi için hazır hale getirilmiştir.



Şekil 3.13 Çekme çubuğu numunesi (verilen değerler mm cinsindedir).

Şekil 3.14’de görülen tüm çekme çubukları Şekil 3.15’de gösterilen KT-AS marka çekme cihazında çekme testi yapılmış ve sonuçlar kısmında değerlendirilmiştir.



Şekil 3.14 İşlenmiş çekme çubukları.



Şekil 3.15 KT-AS marka çekme cihazı.

3.3.7 Aşınma testi

Aşınma testleri Trabzon Teknoloji Bölgesi'nde faaliyet gösteren UTS Mühendislik Ar-Ge firmasında UTS Tribolog model cihazda (Şekil 3.16) Ball on Disk testleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Testlerde 6 mm çapa sahip 100Cr6 çelik bilya aşındırıcı olarak kullanılmıştır. Aşınma testleri ortam havasında kuru koşullarda uygulanmıştır. Test ile ilgili parametreler Çizelge 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.16 Aşınma testlerinde kullanılan UTS Tribolog aşınma test sistemi.

Çizelge 3.4 Aşınma testi parametreleri.

Test Parametresi	Değer
Kuvvet	2 N
Kayma Hızı	78,5 mm/s
Kayma Çapı	10 mm
Toplam Kayma Mesafesi	100 m
Test Süresi	21,4 dakika

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1 Kimyasal Analiz Sonuçları

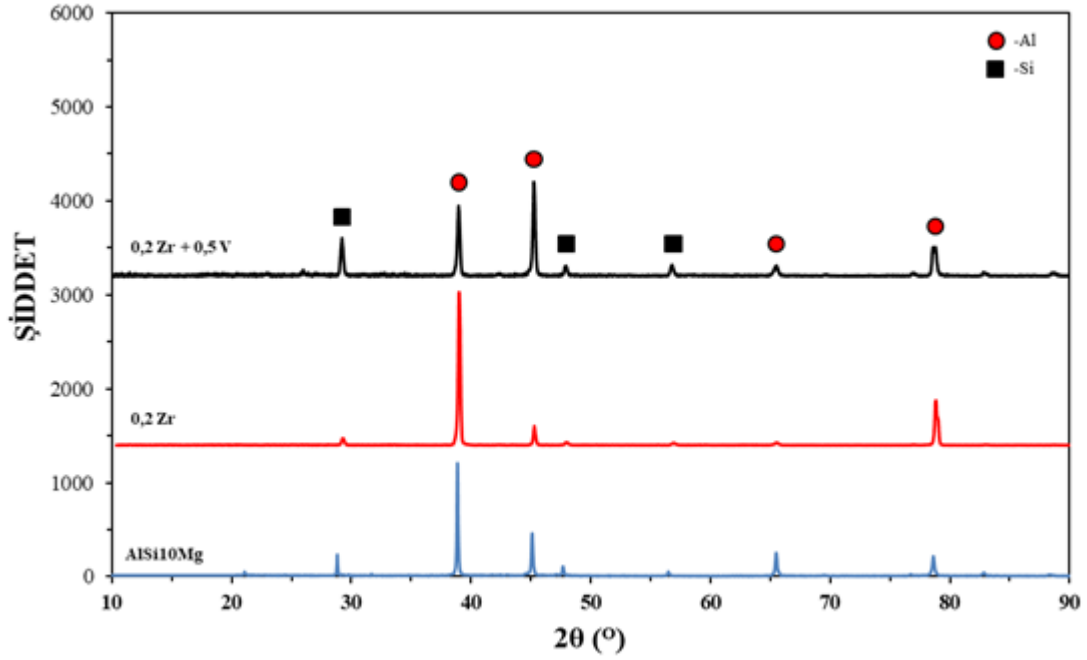
Çalışma kapsamında araştırılan üç alaşıma ait kimyasal analiz sonuçları Çizelge 4.1’ de gösterilmektedir. Bu sonuçlara göre üç alaşımın benzer Al (% 89-90) ve Si (% 8-9) içeriğine sahip olduğu, her üç alaşımın da az miktarda Fe, Cu, Mn, Mg ve Zn içerdiği görülmektedir. Her üç alaşımın bileşiminde bulunan % 0,3 civarı Ti döküm sırasında kullanılan tane inceltici Al-5Ti-1B mastır alaşımından kaynaklanmaktadır. Ayrıca planlanan % 0,2 Zr ve % 0,5 V ilavesinin çok yakın değerlerde gerçekleştiği açıkça görülmektedir.

Çizelge 4.1 Kimyasal analiz sonuçları.

	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
AlSi10Mg	89,9	8,86	0,363	0,133	0,494	0,403	0,083	0,077	0,004	0,28
	Pb	Sn	Sr	V	Zr	B	Ga			
	0,003	< 0,01	0,02	0,008	0,006	0,001	0,021			
0,2 Zr	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
	89,07	8,67	0,365	0,286	0,364	0,367	0,126	0,056	0,072	0,29
	Pb	Sn	Sr	V	Zr	B	Ga			
	0,015	0,01	0,007	0,009	0,24	0,009	0,018			
0,2 Zr + 0,5 V	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Cr	Ni	Ti
	89,04	8,29	0,364	0,272	0,346	0,358	0,121	0,055	0,072	0,30
	Pb	Sn	Sr	V	Zr	B	Ga			
	0,0141	0,02	0,006	0,50	0,24	0,008	0,0019			

