



**ERBİYUM ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİNİN A356
ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMINA ETKİSİNİN
İNCELENMESİ**

Muhammed Enes AYDIN

Yüksek Lisans Tezi

Makine Mühendisliği

Ana Bilim Dalı

Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN

2024

(Her Hakkı Saklıdır)

T.C.
BAYBURT ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANA BİLİM DALI
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ TEZLİ YÜKSEK LİSANS PROGRAMI

ERBİYUM ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİNİN A356 ALÜMİNYUM DÖKÜM
ALAŞIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Muhammed Enes AYDIN

Danışman: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

İkinci Danışman: Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN

BAYBURT - 2024

KABUL VE ONAY

Doç. Dr. Murat ÇOLAK ve Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında, Muhammed Enes AYDIN tarafından hazırlanan “Erbiyum Alaşım Elementi İlavesinin A356 Alüminyum Döküm Alaşımına Etkisinin İncelenmesi” başlıklı bu çalışma, 08.07.2024 tarihinde yapılan savunma sınavı sonucunda oy birliği ile başarılı bulunarak jürimiz tarafından Yüksek Lisans Tezi olarak kabul edilmiştir.

Başkan : Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Recep ÇATAR

Üye : Dr. Öğr. Üyesi Selçuk ŞİRİN

Bu tezin kabulü Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Yönetim Kurulu’nun/...../20... tarih ve 20...../.....-..... sayılı kararıyla onaylanmıştır.

Doç. Dr. Murat KUL
Enstitü Müdürü

BEYANNAME

Bayburt Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü tez yazım kılavuzuna göre Doç. Dr. Murat ÇOLAK ve Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN danışmanlığında hazırlamış olduğum “Erbiyum Alaşım Elementi İlavesinin A356 Alüminyum Döküm Alaşımına Etkisinin İncelenmesi” başlıklı program seçin tezimin bilimsel etik değerlere ve kurallara uygun, özgün bir çalışma olduğunu, aksinin tespit edilmesi halinde her türlü yasal yaptırımını kabul edeceğimi beyan ederim.

08.07.2024

Muhammed Enes AYDIN



ÖN SÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında değerli katkı ve yönlendirmeleriyle bana ışık tutan, samimiyeti ve desteği ile sürekli yanımda olan danışmanlarım Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN'e ve Doç. Dr. Murat ÇOLAK'a en içten teşekkürlerimi sunarım. Onların bilgi ve deneyimleri, bu tezin şekillenmesinde büyük rol oynamıştır.

Ayrıca, tez çalışmam boyunca sağladığı kaynaklar ve teknik destek için Bayburt Üniversitesi'ne teşekkürlerimi iletmek isterim. Üniversitenin sağladığı altyapı ve destek, bu çalışmanın başarılı bir şekilde tamamlanmasını sağlamıştır.

Çalışmam boyunca beni destekleyen sevgili aileme ve dostlarıma içten teşekkürlerimi sunmak istiyorum. Onların sürekli desteği, benim için en büyük motivasyon kaynağı oldu ve bu süreçte karşılaştığım her zorluğun üstesinden gelmeme yardımcı oldu.

Son olarak, bu çalışmanın bilimsel ve teknik açıdan zenginleşmesine katkı sağlayan tüm hocalarıma ve benimle iş birliği yapan herkese teşekkürlerimi sunarım.

Muhammed Enes AYDIN

ÖZET

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ERBİYUM ALAŞIM ELEMENTİ İLAVESİNİN A356 ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Muhammed Enes AYDIN

Bayburt Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim Enstitüsü

Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

İkinci Danışman: Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Bayburt-2024, Sayfa: 56

Alüminyum ve alaşımları döküme elverişli, elektrik iletkenliğinin yüksek olması, korozyona karşı dayanıklı olması, zehirlenme tehlikesinin olmaması ve diğer pek çok avantajlı özellikleri sayesinde otomotiv, havacılık, savunma, makine imalat endüstrisi gibi birçok alanda yaygınca kullanılan önemli bir mühendislik malzemesidir. Ancak yüksek teknoloji gereksinimi olan birçok sektörde kullanımı artmakla birlikte kalite gereksinimleri de artmaktadır. Alüminyum döküm alaşımlarından kalite beklentisindeki artışa bağlı olarak farklı alaşım elementi ilaveleri ile dökümler yapılması ve üretimde yeni teknoloji kullanımları üzerinde çalışmalar devam etmektedir. İlave edilen alaşımlar ve uygulanan ısıt işlemler alüminyumun fiziksel ve kimyasal özelliklerine etki etmektedir, bu işlemler sonucunda alüminyum istenilen özelliklerde elde edilmeye çalışılmaktadır.

Bu çalışmada A356 alüminyum döküm alaşımına %0,03, %0,06 ve %0,1 Erbiyum (Er) ilavesinin döküm özelliklerine etkisi farklı kokil kalıplara dökülerek değerlendirilmiştir. Döküm numuneleri ile akıcılık tane inceltme ve mikroyapı özellikleri ve mekanik özelliklerinde Er ilavesinin etkisi değerlendirilecektir.

Anahtar Kelimeler: A356 döküm alaşımı, akıcılık, tane inceltme, kokil kalıba döküm.

ABSTRACT

M. SC. THESIS

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ERBIUM ALLOY ELEMENT ADDITIONS ON A356 ALUMINIUM CASTING ALLOY

Muhammed Enes AYDIN

Bayburt University

Institute of Graduate Studies

Department of Mechanical Engineering

Thesis Advisor: Doç. Dr. Murat ÇOLAK

Second Advisor: Prof. Dr. Mustafa TÜRKMEN

Bayburt-2024, Pages: 56

Aluminum and its alloys are suitable for casting, have high electrical conductivity, are resistant to corrosion, are not poisonous, and are an important engineering material that is widely used in many areas such as automotive, aviation, defense, machinery manufacturing industry. However, as its use increases in many sectors with high technology requirements, quality requirements are also increasing. Depending on the increase in quality expectation from aluminum casting alloys, studies on casting with different alloying element additions and the use of new technology in production continue. Added alloys and applied heat treatments affect the physical and chemical properties of aluminum, as a result of these processes, aluminum is tried to be obtained with the desired properties.

In this study, the effect of adding 0.03%, 0.06% and 0.1% Erbium (Er) to A356 aluminum casting alloy on the casting properties will be evaluated by pouring it into different permanent molds. Within the scope of examining the casting properties, the effect of Er addition on flowability, grain refinement, microstructure properties and mechanical properties will be evaluated.

Keywords: A356 casting alloy, fluidity, grain refinement, permanent mold casting.

İÇİNDEKİLER

KABUL VE ONAY.....	II
BEYANNAME.....	III
ÖN SÖZ.....	IV
ÖZET.....	V
ABSTRACT.....	VI
İÇİNDEKİLER.....	VII
TABLOLAR.....	IX
ŞEKİLLER.....	X
KISALTMALAR.....	XI
SİMGELER.....	XI
GİRİŞ.....	1
Araştırmanın Konusu ve Problemi.....	1
Araştırmanın Amacı.....	1
Araştırmanın Önemi.....	1
Araştırmanın Sınırlılıkları.....	2
Varsayımlar.....	2
BİRİNCİ BÖLÜM.....	4
1. KURAMSAL ÇERÇEVE.....	4
1.1. ERBİYUM.....	4
1.1.1. Erbiyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri.....	4
1.1.2. Erbiyumun Uygulama ve Kullanım Alanları.....	5
1.2. ALÜMİNYUM.....	5
1.3. ALAŞIMLAMA.....	7
1.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI.....	7
1.4.1. Dövme Alüminyum.....	8
1.4.2. Döküm Alüminyum.....	8
1.5. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ.....	9
1.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ AKICILIK VE HACİMSEL ÇEKME ÖZELLİKLERİ.....	10
1.6.1. Akıcılık.....	10
1.6.2. Hacimsel Çekme.....	11
1.7. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME.....	12
1.8. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUM ALAŞIMINA ETKİSİ.....	14
1.8.1. Bakırın Etkisi.....	14
1.8.2. Çinkonun Etkisi.....	14
1.8.3. Demirin Etkisi.....	15
1.8.4. Magnezyumun Etkisi.....	15
1.8.5. Manganın Etkisi.....	15
1.8.6. Nikelin Etkisi.....	16
1.8.7. Silisyumun Etkisi.....	16
1.8.8. Sodyumun Etkisi.....	16
İKİNCİ BÖLÜM.....	17
2. MATERYAL METOT.....	17

2.1. DENEY PARAMETRELERİ VE YÖNTEM.....	17
2.2. KALIP HAZIRLIĞI VE ÖN ISITMA İŞLEMİ.....	17
2.3. ERGİTME İŞLEMİ VE DÖKÜM SÜRECİ.....	18
2.3.1. Dökümlerin İncelenmesi ve Testler.....	20
2.3.1.1. Azaltılmış basınç testi (rpt) ve yoğunluk ölçümü.....	21
2.3.1.2. K-mold testi.....	22
2.3.1.3. Mikro yapı incelemeleri.....	23
2.3.1.4. Sıvı metal akıcılık ölçümü.....	24
2.3.1.5. Basamak test kalıbı.....	25
2.3.1.6. Çekme testi.....	25
2.3.1.7. Sertlik testi.....	27
ÜÇÜNCÜ BÖLÜM.....	28
3. BULGULAR.....	28
3.1. SIVI METAL KALİTESİNİN TESPİTİ.....	28
3.2. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI.....	33
3.3. MİKROYAPI İNCELEME SONUÇLARI.....	36
3.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI.....	43
3.4.1. Çekme Test Sonuçları.....	43
3.4.2. Sertlik Test Sonuçları.....	48
SONUÇ.....	51
KAYNAKÇA.....	53
ÖZ GEÇMİŞ.....	56

TABLÖLAR

Tablo 1: Erbiyum Elementinin Bazı Özellikleri.....	4
Tablo 2: Dövme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	8
Tablo 3: Dökme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması.....	9
Tablo 4: Döküm Alaşımlarının Hacimsel Çekme Yüzdeleri.....	12
Tablo 5: Alüminyuma Katılan En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri	14
Tablo 6: Deney Parametreleri.....	17
Tablo 7: RPT Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Sonuçları	29
Tablo 8: K- Mold inklüzyon, Parça Sayıları ve K Değerleri.....	32
Tablo 9: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri	35
Tablo 10: Çekme Test Deneyi Sonuçları.....	44
Tablo 11: Sertlik Ölçüm Sonuçları	49



ŞEKİLLER

Şekil 1: Tane İncelticinin Etkisi a) Tane inceltici ilavesiz b) Tane inceltici ilaveli	13
Şekil 2: Isıtıcı Tabla ve Kalıpların Isıtılması	18
Şekil 3: a) Çan Tipi Ergitme Ocağı (Elektrik Direnç Ocağı) b) K Tipi Termokopul	19
Şekil 4: Döküm İşleminde Örnek Görüntü	20
Şekil 5: Yoğunluk Ölçüm Düzenegi	21
Şekil 6: K-Mold Numunesi	22
Şekil 7: Mikro Yapı İncelemelerinde Kullanılan Cihazlar	23
Şekil 8: a) Spiral Akıcılık Test Kalıbı b) Dört Kanallı Akıcılık Test Kalıbı	24
Şekil 9: Basamak Test Kalıbı Numunesi	25
Şekil 10: a) Mekanik Test Kalıbı Fotoğrafi b) Mekanik Test Kalıbı Ölçüleri.....	26
Şekil 11: Çekme Testi için Döküm Numunesinin Şematik Gösterimi	26
Şekil 12: RPT Test Numune Görüntüleri.....	29
Şekil 13: RPT Numune Kesit Görüntüleri	30
Şekil 14: K-Mold Kalıbı ile Yapılan Döküm Numune Görseli	31
Şekil 15: K- Mold Numunelerinin Kırık Yüzey Görüntüleri.....	32
Şekil 16: Akıcılık Döküm Numuneleri	34
Şekil 17: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri	35
Şekil 18: Basamak Kalıbı Döküm Numune Görselleri	37
Şekil 19: 5 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri	38
Şekil 20: 10 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri	39
Şekil 21: 15 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri	39
Şekil 22: 20 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri	40
Şekil 23: Ölçülen SDAS Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Er Oranına göre Değişimi	41
Şekil 24: Ölçülen SDAL Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Er Oranına göre Değişimi	41
Şekil 25: Mekanik Test Kalıbı Döküm Numunesi Görüntüsü	43
Şekil 26: Döküm Deneylerine Ait Gerilme Birim Şekil Değiştirme Grafikleri.....	45
Şekil 27: Er İlavesine Bağlı Olarak Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi.....	46
Şekil 28: Er İlavesine Bağlı Olarak % Uzama Değerleri Değişimi	46
Şekil 29: Er İlavesine Bağlı Olarak Statik Tokluk Değerleri Değişimi	47
Şekil 30: Er İlavesine Bağlı Olarak Sertlik Testi Sonuçlarının Grafik Gösterimi	49

KISALTMALAR

°C	: Santigrat derece
ASTM	: American Society for Testing and Materials
cm	: Santimetre
dk	: Dakika
gr	: Gram
Kg	: Kilogram
Kg-f	: Kilogram-Kuvvet
kN	: Kilonewton
kJ	: Kilo Joule
mm	: Milimetre
MPa	: Megapascal
RPT	: Reduced Pressure Tester
SDAL	: Secondary Dendrite Arm Lengthing
SDAS	: Secondary Dendrite Arm Spacing
µm	: Mikrometre

SİMGELER

Al	: Alüminyum
Er	: Erbiyum
Mg	: Magnezyum
Mn	: Mangan
Nb	: Niyobyum
Si	: Silisyum
SiC	: Silisyum Karbür
Ti	: Titanyum
V	: Vanadyum
Zr	: Zirkonyum

GİRİŞ

Araştırmanın Konusu ve Problemi

Alüminyum alaşımları, hafiflik ve korozyon direnci gibi üstün özellikleri sayesinde geniş bir kullanım alanına sahiptir. Ancak, bu alaşımların performansı, bileşimlerindeki alaşım elementlerinin türüne ve miktarına bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Bu çalışma, A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda erbiyum (Er) ilavesinin alaşım özellikleri üzerine etkilerini araştırmayı amaçlamaktadır. Er ilavesinin, alaşımın döküm esnasındaki mikroyapı özelliklerini iyileştirmesi ve mekanik özelliklerini artırması beklenmektedir. Bu amaçla, sıvı metal temizliği, akıcılık, mikroyapı ve mekanik özelliklerin değerlendirilmesi için farklı parametrelerde deneyler yapılmıştır. K-mold ve RPT (Reduced Pressure Test) numuneleri ile Er elementinin alaşımda sıvı metal temizliğinin etkisi incelenmiş, özel tasarlanmış farklı kesit kalınlıklarına sahip 4 kanallı akıcılık ve spiral akıcılık kalıplarına yapılan dökümlerle Er ilavesinin alaşımın akıcılığına etkisi incelenmiş ve basamak kalıbı numuneleri ile mikroyapı analizleri yapılmıştır. Ayrıca, çekme ve sertlik testleri, alaşıma eklenen Er'nin mekanik özellikler üzerindeki etkilerini belirlemek için uygulanmıştır. Bu kapsamlı değerlendirme, A356 alaşımının performansını optimize etmek için erbiyum ilavesinin potansiyel faydalarını ortaya koymayı hedeflemektedir.

Araştırmanın Amacı

Bu çalışmanın amacı, A356 alüminyum alaşımına erbiyum elementi ilave edilerek mikro yapı ve mekanik özelliklerin nasıl iyileştirilebileceğini araştırmaktır. Erbiyumun farklı oranlarda eklenmesinin, alaşımın akıcılığı, sıvı metal temizliği, mikro yapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkilerini sayısal verilerle ortaya koymak bu çalışmanın temel hedefidir. Elde edilecek bulgularla, erbiyum ilavesinin optimum oranları belirlenerek, erbiyum katkılı alüminyum alaşımlarının performansının artırılması ve endüstriyel uygulamalarda daha verimli kullanımı sağlanacaktır.