4.2 Faz Analiz Sonuçları

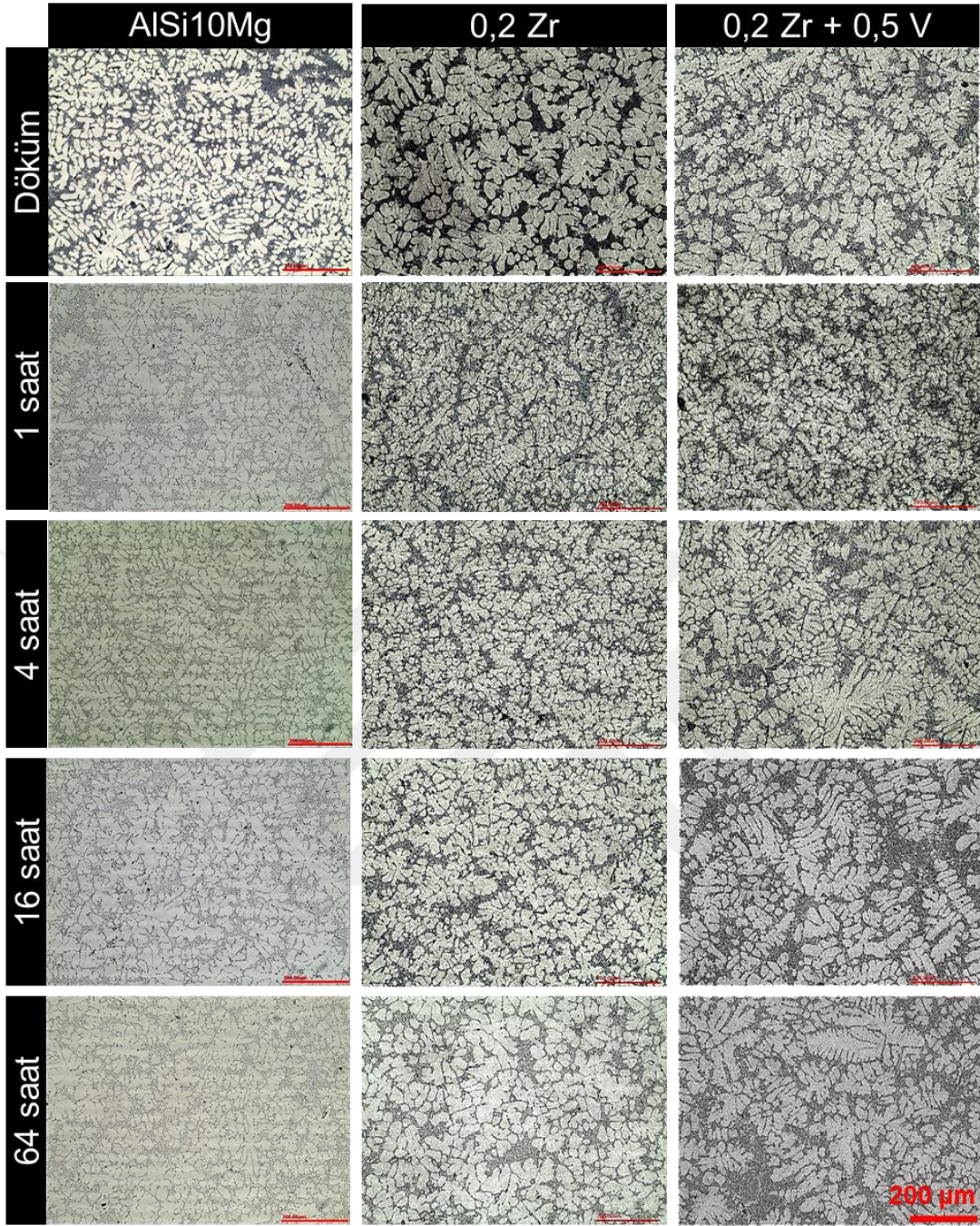
Çalışma kapsamında üretilen alaşımların dökülmüş hallerine ait XRD kırınım desenleri Şekil 4.1’de verilmektedir. Üç alaşımın da kırınım desenlerinde Al (JCPDS Kart No: 04-0787) ve Si (JCPDS Kart No: 27-1402) fazlarına ait pikler gözlemlenmiştir. XRD analizlerinde Al-Zr ve Al-V bileşiklerine veya diğer bileşiklere ait herhangi bir pike rastlanılmamıştır. Ayrıca Zr ve/veya V ilavesi ile birlikte Al ve Si fazlarına ait pik açılarında kaymalar meydana gelmemiştir.



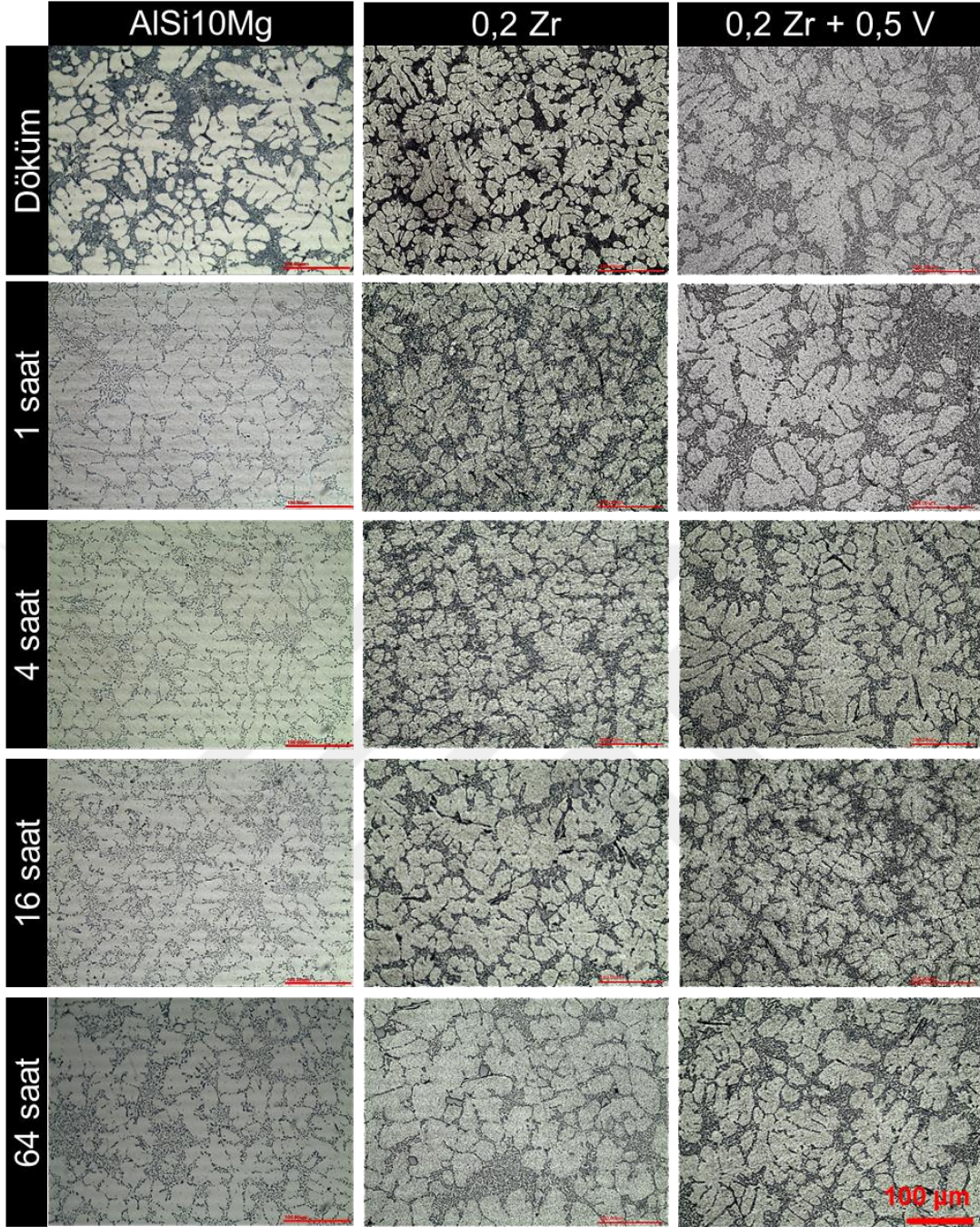
Şekil 4.1 XRD sonuçları.

4.3 Mikroyapı Analizi Sonuçları

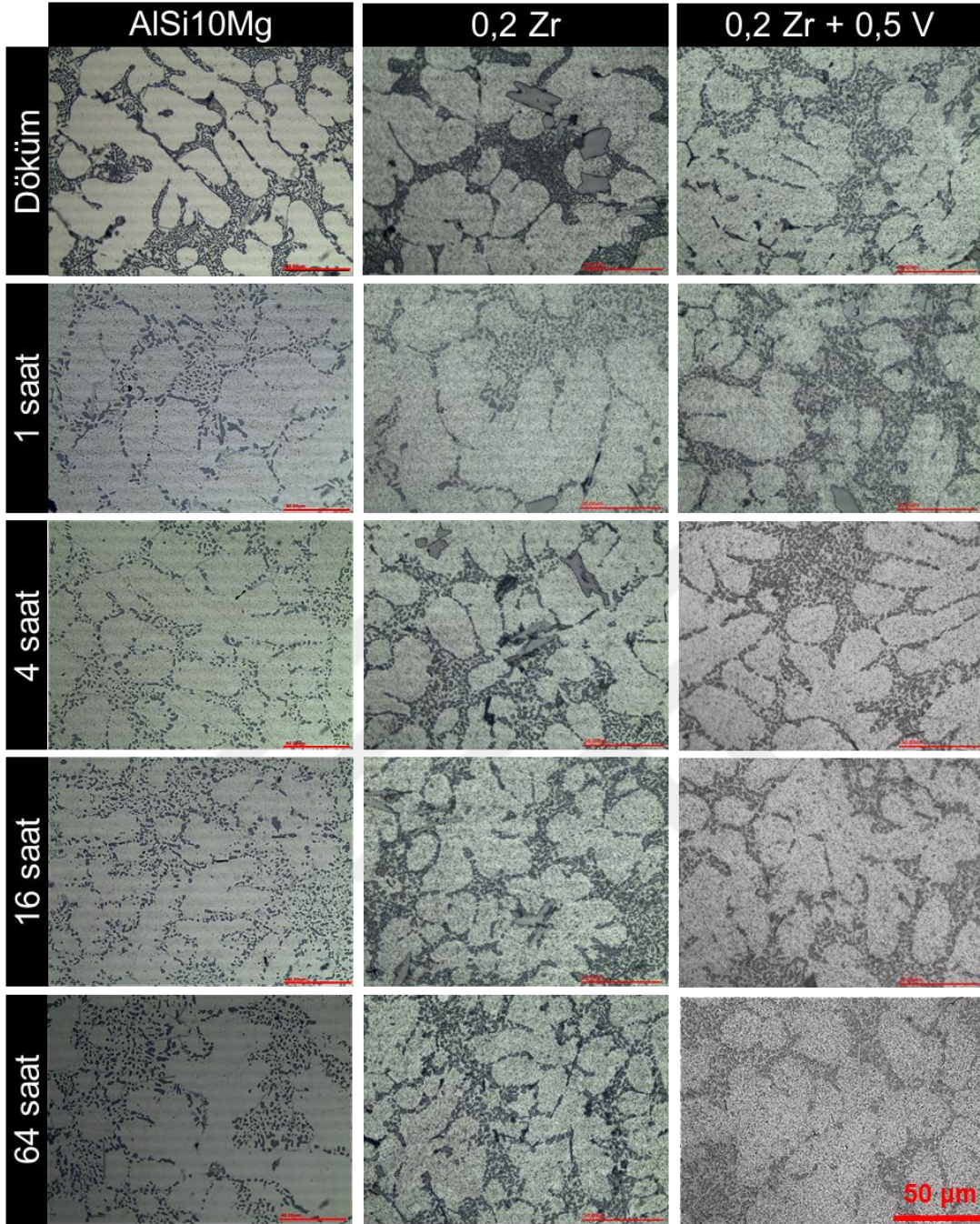
Dökülmüş haldeki ve ısıtılmış numunelere ait 100, 200 ve 500X büyütme optik mikroskop mikroyapı fotoğrafları sırasıyla Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'te verilmektedir. Mikroyapı resimlerindeki açık renkli dendritler Al esaslı birincil kristalleşmiş fazı belirtmektedir. Silisyum ise koyu renkli ötektik faz karışımı içerisinde yer almaktadır. Kokil kalıba döküm sırasında soğumanın homojen olmasından ötürü dendritler eş eksenli olarak gelişmişlerdir. Ayrıca döküm sırasında kullanılan tane inceltici ve silisyum modifikatöründen dolayı mikroyapıda bulunan Si fazı keskin köşeli yerine daha pürüzsüz ve yumuşak hatlı morfolojiye sahiptir.