Araştırmanın Önemi

Araştırmanın önemi, A356 alüminyum alaşımına erbiyum ilavesinin mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktır. Alüminyum döküm endüstrisi, özellikle otomotiv, havacılık ve uzay sanayisi gibi alanlarda hızla gelişmekte ve yaygınlaşmaktadır. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarının performansını optimize etmek büyük bir gereklilik haline gelmiştir. Erbiyum ilavesinin, alüminyumun akıcılığı, sıvı metal temizliği, mikro yapı ve mekanik özelliklerini nasıl etkilediğini sayısal verilerle saptamak,

endüstride daha dayanıklı ve verimli malzemelerin üretimine katkı sağlayacaktır. Bu çalışma, alüminyum döküm teknolojilerinin geliştirilmesine ve yeni uygulama alanlarının keşfedilmesine olanak tanıyacak önemli veriler sunmayı hedeflemektedir.

Araştırmanın Sınırlılıkları

Araştırmanın sınırlılıkları göz önüne alındığında, A356 alüminyum alaşımına çeşitli elementlerin ilavesi üzerine birçok çalışma yapılmış olsa da, erbiyum ilavesinin etkilerini inceleyen araştırmaların sayısı oldukça sınırlıdır. Literatürdeki bu eksiklik, erbiyumun A356 alaşımının mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki potansiyel etkilerinin yeterince anlaşılmamış olmasına yol açmaktadır. Bu durum, erbiyumun alaşım performansını nasıl iyileştirebileceği konusundaki bilgimizi sınırlamaktadır. Dolayısıyla, bu çalışma, erbiyum ilavesinin A356 alaşımına olan etkilerini detaylı bir şekilde inceleyerek literatüre katkıda bulunmayı ve mühendislik uygulamalarında kullanılabilirliği artırmayı amaçlamaktadır.

Varsayımlar

Alüminyum, doğada bol bulunan ve endüstriyel uygulamalarda geniş bir yelpazede kullanılan bir metaldir. Yer kabuğunda en çok bulunan metallerden biri olan alüminyum, hafifliği, dayanıklılığı ve korozyon direnci gibi üstün özellikleriyle dikkat çekmektedir. Çelikten sonra en çok tercih edilen metal olması, özellikle otomotiv, havacılık ve savunma sanayilerinde alüminyum ve alaşımlarının vazgeçilmez bir malzeme haline gelmesini sağlamıştır (Zeytin, 2000). Otomotiv sektöründe, yakıt verimliliğini artırmak ve emisyonları azaltmak amacıyla araçların ağırlığını azaltmak için yaygın olarak kullanılmaktadır. Havacılıkta, yüksek mukavemet-ağırlık oranı nedeniyle uçak gövdelerinde ve diğer kritik bileşenlerde tercih edilmektedir. Ayrıca, savunma sanayinde zırh malzemesi olarak kullanımı, mukavemet ve darbe dayanımı gibi özelliklerinin sürekli olarak geliştirildiğini göstermektedir (Başer, 2013).

Rosalbino ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Mg-Al alaşımlarına erbiyum katkısının korozyon direncini önemli ölçüde artırdığını ortaya koymaktadır. Bu araştırma, borat tampon çözeltisinde test edilen Mg-Al-Er alaşımlarının, ticari AM60 alaşımına kıyasla üstün korozyon direnci sergilediğini göstermiştir. Elektrokimyasal analizler, erbiyum içeren alaşımların yüzeyinde oluşan koruyucu tabakaların, AM60 alaşımında meydana gelen magnezyum hidroksit veya alüminyum hidroksit tabakalarına göre daha etkili olduğunu kanıtlamaktadır. Bu durum, erbiyum katkılı Mg-Al alaşımlarının, yüksek korozyon direnci gerektiren endüstriyel uygulamalar için son derece potansiyel taşıyan malzemeler olduğunu göstermektedir (Rosalbino vd., 2005).

Chen ve arkadaşları, erbiyum modifikasyonunun Mg-Al alaşımlarının mikroyapısı, mekanik özellikleri ve korozyon direnci üzerindeki etkilerini araştırmaktadır. Çalışma, Al₃Er fazının oluşumunu teşvik ederek alaşımın saflığını artırdığını göstermektedir. Erbiyum modifikasyonu sonrasında alaşımların çekme dayanımında belirgin bir artış ve mekanik özelliklerde önemli bir iyileşme sağlandığı belirtilmektedir. Ayrıca, erbiyum ile modifiye edilen Mg-Al alaşımlarının korozyon direncinde belirgin bir gelişme gözlemlendiği rapor edilmiştir. Bu bulgular, erbiyumun Mg-Al alaşımlarının fiziksel ve mekanik özelliklerini olumlu yönde etkileyebileceğini göstermektedir (Chen vd., 2010).

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini belirleyen kritik unsurlardan biri, tane boyutu ve morfolojisidir. Tane boyutunu küçültmek alüminyum alaşımlarının mekanik dayanımını artırmak mümkün hale gelmektedir. Bu bağlamda, son dönemlerde nadir toprak elementlerinin alüminyum alaşımlarına eklenmesiyle elde edilen tane inceltme etkileri üzerine yoğun araştırmalar yapılmaktadır. Özellikle erbiyum (Er) ve niyobyum (Nb) gibi elementler, alüminyum alaşımlarında dikkat çekici sonuçlar vermiştir. Bu elementlerin ilavesi, tane yapısını optimize ederek alaşımların mukavemet, süneklik ve korozyon direnci gibi özelliklerinde belirgin iyileşmeler sağlamaktadır (Aydogan vd., 2022).

Gao ve arkadaşları saf alüminyumun mikroyapısı ve mekanik özellikleri üzerinde Zr ve Er elementlerinin etkilerini araştırmışlardır. Araştırmalarında, %0,2 ağırlıkça Zr eklemenin döküm halindeki alaşımın tane boyutunu incelttiği ve bu durumun özellikle ince taneli güçlendirmeye katkı sağladığını belirlemişlerdir. Ayrıca, %0,2 ağırlıkça Er eklenmesinin sadece dendritik yapıyı rafine ettiği tespit edilmiştir. Er'in matris içinde çözünürlüğü mümkün olurken, %0,4 ağırlıkça Er eklenmesi durumunda ise bir kısmının tane sınırlarında birincil Al₃Er çökeltileri oluşturduğu gözlemlenmiştir. Saf alüminyuma hem Zr hem de Er eklenmesinin, mekanik özellikleri geliştirdiği ve Al-0,2Zr-0,2Er alaşımının maksimum geriliminin, Er ve Zr içermeyen saf alüminyumun maksimum geriliminden %32,8 daha yüksek olduğu bulunmuştur (Gao vd., 2013).

Bu çalışma, A356 alüminyum alaşımının mekanik ve mikroyapısal özelliklerine çeşitli oranlarda Er ilavesinin etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemeyi hedeflemektedir. Bu amaçla dökümlerde, A356 alaşımı, ilavesiz ve %0,03, %0,06, ve %0,1 oranlarında Er eklenmiş olarak kokil kalıba dökümler gerçekleştirilmiştir. Sıvı metalin temizliğini değerlendirmek için K-mold ve vakum altında katılaşma (RPT) testleri uygulanmıştır. Alaşımın mikroyapısına katılaşma hızının ve Er ilavesinin etkilerini incelemek üzere basamak kalıbı kullanılmıştır. Ek olarak, alaşıma eklenen Er mekanik özellikler üzerindeki etkilerini belirlemek amacıyla çekme ve sertlik testleri yapılmıştır.