Şekil 4.2 Dökülmüş ve ısıtılmış numunelere ait mikroyapı görüntüleri 100X.



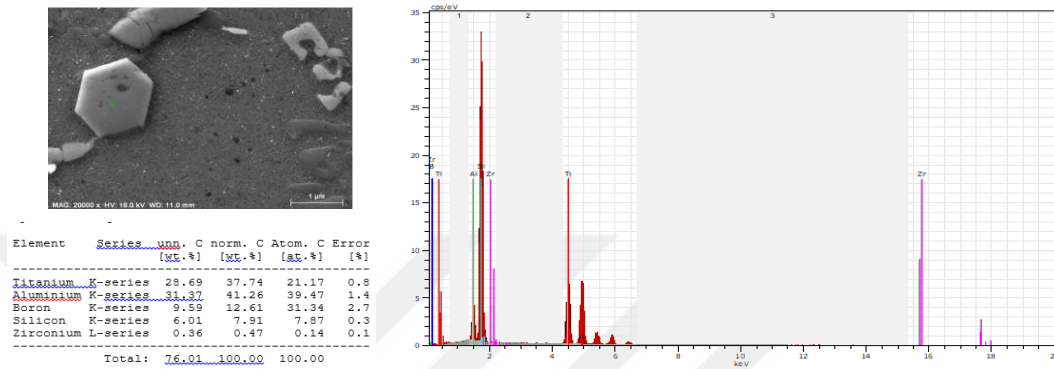
Şekil 4.3 Dökülmüş ve ısıl işlem görmüş numunelere ait mikroyapı görüntüleri 200X.



Şekil 4.4 Dökülmüş ve ısıtılmış numunelere ait mikroyapı görüntüleri 500X.

Elde edilen mikroyapı görüntüleri incelendiğinde Zr ve/veya V ilavesi ile ya da yaşlandırma süresinin değişmesiyle oluşan fazların miktarlarında, büyüklüklerinde, morfolojilerinde ve dağılımlarında önemli değişiklikler gözlemlenmemiştir. Hatta 64 saat gibi uzun yaşlandırma ısıtılması sonucunda mevcut fazların hiçbirinde irileşme veya topaklaşma (aglomerasyon) görülmemiştir. Mikroyapı analizleri XRD faz analizi ile uyumlu olup her iki analizde de sadece Al ve Si fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Herhangi bir Al-Zr, Al-V, Si-Zr, Si-V esaslı veya başka bileşiklerin oluşumuna

rastlanılmamıştır. Sadece % 0,2 Zr ilaveli alaşımın mikroyapısı içerisinde az miktarda gri renkli ve düzgün geometrik şekli olmayan bir faza rastlanmıştır. Bu fazın tane inceltici olarak eklenen Al-5Ti-1B esaslı faz olduğu EDS analizleri (Şekil 4.5) ile doğrulanmıştır. Bu fazın mikroyapıda bulunmasının sebebi ergitme sırasında tam erimemesinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca bazı mikroyapı resimlerinde bulunan düzgün olmayan şekilli siyah bölgeler ise döküm boşluklarıdır.



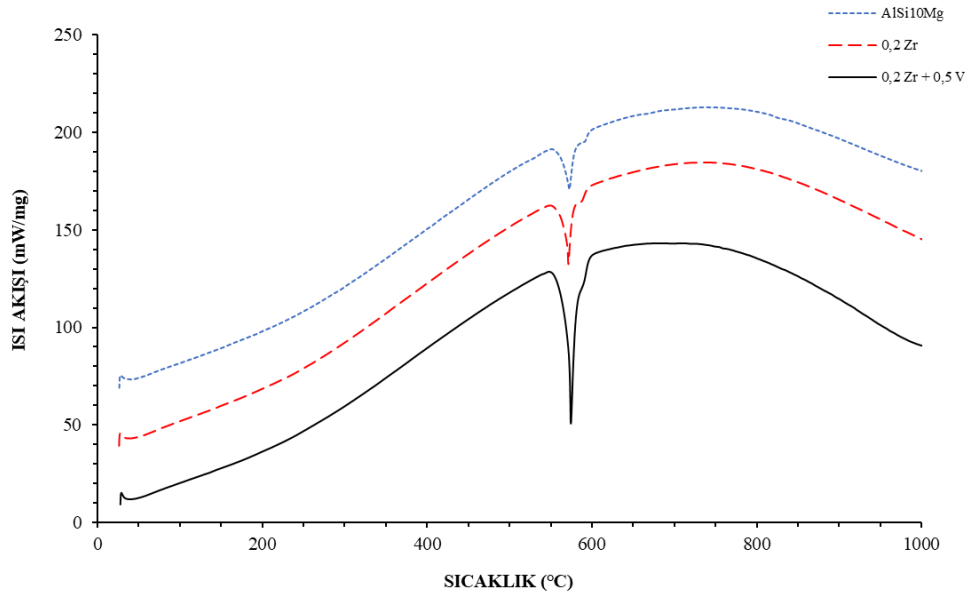
Şekil 4.5 EDS analizi.

4.4 Termal Analiz Sonuçları

Tez çalışması kapsamında araştırılan alaşımlara ait termal analiz sonuçları Şekil 4.6'da verilmiştir. Üç alaşımın da DSC sıcaklık eğrilerinde iki tane endotermik reaksiyon piki bulunmaktadır. Bu piklerden nispeten düşük sıcaklıkta olan derin pik ötektik reaksiyonu, diğeri ise likidüsü nitelendirmektedir. Alaşımlara ait ölçülen ötektik ve likidüs sıcaklıkları Çizelge 4.2'de verilmektedir. Bu sonuçlara göre % 0,2 Zr ilavesinin ötektik sıcaklığı 2 °C azalttığı, % 0,5 V ilavesinin ise ötektik sıcaklığı 3 °C arttırdığı gözlemlenmiştir. Alaşımların likidüs sıcaklığının ise Zr ve/veya V ilavesi ile birlikte bir miktar azaldığı ortaya çıkmıştır.

Çizelge 4.2 Termal analiz eğrilerinden ölçülen dönüşüm sıcaklıkları.

Alaşım	T _{ötektik} (°C)	T _{likuidus} (°C)
AlSi10Mg	573	592
0,2 Zr	571	587
0,2 Zr + 0,5 V	576	589



Şekil 4.6 AlSi10Mg, 0,2 Zr ve 0,2 Zr + 0,5 V termal analiz sonuçları.

4.5 Sertlik Sonuçları

Dökülmüş haldeki ve ısıtılmış görümlü alaşımların ortalama Brinell sertlik değeri Çizelge 4.3'te verilmiştir. Zr ve/veya V içermeyen AlSi10Mg alaşımın ölçülen sertlik değeri bu alaşımın uluslararası standartta (ENAC 43000-AlSi10Mg) bulunan sertlik değeri ile kıyaslanmıştır (Breslavsky, 2021). Standartta AlSi10Mg alaşımının dökülmüş hali ve T6 ısıtılmış görümlü hali için sertlik değeri 50 ve 75 HB olarak verilmiştir. Çalışmada üretilen alaşımın sertlik değeri standartta bulunan değerlerden daha üstündür. Alaşımların sertlik değeri detaylı incelendiğinde yaşlandırma ısıtılmış işleminden sonra tüm alaşımların sertlik değerlerinde ciddi artış olduğu gözlemlenmiştir. Tüm kompozisyonlar 16 saat yaşlandırma süresinde en yüksek (pik) sertlik değerine ulaşmıştır.

Çizelge 4.3 Sertlik testi sonuçları.

Alaşım	Sertlik (HB)				
	Döküm	1 saat	4 saat	16 saat	64 saat
AlSi10Mg	64,8 ± 6,7	70,0 ± 2,8	73,5 ± 1,9	82,1 ± 3,1	70,6 ± 6,6
0,2 Zr	60,5 ± 3,2	66,0 ± 4,8	68,8 ± 3,7	74,8 ± 3,0	70,3 ± 3,2
0,2 Zr + 0,5 V	69,0 ± 2,0	67,6 ± 1,6	82,8 ± 9,6	88,5 ± 10,6	70,0 ± 7,4

Alaşımların sertlik değerleri bileşim esaslı kıyaslandığında % 0,2 Zr + % 0,5 V içeren alaşımın en yüksek sertlik değerine sahip olduğu, % 0,2 Zr içeren alaşımın ise en düşük sertlik değerine sahip olduğu görülmüştür. Zr ilavesinin AlSi10Mg alaşımının sertliğini az miktarda azaltmasının sebebi tam olarak bilinmemektedir. Zr, Al içerisinde çok sınırlı katı hal çözünürlüğüne sahip olup az oranda ilave edildiğinde bile Al₃Zr metaller arası bileşiği oluşturmaktadır. Bu çalışmada ilave edilen Zr miktarı (ağırlıkça % 0,2) olduğu için ikinci bir faz oluşumu beklenmemektedir. Zaten mikroyapı ve faz analizlerinde de ikinci faz gözlemlenmemiştir.

Zr ilavesi ile birlikte yapılan V ilavesi, sertlik değerlerinde önemli artışlar meydana getirmiştir. V da Zr gibi Al içerisinde çok sınırlı katı hal çözünürlüğüne sahiptir. Çalışma kapsamında ilave edilen Zr miktarına kıyasla daha yüksek oranda yapılan V ilavesinin katı çözültü sertleşmesine sebep olduğu düşünülmektedir. Sertlik testi ile elde edilen sonuçların doğruluğunu teyit etmek için ise diğer bir önemli mekanik test olan çekme testi uygulanmış ve sonuçları bir sonraki alt başlıkta verilmiştir.

4.6 Çekme Sonuçları

Dökülmüş haldeki ve ısıtıl işlem görmüş alaşımların ASTM E8/E8M-16 standardına göre yapılmış çekme testi sonuçları Çizelge 4.4'te gösterilmiştir. Fakülte bünyesinde numune işleme merkezi bulunmadığı için her bir koşul için sadece iki adet numune işlenmiş ve elde edilen sonuçların ortalamaları hesap edilmiştir. Bazı koşullarda numuneler akma noktasından önce kırılmıştır, bu tip numuneler sonuçlara dahil edilmemiştir.

Çizelge 4.4 Çekme testi sonuçları.