BİRİNCİ BÖLÜM

1. KURAMSAL ÇERÇEVE

1.1. ERBİYUM

Nadir toprak elementlerinden biri olan erbiyum, Carl Gustaf Mosander tarafından 1843 yılında keşfedilmiştir. Erbiyumun elementinin keşfi, gadolinit adı verilen mineralin bulunmasına dayalıdır. İsveç ordusunda teğmen ve yarı zamanlı kimyager olan Carl Axel Arrhenius, 1787 yılında İsveç'in Ytterby kasabasındaki bir taş ocağında sıra dışı siyah bir mineral bulmuştur. Bu mineral diğer minerallerde bulunmayan özellikler içeriyordu. Gadolinit adı verilen bu mineralin kimyagerler tarafından incelenmesi sonucunda 16 farklı yeni element keşfedilmiştir. Bu kimyagerlerden biri olan Mosander uzun ve karmaşık çalışmalarının ardından gadoliniti; yttria (beyaz itriyum oksit), terbia (gül renkli erbiyum oksit) ve erbia (sarı terbiyum oksit) olmak üzere üç bölüme ayırdı ve erbiyum okside "terbia" adını verdi. 1877 yılında terbia adı, nadir toprak elementleri arasındaki benzerlik ve karışıklık sebebiyle erbia olarak değiştirildi. Tulia, erbia, itterbia ve holmia adlı oksitlerden oluşan erbia, George Urbain ve Charles James tarafından 1905 yılında oldukça saf erbiyum oksit olarak ayırıldı. 1934 yılında ise Wilhelm Klemm ve Heinrich Bommer, erbiyum klorürü potasyumla ısıtarak saf metal erbiyumu elde etti (Piguet, 2014; Dinér, 2016).

1.1.1. Erbiyumun Fiziksel ve Kimyasal Özellikleri

Erbium, periyodik cetvelde sembolü Er olan ve lantanitler grubunda konumlanan bir elementtir. Yerkürede en bol bulunan elementler arasında 44. sırada olan erbiyum saf olarak bulunmamaktadır ve diğer nadir toprak elementleri ile aynı özelliklerini sergilemektedir. Diğer nadir toprak elementleri ile kıyaslandığında korozyon direnci yüksektir. Erbiyum orta derecede reaktif ve hegzagonal kristal yapıya sahiptir. Yumuşak ve parlak bir element olan erbiyum çoğunlukla +3 değerlidir ve elektropozitifliği yüksektir. Saf erbiyum metali katı halde, kolay şekillendirilebilir, yumuşak ve diğer lantanitlerin aksine, havada hızlıca oksitlenmeden kararlılığını koruyabilmektedir. Günümüzde nadir toprak elementleri rahatlıkla ayrılabilir ve uygun bir maliyetle satın alınabilmektedir (Dinér, 2016). Erbiyum elementinin bazı özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1: Erbiyum Elementinin Bazı Özellikleri (Walters & Lusty, 2011; Celep & Deveci, 2021).

Atomik Özellikleri	
Atom Numarası	68

Atom Kütlesi ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	167,259
Atom Yarıçapı (pm)	175
Kristal Yapısı	Hegzagonal
Oksidasyon Düzeyleri	3
Elektron Alınganlığı	1,24
Fiziksel Özellikleri	
Erime Noktası	1802 K, 1529 C, 2784 F
Kaynama Noktası	3141 K, 2868 C, 5194 F
Buharlaştırma Isısı ($\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$)	280
Katı Haldeki Yoğunluk ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	9,066
Sıvı Haldeki Yoğunluk ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	8,86
Isı Kapasitesi ($\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	28,12
Çeşitli Özellikleri	
Elektriksel Özdirenci ($\mu\Omega \cdot \text{m}$)	0,860
Isısal İletkenliği ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	14,5
Isısal Genleşmesi ($\mu\Omega \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)	12,2
Brinell sertlik değeri (HB)	814

1.1.2. Erbiyumun Uygulama ve Kullanım Alanları

Erbiumun en önemli kullanım alanı medikal lazerler ve fiber optik kablolardır. Erbiyum metal olarak kullanım uygulamaları sınırlıdır. Bunun sebebi metalin havada kararması ve su ile tepkimeye girmesidir. Erbiyum, bazı alaşımlarda farklı elementler ile birleştiğinden farklı özellikler kazanmaktadır. Nikelle alaşımlandırıldığında yüksek manyetik özellikler kazanır. V ile birleştiğinde sertliğini kaybederek ve işlenebilir hale gelmektedir. Vanadyum ve titanyum ile alaşımları nükleer endüstride kullanılmaktadır. Alüminyum Er ile alaşımlandırıldığında tane boyutu azalır ve mukavemeti artar. Erbiyum medikal lazerler ve fiber optik kablolar dışında kızılötesi soğurma camı, fosforışıl maddeler, seramikler, fotografik filtreler, güneş gözlükleri, cam işleme ve kaynak gözlükleri gibi alanlarda da kullanılmaktadır (Balaram, 2019).

1.2. ALÜMİNYUM

Doğada, alüminyum yeryüzüne yakın, kırmızımsı, kil benzeri boksit birikintilerinde bulunmaktadır. Bu birikintilerde, alüminyum oksijen başta olmak üzere diğer elementlerle birleşmiş halde mevcuttur. Doğada bulunan 92 element arasında, alüminyum %8 oranı ile en çok bulunan üçüncü elementtir (Tokatlı vd., 2022). Alüminyumun kimyasal olarak aşırı

reaksiyona girebilme kabiliyeti, çeşitli şekillerde görülmesine olanak tanımaktadır. Bu özellik, alüminyumun çeşitli endüstriyel uygulamalar için kullanılmasına olanak tanımaktadır (Shakhashiri, 2000). Alüminyum, metalik formunda bulunması nadir olduğu için ilk zamanlar değerli bir metal olarak kabul edilmiştir. Bunun nedeni, alüminyumun doğada metal olarak bulunmamasıdır. Alüminyum, kimyasal aktivitesi ve oksijene olan ilgisi nedeniyle diğer elementlerle, özellikle alüminyum oksit gibi bileşikler halde bulunur. Ayrıca, alüminyum oksit olan korindon, dünyada doğal olarak oluşan elmadan sonraki en sert maddedir (Kissell, 1996).

Alüminyum, metalürjik özellikleri ve geniş endüstriyel kullanımıyla dikkat çeken bir malzemedir. Özellikle hafif olması, yüksek mukavemeti, düşük yoğunluğu, işlenebilirliği ve korozyon direnci gibi hayati niteliklere sahip olmaları, birçok sektörde tercih edilmesini sağlar. Bu özellikleri, alüminyumun mühendislik uygulamalarında, özellikle otomotiv ve havacılık endüstrisinde, oldukça yaygın olarak kullanılmasına olanak tanımaktadır. Bu endüstrilerde, alüminyumun hafifliği, araçların ve uçakların daha az yakıt tüketmelerini ve daha az emisyon yapmalarını sağlamaktadır (Sharma & Dwivedi, 2005). Aynı zamanda, yüksek mukavemeti sayesinde, alüminyum araçların ve uçakların güvenliğini arttırmaktadır. Alüminyumun yüksek korozyon direncine sahip olması, bu metalin sualtı uygulamaları, nükleer enerji ve gıda endüstrisi gibi çeşitli alanlarda da kullanılmasına olanak tanımaktadır. Alüminyum, demir ve çelikten sonra, son zamanlarda en yaygın kullanılan metaller arasında hızla yükseliş göstermiştir. Alüminyumun üstün özellikleri nedeniyle, giderek daha fazla endüstri tarafından tercih edilmektedir (Epstein vd., 1994).