Numune	AlSi10Mg			0,2 Zr			0,2 Zr + 0,5 V		
	Akma Day. (Mpa)	Çekme Day. (Mpa)	% Uzama	Akma Day. (Mpa)	Çekme Day. (Mpa)	% Uzama	Akma Day. (Mpa)	Çekme Day. (Mpa)	% Uzama
Döküm	178	219	7,8	168	203	3,4	180	213	4,4
1 saat	174	202	6,6	167	203	3,3	176	207	3,6
4 saat	205	220	4,6	160	197	1,7	183	223	2,7
16 saat	155	201	3,2	162	197	2,1	194	228	2,8
64 saat				167	213	2,4	212	250	3,9

Yapılan testler neticesinde çok önemli sonuçlar elde edilmiştir. Sertlik sonuçlarında olduğu gibi % 0,2 Zr + % 0,5 V içeren alaşım en iyi mekanik özellikleri sergilemiştir. Bu alaşımın akma ve çekme dayanımı yaşlandırma süresinin artmasıyla birlikte artmış ve 64 saat (en uzun) yaşlandırma süresinde sırasıyla 212 ve 250 MPa, akma ve çekme gerilme değerlerine sahip olmuştur. Ayrıca 64 saat yaşlandırma süresi için yüksek dayanım değerlerinin yanında % 3,9 uzama göstermesi diğer büyük bir avantaj olarak göze çarpmaktadır. Akma ve çekme dayanımında meydana gelen önemli artışların katı çözeltili sertleşmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Al 125 pm atomik yarıçapa sahip iken V daha yüksek 135 pm atomik yarıçapa sahiptir (Owolabi ve ark., 2014). YMK kristal yapısına sahip Al matrisi içerisinde çözünen V atomları elastik modülü etkileşiminden ötürü dayanımı arttırmaktadır.

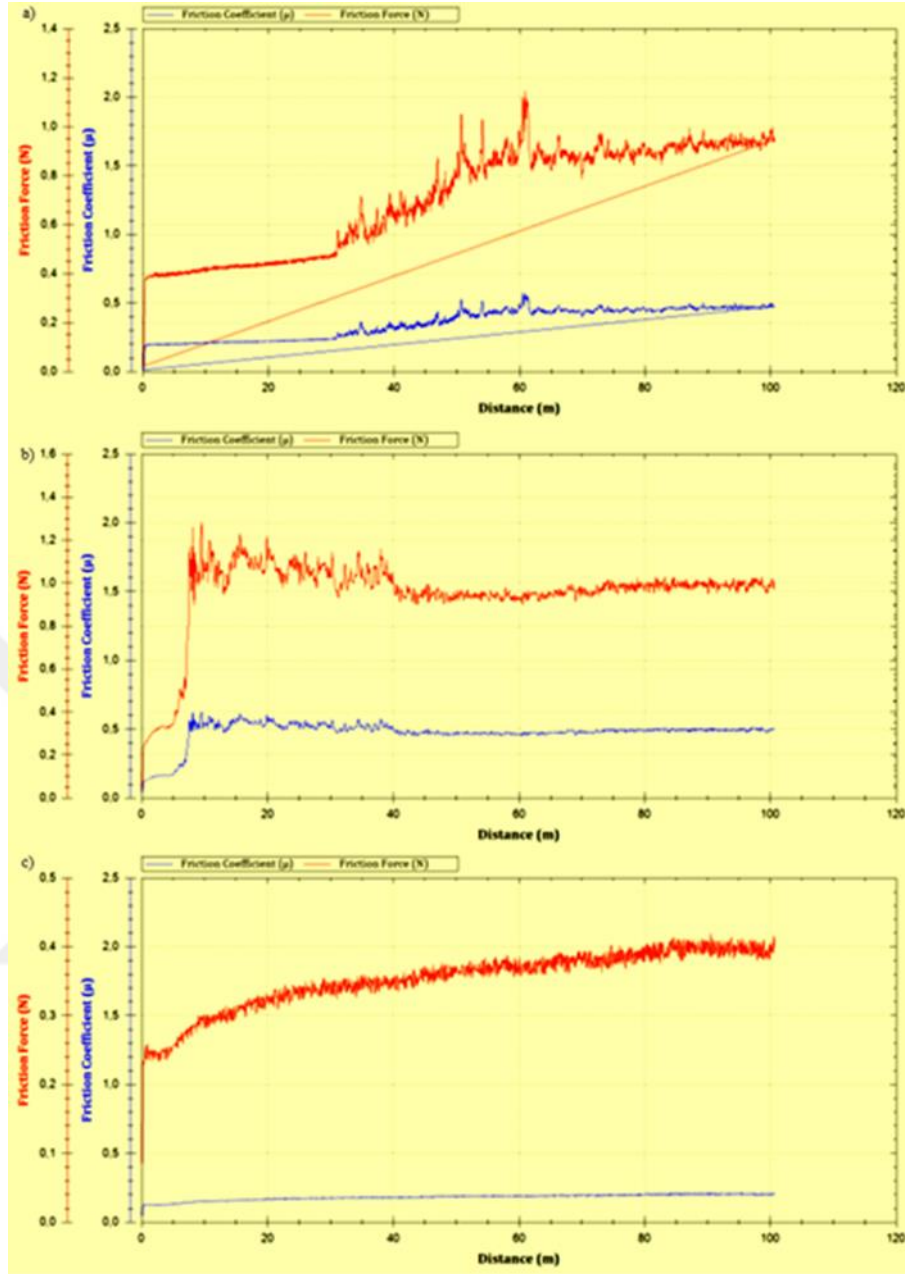
Diğer alaşımların mekanik özellikleri incelendiğinde sertlik sonuçlarına benzer eğilimler görülmektedir. AlSi10Mg alaşımı % 0,2 Zr içeren alaşıma kıyasla daha yüksek uzama, akma ve çekme dayanımı değerlerine sahiptir. Sertlik sonuçlarından farklı olarak bu iki alaşımın mekanik özellikleri yaşlandırma ısı işleminden sonra biraz kötüleşmiştir.

4.7 Aşınma Testi Sonuçları

Zr ve/veya V ilavesinin AlSi10Mg alaşımının aşınma davranışına etkisini incelemek amacıyla dökülmüş haldeki üç alaşıma aşınma testi uygulanmıştır. Aşınma testi neticesinde elde edilen sürtünme kuvveti ve sürtünme katsayısı eğrileri ve verileri sırasıyla Çizelge 4.5 ve Şekil 4.7’de verilmiştir.

Çizelge 4.5 Aşınma testi sonuçlarına göre belirlenen sürtünme katsayısı değerleri.

Alaşım	Minimum sürtünme katsayısı	Maksimum sürtünme katsayısı	Ortalama sürtünme katsayısı
AlSi10Mg	0,45	0,63	0,5
0,2 Zr	0,18	0,58	0,38
0,2 Zr + 0,5 V	0,19	0,21	0,2



Şekil 4.7 Aşınma testi sonucunda elde edilen sürtünme kuvveti-sürtünme katsayısı eğrileri:
 (a) AlSi10Mg, (b) 0,2 Zr, ve (c) 0,2 Zr + 0,5 V alaşımları.

Elde edilen sonuçlara göre en yüksek sürtünme katsayısı AlSi10Mg alaşımı için, en düşük ise 0,2 Zr + 0,5 V alaşımı için gözlemlenmiştir. Alaşımların aşınma direnci ile daha net ve kesin bilgi verebilmek için aşınma kaybı, aşınma faktörü ve yüzey pürüzlülüğünün ölçülmesi gerekmektedir.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Ticari saflığa sahip AlSi10Mg, % 0,2 Zr ve % 0,2 Zr + % 0,5 V içeren alaşımlar kokil kalıba döküm yöntemi ile başarılı bir şekilde üretilmiştir.

Zr ve/veya V ilavesinin mikroyapısal özellikler ve faz ilişkilerine çok önemli etkisi gözlemlenmemesine rağmen özellikle % 0,2 Zr + % 0,5 V ilavesinde mekanik özelliklerde üstün artışlar meydana gelmiştir.

Üç alaşım için en iyi sertlik değerinin 16 saatlik yaşlandırma ile elde edildiği görülmüştür. Bileşim olarak bakıldığında 0,2 Zr + 0,5 V içeren alaşım en yüksek sertlik değerine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca bu alaşıma yapılan 16 saatlik yaşlandırma sonucunda en yüksek sertlik değeri elde edilmiştir.

Sertlik değerlerinde olduğu gibi 0,2 Zr + 0,5 V içeren alaşımın çekme ve akma dayanımları yaşlandırma süresinin artması ile artmış, 64 saat yaşlandırma sonucunda 212 MPa akma, 250 MPa çekme dayanımı elde edilmiş ve en iyi sonucun bu sonuç olduğu görülmüştür.

Bunun yanında 64 saatlik yaşlandırma ile elde edilen 0,2 Zr + 0,5 V içeren alaşım % 3,9 uzama göstermiştir.

Araştırma kapsamında elde edilen sonuçlar incelendiğinde Zr'un yapı içerisinde kararlılığı sağlarken daha fazla oranda ilave edilen V'un yapı içerisinde katı çözültü sertleştirme oluşturduğu tahmin edilmektedir.

5.2 Öneriler

Yapılan analizler neticesinde yaşlandırma ısıl işlemi ile birlikte Zr ve/veya V alaşım elementi ilavesinin ticari AlSi10Mg'un çok daha üstün mekanik özelliklere sahip olduğu görülmüştür. Aşağıda listelenen öneriler ile birlikte daha detaylı ve kapsamlı sonuçların elde edileceği tahmin edilmektedir.

- Farklı yaşlandırma süre ve sıcaklıklarının etkisinin incelenmesi.
- Daha yüksek oranlarda Zr ve/veya V ilavesi ile hem yapısal hem de mekanik özelliklerde meydana gelecek değişikliklerin incelenmesi.
- Oda sıcaklığı haricinde (150-250 °C arasında nispeten daha yüksek sıcaklıklarda) mekanik özelliklerin incelenmesi.
- Zr ve/veya V ilavesinin AlSi10Mg alaşımlarının aşınma davranışına etkisinin incelenmesi.

KAYNAKLAR

- Anık, S., Anık, E.S., Varol, M., 2000, 1000 soruda kaynak teknolojisi el kitabı, *Birsen Yayınevi*, İstanbul.
- Apelian, D., 2009, Aluminum cast alloys: enabling tools for improved performance. *North American Die Casting Association*, New York.
- Askeland, D. R., 2002, Malzeme Bilim ve Mühendislik Malzemeleri, Cilt 1, *Nobel Yayınları*, Ankara.
- Başer, T. A., 2013, "Alüminyum Alaşımları ve Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı," *Mühendis ve Makine Dergisi Vol 53*, 51-58.
- Bolton, W., 1993, Engineering Materials Technology 2nd. Edition, *B.H Newness*, Oxford, 271-280.
- Breslavsky, D., 2021, ENAC 43000-ALSi10Mg, National Technical University, http://www.steelnumber.com/en/steel_alloy_composition_eu.php?name_id=1227 [Ziyaret Tarihi: 6 Haziran 2021].
- Brown, J., 1999, Aluminium casting alloys. In *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook Butterworth-Heinemann*, Oxford, 23-45.
- Can A. Ç., 2006., Tasarımcı Mühendisler İçin Malzeme Bilgisi, *Birsen Yayınları*, İstanbul.
- Eruslu, N., Altmışoğlu, A., & Taptık, Y., 1990, Alaşımlar Ders Notu, *İTÜ*, İstanbul, 86-97.
- Geiser, W., 1982. Aluminium Alloys Tables. 7th, Alcan S. A., Zurich.
- Hernandez, F. C. R., Ramírez, J. M. H., & Mackay, R., 2017, Applications in the automotive and aerospace industries, *In Al-Si Alloys*, Springer, 161-169.
- Ibarra, D. G., 1999, Control of grain refinement of Al-Si alloys by thermal analysis, *McGill University Department of Mining and Metallurgical Engineering*, Ottawa.
- Kalhapure, M. G. & Dighe, P. M., 2015, Impact of Silicon Content on Mechanical Properties of Aluminum Alloys, *International Journal of Science and Research 4*, 38-40.
- Karabulak, E., 2007, Al-Si-XTi Alaşımlarının Dökümü ve Mikroyapısal Karakterizasyonu, Yüksek Lisans Tezi, *Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Kocaeli.
- Kaufman, J. G. & Rooy, E. L., 2004, Aluminum alloy castings: properties, processes and applications, *Asm International*.