Alüminyum endüstrisi, temel olarak birincil ve ikincil üretim süreçleri olmak üzere iki ana kategoriye ayrılır. Birincil alüminyum, doğadan bulunan boksit cevherlerine uygulanan Bayer prosesi ile elde edilmektedir. Bu işlem, cevherlerin kimyasal olarak işlenmesi sonucu ham alüminyum elde etmeyi sağlamaktadır. Bu işlem sırasında, çok yüksek enerji gereksinimi meydana gelmekte ve olumsuz çevresel etkileri olan bir işlemdir. Bu nedenle, birincil alüminyum üretiminde sürdürülebilirlik ve çevre dostu üretim yöntemlerine önem verilmektedir (Totten & MacKenzie, 2003). İkincil alüminyum ise, birincil alüminyumun kullanım dışı kalan hurda alüminyumdan elde edilir. İkincil alüminyum elde etmek için, daha düşük enerji gereksinimi olduğundan çevresel etkileri azdır. Alüminyum, geri dönüşüm açısından oldukça verimli bir metal olup, geri dönüştürülmüş hali birincil alüminyuma kıyasla çok daha az enerji gerektirmektedir. Bu nedenle, alüminyum endüstrisinde, geri dönüşüm ve yeniden kullanma teknolojileri giderek gelişmektedir. Bu teknolojilerin geliştirilmesi, alüminyumun sürdürülebilir bir şekilde üretilmesine ve kullanılmasına olanak tanımaktadır (Car, 2019).

1.3. ALAŞIMLAMA

Alaşıım, iki veya daha fazla metalin, metal veya ametal ile birleştirilmesi sonucu elde edilen metal niteliğindeki maddelere verilen isimdir. Alaşıımların oluşumunda, saf halde bulunan metallerin özelliklerinin değıştirilmesi, üstün düzeye taşınması ve yeni özellikler kazandırılması amaçlanır. Alüminyum alaşıımları, alüminyumun özelliklerini değıştirerek, termal, elektriksel, mekanik ve kimyasal özellikleri arasında bir denge oluşturmak için oluşturulmaktadır. Alüminyum alaşıımları, özellikle otomotiv, havacılık, elektronik, endüstriyel uygulamalar, gibi çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır. Alüminyum alaşıımlarının yüksek çekme dayanımı, özellikle hava taşımacılığı endüstrisinde önemlidir (Kaufman & Rooy, 2004). Aynı zamanda, alüminyum alaşıımlarının yüksek ısı direnci, endüstriyel uygulamalarda gereklilik arz etmektedir. Alüminyumun alaşıımlandırılması, ayrıca alüminyumun korozyona karşı dayanıklılığını arttırmaktadır. Bu nedenle, alüminyum alaşıımlarının özellikleri, alaşıım elementlerine göre değışmektedir. Alüminyum genellikle saf olarak kullanılmaz. Alüminyumun alaşıımlandırıldığında çekme dayanımı 49 MPa' dan 700 MPa' a kadar çıkar. Alüminyuma en sık eklenen alaşıım elementleri arasında Zn, Cu, Mn, Si ve Mg gibi elementler bulunmaktadır. Alaşıımların oluşturulması, metalurji alanında önemli bir süreçtir ve çeşitli tekniklerle gerçekleştirilmektedir. Bu teknikler arasında en önemli yöntemlerden biri olan ergitme tekniğidir (Alım, 2017).

1.4. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARIN SINIFLANDIRILMASI

Alüminyum alaşıımları, üretim tekniklerine bağılı olarak dövme ve döküm alaşıımları olarak iki ana kategoriye ayrılmaktadır. Her iki grup da bileşim açısından benzerlikler gösterse de, uygulama yöntemleri ve sonuçları bakımından belirgin farklılıklar sergilemektedir. Alüminyum alaşıımlarının sertlik kazanması ve belirli istenilen özelliklere ulaşabilmesi, alaşıım elementlerinin ilavesi ve çeşitli ısıl işlemlerle sağlanır. Dövme alaşıımlarında, deformasyon sertleşmesi önemli bir rol oynarken, döküm alaşıımlarında bu etki daha az belirgindir. Bu nedenle, alaşıım elementlerinin seçimi ve eklenme yöntemleri, döküm ve dövme alaşıımları arasında farklılık gösterir. Isıl işlemler ve alaşıım elementlerinin doğru kombinasyonları ile alüminyum alaşıımlarının mekanik özellikleri optimize edilir, bu da geniş bir endüstriyel uygulama yelpazesine olanak tanır. Bu teknikler, özellikle yüksek mukavemet, korozyon direnci ve işlenebilirlik gerektiren uygulamalarda kritik öneme sahiptir (Kaufman & Rooy, 2004).

1.4.1. Dövm Alüminyum

Dövm alaşımları, yüksek plastik deformasyon kabiliyeti sayesinde kolayca şekillendirilebilme özelliğine sahiptir. Dövm alaşımlar genellikle sürekli döküm yöntemiyle blok halinde üretilir ve ardından homojenleştirme tavı uygulanarak ekstrüzyon veya haddeleme işlemleri ile istenen formda şekillendirilir. Dövm alaşımlarının ısı işlem uygulanabilirliği, onları çeşitli endüstriyel uygulamalar için ideal kılar. Özellikle yüksek sıcaklıklarda işleme dayanıklılıkları sayesinde otomotiv ve havacılık sektörlerinde geniş bir kullanım alanı bulurlar. Yüksek mekanik özellikleri, bu alaşımların hassas parça üretiminde ve endüstriyel ürünlerde tercih edilmesini sağlar. Tablo 2’de görüldüğü üzere dövm alaşımları, dört basamaklı bir numaralandırma sistemi ile sınıflandırılır; bu sistemde ilk rakam temel alaşım elementini belirtir. İkinci rakam, alaşımın modifikasyonunu ifade eder ve ikinci rakam sıfırsa alaşımın orijinal olduğunu gösterir. 1 ile 9 arasındaki rakamlar, alaşımdaki değişiklikleri tanımlar. Son iki rakam ise farklı alüminyum alaşımlarını ayırt etmek için kullanılır. Bu sistematik yaklaşım, dövm alaşımlarının özelliklerinin ve kullanım alanlarının net bir şekilde anlaşılmasını sağlar. (Al-Saadi & Tunay 2017).

Tablo 2: Dövm Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması (Savaş, 2005).

Alaşım	Açıklama
1xxx	%99'un üzerinde saf alüminyum.
2xxx	Bakır ana alaşım elementi olarak kullanılır, ayrıca magnezyum gibi diğer elementler de bulunabilir.
3xxx	Ana alaşım elementi mangan olan alüminyum alaşımları.
4xxx	Ana alaşım elementi silisyum olan alüminyum alaşımları.
5xxx	Ana alaşım elementi magnezyum olan alüminyum alaşımları.
6xxx	Magnezyum ve silisyum başlıca alaşım elementleridir.
7xxx	Ana alaşım elementi çinko olup, bakır, magnezyum, krom ve zirkonyum gibi elementler de içerebilir.
8xxx	Kalay ve bazen lityum içeren alüminyum alaşımları.
9xxx	Gelecekte kullanılmak üzere ayrılmış seriler.

1.4.2. Döküm Alüminyum

Döküm, bir kalıp kullanılarak istenilen şeklin elde edilmesi ve bu kalıbın içini dolduran sıvı metalin katılaşarak kalıp şeklini alması sürecidir. Metalürjide döküm, metal ve alaşımların ticari değer gözetilerek çeşitli proseslerle ergitilmesi ve sonrasında kum kalıp, alçı kalıp, kokil kalıp, basınçlı döküm ve hassas döküm gibi yöntemlerle son şekillerinin verilmesiyle

gerçekleştirilir. Alüminyum ve alaşımlarının döküm sürecinde kullanılan bu yöntemler, malzemenin istenilen mekanik ve fiziksel özellikleri kazanmasını sağlar. Bu alaşımların döküm sınıflandırmasında ise, Tablo 3'te gösterildiği üzere, üç basamaklı bir kodlama sistemi kullanılmaktadır. Bu sistemin sonunda ondalık bir noktalama ile ayrılan dört rakam bulunur. Bu kodlama, döküm alaşımlarının özelliklerinin ve kompozisyonlarının belirlenmesinde kritik bir rol oynar, böylece endüstride farklı uygulamalara uygun malzemelerin seçimi ve kullanımı kolaylaştırılır. (Al-Saadi & Tunay, 2017).

Tablo 3: Dökme Alüminyum Alaşımlarının Sınıflandırılması (Al-Saadi & Tunay, 2017).