- Kayalı, E.S., 1991, Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları, *İTÜ Yayınları*, İstanbul.
- Mohamed, A. M. A., & Samuel, F. H., 2012, A review on the heat treatment of Al-Si-Cu/Mg casting alloys, *Heat Treatment-Conventional and Novel Applications*, 55-72.
- Murray, J. L., & McAlister, A. J., 1984, The Al-Si (Aluminum-Silicon) system, *Bulletin of alloy phase diagrams*, 5(1), 74.
- Novikov, İ.İ., 2012, Metallerin Isıl İşlem Teorisi (1. Basımdan Çeviri), *Nobel Akademik Yayıncılık*, Ankara.
- Owolabi, T. O., Akande, K. O., & Olatunji, S. O., 2014, Estimation of the atomic radii of periodic elements using support vector machine, *IJAIST*, 28(28), 39-49.
- Öksüz, C., 1996, Yüksek Mukavemetli (2024, 6061, 7075) Alüminyum Alaşımlarının Jominy Yöntemi İle Su Verme Duyarlılığı, Yüksek Lisans Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- 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.
- Rooy, E. L., 1990, Introduction to aluminum and aluminum alloys. ASM International, *Metals Handbook, Tenth Edition* 2, 3-14.
- Sarsılmaz, F., 2008, Sürtünme karıştırma kaynak yöntemi ile birleştirilmiş AA7075/AA6061 kaynaklı bağlantıların mikroyapı ve mekanik özelliklerinin araştırılması, *Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Elazığ, 4-16.
- Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J., & Chen, D. L., 2014, Thermal stability of (AlSi) x (ZrVTi) intermetallic phases in the Al-Si-Cu-Mg cast alloy with additions of Ti, V and Zr, *Thermochimica Acta* 595, 11-16.
- Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J., & Chen, D. L., 2015, Microstructure and mechanical properties of Al-Si cast alloy with additions of Zr-V-Ti, *Materials & Design* 83, 801-812.
- Sharma, R. Anesh. And Dwivedi, D. K., 2005, Influence of silicon (wt %) and heat treatment on abrasive wear behaviour of cast Al-Si-Mg alloys, *Materials Science and Engineering A* 408, 274-280.
- Sigworth, G. K. & Kuhn, T. A., 2007, Grain refinement of aluminum casting alloys, *International Journal of Metalcasting Vol. 1*, 31-40.
- Sigworth, G. K., 2014, Fundamentals of solidification in aluminum castings, *International Journal of Metalcasting* 8(1), 7-20.

- Sigworth, G. K., & Guzowski, M. M., 1987, Grain refining of hypoeutectic Al-Si alloys, *Giessereipraxis* 5, 51-58.
- Smallman, R.E., 1985, Modern Physical Metalurgy, Birmingham, Butterworth & Co, Londra.
- Torabian, H., Pthal, J.P., 1994, On Wear Characteristics Of Loaded Al-Si Alloys, *Wear* Vol. 177, 47- 54.
- Totten, G. E. & MacKenzie, D. S. (Eds.), 2003, Handbook of Aluminium. Physical Metallurgy and Processes Vol. 1, CRC, New York, 212.
- Töre, C., 2012, Mekanik Tasarımda Alüminyum ve Özellikleri, *Makine Mühendisleri Odası*, Ankara.
- Turhan, S., 2002, Alüminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Magnezyumun ve Silisyumun Etkisi, Yüksek Lisan Tezi, *İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü*, İstanbul.
- Uludağ, M., 2011, Farklı Şartlarda Dökülmüş Modifiyeli Al-12Si Alaşımlarında Yapı ve Özellikler, Yüksek Lisans Tezi, *Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*, Konya.
- Uyaroğlu, A., Yücesu, H. S., & Çıtak, R., 2010, PİSTON ARIZALARININ ANALİZİ. *Selçuk Teknik Dergisi* 9(2), 110-130.
- Vatansever, F., Ertürk, A. T., & Karabay, S., 2018, Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi* 20(60), 797-803.
- Warmuzek, M., 2004, Aluminum-silicon casting alloys: an atlas of microfractographs., ASM international.
- Yıldırım, H., 2006, Alüminyum Malzemenin Otomotiv Sektöründeki Uygulamaları, Doktora Tezi, *İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü*.
- Yüksel, M., 2003, Malzeme Bilimlerine Genel Bir Bakış, 1, Özkan Matbaacılık.
- Zamani, M., 2017, Al-Si Cast Alloys-Microstructure and Mechanical Properties at Ambient and Elevated Temperatures, Doctoral Dissertation, *Jönköping University School of Engineering*, Sweden.
- Zhang, M., Liu, K., Han, J., Qian, F., Wang, J., & Guan, S., 2021, Investigating the role of Cu, Zr and V on the evolution of microstructure and properties of Al-Si-Mg cast alloys. *Materials Today Communications* 26, 102055.