Alaşım	Ana alaşım elementi
1xx.x	Saf Alüminyum (%99 dan fazla Al içeren alaşımlar)
2xx.x	Bakır (Başlıca alaşım elementi)
3xx.x	Silisyum, bakır ve /veya magnezyum ile.
4xx.x	Silisyum
5xx.x	Magnezyum
7xx.x	Çinko
8xx.x	Kalay
9xx.x	Diğer Elementler
6xx.x	Kullanılmayan seri

1.5. ALÜMİNYUM VE ALAŞIMLARININ ÖZELLİKLERİ

Alüminyum, metalürji alanında yaygın olarak kullanılan bir malzeme olarak bilinmektedir. Alüminyumun yüksek mukavemeti ve hafifliği, yoğunluğu ve dayanıklılığı ile öne çıkar. Yoğunluğu $2,70 \text{ gr/cm}^3$ olan alüminyum, çelikten üç kat daha hafiftir ve yüksek mukavemetli alaşımlarında çekme mukavemeti 700 MPa'ya kadar çıkabilir. Bu özellikler, alüminyum alaşımlarının ulaşım araçları ve taşınabilir yapılar gibi çeşitli alanlarda kullanımını mümkün kılar (Kissell, 1996).

Alüminyumun imalat ve şekillenme kolaylığı, mühendislik uygulamalarında tercih edilmesinde önemli bir rol oynar. Bu metal, ekstrüzyon, bükme, haddelme, çekme, dövme, döküm ve işleme gibi birçok yöntemle şekillendirilebilir. Saf alüminyumun yumuşak olması, kolayca preslenebilmesini ve kalıplandırılabilmesini sağlar. Ekstrüzyon yöntemi, alüminyumun karmaşık kesitlere sahip parçalar üretmesine olanak tanır (Kissell, 1996).

Alüminyumun korozyon direnci, yüzeyinde oluşan ince ve sıkı alüminyum oksit tabakasından kaynaklanır. Bu tabaka, metalin daha fazla oksidasyonunu önleyerek yüksek korozyon mukavemeti sağlar. Alüminyumun korozyona karşı yüksek direnci, çevre şartlarına

dayanıklı olmasını ve uzun vadeli kullanımlarda ideal bir seçenek olmasını sağlar (Karakışlak, 1992).

Alüminyumun yüksek elektriksel iletkenliği, bu metali elektrik endüstrisinde vazgeçilmez kılar. Alüminyumun elektrik iletkenliği, tavllanmış bakırın iki katı kadar yüksektir ve düşük özkütlesi nedeniyle verimli enerji transferi sağlar. Alüminyum teller, elektrik iletim hatları ve trafolar gibi güç dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılır (European Aluminium Association, 1994).

Termal iletkenliği de alüminyumun önemli özelliklerinden biridir. Isıyı ileten malzeme olarak, özellikle otomotiv sektöründe kullanılan pistonlar, piston başlıkları ve otomobil radyatörleri gibi yerlerde ısının hızlı iletilmesini sağlar. Alüminyum alaşımlarının ısı iletkenliği, içerisindeki saf alüminyum miktarına bağlı olarak değişir (Karakışlak, 1992).

Alüminyumun yansıtma özelliği, onu ışıma enerjisi için mükemmel bir yansıtıcı malzeme yapar. Yüzeyine düşen ışığın %75'ini, ısı ve radyasyonun %90'ını geri yansıtarak düşük emisyonlu bir malzeme olduğunu gösterir. Bu özellikleri, alüminyumun reflektör ve yalıtım malzemesi olarak kullanılmasını sağlar (European Aluminium Association, 1994).

Son olarak, alüminyum toksisite içermemesi ve geri dönüşüm özelliği ile ekolojik olarak uyumlu bir materyaldir. Geri dönüşüm sürecinde enerji maliyetleri düşüktür ve geri dönüştürülen alüminyum, boksit içerikli alüminyuma göre yalnızca %5 oranında enerji gerektirir. Bu sebeple, geri dönüştürülen alüminyum, çeşitli sektörlerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Kissell, 1996).

1.6. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARININ AKICILIK VE HACİMSSEL ÇEKME ÖZELLİKLERİ

1.6.1. Akıcılık

Akıcılık, sıvı metallerin kalıp boşluklarını homojen ve tam olarak doldurmasını sağlayan bir özelliktir. Alüminyum alaşımları bu özelliğe sahip olmasına rağmen, bu özellik bir dereceye kadar zayıftır. Bununla birlikte, alaşımlama yöntemi alüminyum alaşımlarına daha yüksek bir akıcılık değeri kazandırabilir. Bu özelliğe sahip en yüksek malzemeler, ötektik bileşimler içeren alaşımlardır. Sıcaklığın, akıcılık üzerindeki etkisi oldukça önemlidir. Artan sıcaklıklar için, çeşitli kimyasal bileşimlere sahip olması fark etmeksizin, akıcılığın döküm sıcaklığıyla doğru orantılı olarak arttığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle, döküm sıcaklığının düzenli olarak kontrol edilmesi, akıcılığın optimal düzeyde olmasını sağlamak için gereklidir (Metals Handbook, 1989).

Sıvı metal içerisinde bulunan cüruf ve yabancı maddeler, sıvı metalin akıcılığını negatif yönde etkileyebilir. Bu tür maddelerin sıvı metalin içerisinde varlığı yüzeyinde bir kabuk benzeri zar şeklinde bir tabaka oluşturmaya neden olabilir. Bu tabaka, sıvı metalin akıcılığını azaltır ve ayrıca sıvı yüzeyinin büyüklüğü ile orantılı olarak artar. Tekrar ergitme işlemi sırasında, alüminyum miktarının artması sonucu, akıcılık azalabilir ve aynı zamanda alaşımın dokusunu bozarak mekanik özelliklerini düşürebilir. Akıcılığı etkileyen diğer bir faktör ise viskozitedir. Viskozite, bir sıvının yüzey gerilimine veya akıcılığa karşı olan direncini ifade eder (Metals Handbook, 1989).

Sıvı metalin akıcılık değerinin belirlenmesi için birçok farklı akışkanlık testi yapılmıştır. Bunlar arasında farklı sayıda kanallı akışkanlık test kalıbı, spiral akışkanlık test kalıbı gibi çeşitli test kalıpları bulunmaktadır. En yaygın olarak kullanılan test kalıbı ise spiral akıcılık test kalıbıdır. Kalıp içerisine dökülen sıvı metalin kanal içerisinde katılaşmasına kadar alabildiği yol, onun akıcılık değerini gösterir (Balaban vd., 2020).

Ancak, bu test yöntemleri, tekrarlanabilirlik sorunlarından dolayı eleştirilere neden olmaktadır. Metal akıcılığı, metalin kimyasal bileşimi ve katılaşma aralığı gibi değişkenlerin yanı sıra kalıp yapısı, kaplama ve termal iletkenlik gibi kalıp ve metal özelliklerini içeren bir dizi faktörden etkilenir. Bunların yanı sıra, süper ısı oksit içeriği gibi test sırasında etkileyebilecek diğer faktörler de rol oynayabilir. Bu nedenle, laboratuvar deneylerinde tüm bu faktörleri kontrol altında tutmak oldukça zor olabilir (Balaban vd., 2020).

1.6.2. Hacimsel Çekme

Alüminyum alaşımları, sıvı fazdan katı faza geçiş sürecinde hacimsel olarak kimyasal bileşimlerine bağlı olarak önemli oranda bir düşüş gösterirler. Bu düşüş oranı, %3,5 ila %8,5 arasında değişebilir ve diğer metal alaşımlarında olduğu gibi gerçekleşir (Tablo 4). Ancak alüminyum alaşımlarında bu özellik, diğer alaşımlardan fazladır ve bu nedenle daha fazla hacim küçülmesi oluşabilir (Sigworth, 1983).

Bu hacim küçülmesi; çarpılma, çatlama veya çöküntü gibi pek çok hata meydana getirebilmektedir. Ayrıca, alüminyumun düşük özgül ağırlığı, besleme zorluklarına da neden olabilir. Dolayısıyla, bu özellikler döküm sürecinde dikkate alınmalıdır (Sigworth, 1983).

Bu nedenle, alüminyum alaşımlarının sıvı fazdan katı faza geçişinde hacimsel değişim önemlidir ve döküm sırasında uygun şekilde yönetilmelidir. Bunu sağlamak için, alaşımların kimyasal bileşimleri ve bu bileşimlerin hacimsel değişimleri göz önünde bulundurularak, döküm süreci optimize edilmelidir. Bu şekilde, alüminyum alaşımlarının kalitesi ve performansı artırılabilir (Anson & Gruzleski, 1999).

Hücre içi boşluklar, çekirdek bölgesinde yer alan çekintiler, dentritik kollar arasındaki küçük boşluklar ve dağılmış gözenekler şeklinde uzantısal bir yapıya sahip olabilirler. Çekinti boşluklarının azaltılması için tane inceltme ve modifikasyon prosedürlerinin yanı sıra eriyiğin temizlenmesi gerekmektedir. Laboratuvar koşullarında yapılan araştırmalar, çekme porozitesinin şeklinin düzensiz ve salkımlı olduğunu göstermektedir (Anson & Gruzleski, 1999).

Tablo 4: Döküm Alaşımlarının Hacimsel Çekme Yüzdeleri (Anson & Gruzleski, 1999).

Döküm Alaşımı	Hacimsel Çekme (%)
Çelik	6
Bronz	7,5
Dövülebilir dökme demir	5
Pirinç	6,5
Alüminyum	8
Al-Si12	3,5
Al-Cu4Ni2Mg	5,3
Al-Si10	5
Al-Si5Cu2Mg	4,2
Al-Mg5Si	6,7
Al-Si9Mg	3,4
Al-Si7NiMg	4,5
Al-Cu5	6

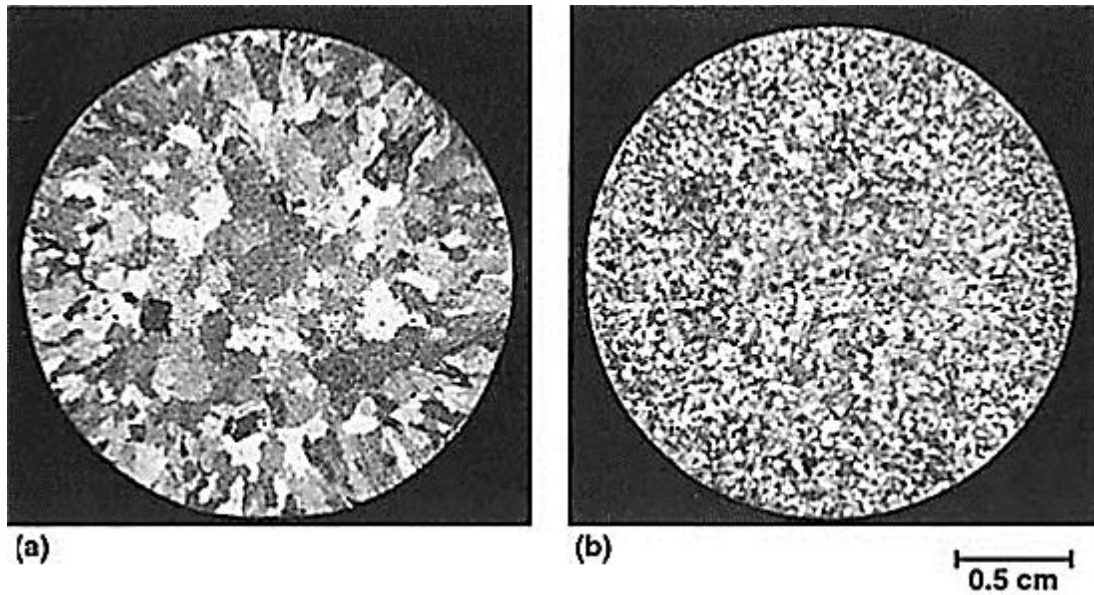
1.7. ALÜMİNYUM ALAŞIMLARINDA TANE İNCELTME

Alüminyum alaşımları, çeşitli endüstrilerde kullanılan hafif ve dayanıklı malzemelerdir. Bu malzemelerin özellikleri, tane boyutu ve tane sınırı özelliklerine bağlıdır. Tane boyutu azaldıkça, yüzey alanı artar ve tane-sınır bileşenleri daha homojen bir dağılım gösterir. Bu da malzemenin mukavemet, süneklik ve homojenliği gibi mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu nedenle, alüminyum alaşımlarındaki tane boyutunun kontrol edilmesi çok önemlidir (Kaufman & Rooy, 2004).

Tane inceltme işlemi, alüminyum alaşımlarındaki tane boyutunu azaltmak için kullanılır. Bu işlem, ergimiş alaşıma tane incelticiler eklenerek yapılır. Tane incelticiler, çoğunlukla titanyum ve bor gibi elementlerdir. Titanyum, alaşımdaki tane boyutunu azaltmak için en yaygın kullanılan tane incelticidir. Bor ise titanyumla birlikte kullanıldığında daha ince tanelerin oluşumunu sağlar (Adams, 1998).

Alaşımlardaki tane boyutu ve türü, alaşımların kompozisyonu, katılaşma hızı ve tane çekirdeklenme alanlarının yoğunluğuna bağlıdır. Tane sayısını artırmak amacıyla ergimiş alüminyum alaşımlarına belirli elementler eklenir. En sık kullanılan tane inceltici elementler arasında titanyum ve bor bulunmaktadır. Alüminyum-titanyum alaşımlarında genellikle %3 ila %10 arasında titanyum bulunur. Titanyumun alaşıma eklenmesi, çekirdeklenme ve tane boyutunun kontrolünde etkin bir rol oynar. Titanyum, yüksek yoğunluklu çekirdeklenme bölgeleri oluşturarak bu bölgelerde ince ve eş eksenli tanelerin oluşmasını sağlar. Bunun sonucunda, alaşımların mukavemeti ve sünekliği artar. Titanyum, tek başına alaşıma %0,02-0,15 arasında ilave edilebilir; ancak titanyumun etkisi yaklaşık 40 dakika içerisinde azalır (Brown, 1999; Kaufman & Rooy, 2004).

Sonuç olarak, tane inceltme, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini geliştirmek için önemli bir işlemdir. Bu işlem, alaşıma tane incelticileri ilave edilerek gerçekleştirilir ve tane boyutu, alaşım kompozisyonu, döküm sıcaklığı ve kalıp sıcaklığı gibi parametrelere bağlıdır. Tane inceltme, alaşımların mukavemeti, sünekliği, homojenliği ve katılaşma sırasında beslemeyi geliştirmek için kullanılır. Bu süreçlerin doğru yönetilmesi, alüminyum alaşımlarının performansını artırarak, mikro yapısal özelliklerini optimize eder, onların dayanıklılık ve işlenebilirliklerini iyileştirir (Cook, 1998; Kaufman & Rooy, 2004). Tane incelticinin kullanımının yapıya etkisi Şekil 1’de gösterilmiştir.



Şekil 1: Tane İncelticinin Etkisi a) Tane inceltici ilavesiz b) Tane inceltici ilaveli (Kaufman & Rooy,2004)

1.8. ALAŞIM ELEMENTLERİNİN ALÜMİNYUM ALAŞIMINA ETKİSİ

Alüminyum alaşımları, geniş endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılan çeşitli alaşım elementleri içermektedir. Bu elementler arasında başlıca yer alanlar bakır, çinko, demir, magnezyum, manganez, nikel, silisyum, sodyum ve titanyumdur. Her bir element, alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini, işlenebilirliğini ve kimyasal dayanıklılığını belirgin bir şekilde etkileyebilir. Bu elementlerin dengeli bir şekilde kullanılması, alüminyum alaşımlarının istenen özelliklerde ve çeşitli endüstriyel gereksinimlere uygun olarak tasarlanmasını sağlar. Alüminyuma katılan en önemli alaşım elementlerinin etkileri Tablo 5’te verilmektedir (Alım, 2017).

Tablo 5: Alüminyuma Katılan En Önemli Alaşım Elementlerinin Etkileri (Alım, 2017).

Alaşım elementleri	Alüminyuma etkileri
Çinko (Zn)	Alaşıma yüksek mukavemet ve sertlik kazandırır.
Bakır (Cu)	Isıl işlemle güçlenme yeteneği sağlar, alaşımın sağlamlık ve sertliğini artırır, ancak korozyon direncini düşürür.
Manganez (Mn)	Akma ve gerilme mukavemetini artırır, ayrıca korozyon direncini iyileştirir.
Silisyum (Si)	Magnezyum ile kullanıldığında ısıl işlemle güçlenme özelliği kazandırır, korozyon direncini artırır.
Magnezyum (Mg)	Alaşıma yüksek mukavemet ve sertlik kazandırır, korozyon direncini ve kaynak kabiliyetini artırır.

1.8.1. Bakırın Etkisi

Bakır elementi, alüminyum alaşımlarında önemli bir rol oynar, çünkü bu element, alaşımların mukavemetini ve sertliğini artırırken, döküm özelliklerini de geliştirir. Bakırın ağırlıkça %4-%5,5 oranında ilave edildiği alüminyum alaşımları, ısıl işlem uygulamaları için optimum performans gösterir. Ancak, bu faydalarına rağmen, bakırın korozyon direncini düşürdüğü bilinmektedir. Özellikle, gerilme korozyonuna karşı duyarlılığı artırabilir, bu yüzden belirli alaşımlarda bakır oranı düşük tutulur. Örneğin, alüminyum ve çinko alaşımlarında bakır konsantrasyonunun düşük seviyede tutulması, stres korozyonunu önlemek için gereklidir (Kaufman & Rooy, 2004).

1.8.2. Çinkonun Etkisi

Çinko elementi, alüminyum alaşımlarında çekme mukavemetini, haddelenebilme ve işlenebilme kabiliyetini artırır. Magnezyum ile birlikte kullanıldığında, yüksek darbe

mukavemeti sağlar ve Al-Si alaşımlarında çökeltme sertleşmesi yoluyla aşınma direncini artırır (Torabian vd.,1994).

1.8.3. Demirin Etkisi

Demir elementi, alüminyum alaşımlarına eklendiğinde, sıcak yırtılma direncini artırarak lehimleme eğilimini azaltır. Ancak, demirin artan oranları alaşımların esnekliğini önemli ölçüde azaltabilir ve mikro yapıda çözünmeyen intermetalik fazların oluşumuna yol açar. Bu intermetalik fazlar, özellikle yüksek sıcaklık koşullarında, alaşımların gevrekleşmesine neden olabilir. Demirin varlığı, Al-Si alaşımlarında mekanik özelliklere olumsuz etki yapar ve yüksek silisyum içeren alaşımlarda kaba ve gevrek bir yapıya yol açar. Bu nedenle, bu tür alaşımlarda demir oranının düşük tutulması tercih edilir. Demir, tane küçültücü etkisi sayesinde bazı alüminyum alaşımlarında yüksek sıcaklık mukavemetini artırır, ancak döküm esnasında besleme ve akışkanlığı olumsuz etkileyebilir. Bu özellikler, demirin alüminyum alaşımlarındaki kullanımının dikkatle yönetilmesi gerektiğini göstermektedir (Turhan, 2002; Kaufman & Rooy, 2004).

1.8.4. Magnezyumun Etkisi

Magnezyum, alüminyuma ilave edildiğinde yüksek mukavemet ve mükemmel korozyon direnci sağlar, kaynak kabiliyetini artırır ve ötektik altı Al-Si alaşımlarında demirin olumsuz etkilerini azaltır. Bu element, Al-Si alaşımlarının ısıtılma işlemle sertleşebilmesini sağlamaktadır. Mekanik mukavemeti ve aşınma direncini artırırken sünekliği bir miktar azaltabilmektedir. Bu özellikler, magnezyumun alüminyum alaşımlarında dikkatle yönetilmesi gereken değerli bir bileşen olduğunu gösterir (Turhan, 2002).

1.8.5. Manganın Etkisi

Mangan elementi, alüminyum alaşımlarında genellikle düşük miktarlarda bulunur, çünkü fazla miktarlarda kirlilik kaynağı olarak görülür. Ancak, uygun miktarda eklendiğinde, Mn alüminyum alaşımlarının çekme mukavemetini artırır ve yeniden kristalleşme sıcaklığını, korozyon direncine zarar vermeden 50-60°C kadar yükseltir. Bu element, Al-Si alaşımlarında demirin mekanik ve fiziksel özellikler üzerindeki olumsuz etkilerini azaltarak mekanik mukavemeti ve korozyon direncini iyileştirir. Mn, sıvı alüminyum alaşımlarında uygun pekleşme sağlandığında, döküm alaşımlarına olumlu katkılar sunar. Bu özellikler, Mn'nin dikkatli bir şekilde yönetilmesi gerektiğini ve alüminyum alaşımlarında stratejik bir bileşen olarak değerlendirildiğini göstermektedir (Kaufman & Rooy, 2004; Töre, 2012).

1.8.6. Nikelin Etkisi

Nikel elementi, alüminyum alaşımlarında yüksek sıcaklık mukavemeti ve boyutsal kararlılık sağlamak için sıklıkla bakır ile birlikte kullanılır. Bu kombinasyon, alaşımların termal genleşme katsayısını azaltarak yüksek sıcaklıklarda daha stabil performans sergilemelerine yardımcı olur. Nikel ilavesi, Al-Si alaşımlarında da yüksek aşınma direnci ve düşük termal genleşme katsayısı sağlar. Bu özellikler, nikelin alüminyum alaşımlarında yüksek sıcaklık uygulamaları için ideal bir bileşen olduğunu ve mekanik dayanım ile boyutsal kararlılığı artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir (Turhan, 2002; Kaufman & Rooy, 2004).

1.8.7. Silisyumun Etkisi

Silisyum elementi, alüminyum alaşımlarında döküm özelliklerini iyileştirerek akışkanlığı artırır ve sıcak yırtılma direncini güçlendirir. Silisyumun eklenmesi, alaşımların besleme özelliklerini de olumlu etkiler ve bu nedenle sıvı alüminyum döküm işlemlerinde yaygın olarak tercih edilir. Silisyum, alüminyum alaşımlarında özgül ağırlığı ve ısıl genleşme katsayısını azaltarak, daha hafif ve termal olarak daha kararlı malzemeler elde edilmesine yardımcı olur. Ayrıca, silisyum ilavesi, alaşımların korozyon direncini, kaynak kabiliyetini ve tane boyutu küçültme yeteneğini artırır. Bununla birlikte, talaş kaldırma işlemlerinde zorluklara neden olabilir. Silisyumun mekanik özelliklere katkısı, bileşimindeki fazların şekil ve dağılımına bağlıdır. Küçük ve yuvarlak primer fazlar yüksek mukavemet sağlarken, iğne şeklindeki fazlar çekme mukavemetini artırsa da süneklik ve darbe dayanımını azaltabilir. Bu özellikler, silisyumun alüminyum alaşımlarında dikkatle yönetilmesi gereken bir bileşen olduğunu göstermektedir (Turhan, 2002; Kaufman & Rooy, 2004).

1.8.8. Sodyumun Etkisi

Sodyum elementi, alüminyum ve silisyum alaşımlarında ötektiği modifiye etme kapasitesiyle bilinir. Bu element, alüminyum alaşımlarında yüzey gerilimini artırarak ötektik yapıyı değiştirir. Farklı ilave yöntemlerine göre hidrojen miktarı da kontrol edilebilir. Sodyumun alaşımlarla oluşturduğu bileşimler, ötektik modifikasyonun etkinliğini azaltabilir; özellikle fosfor ile birleştğinde silisyum fazındaki etkisini de düşürür. Al-Si alaşımlarında ise %0,001 ile %0,003 oranlarında sodyum ilavesi, ötektik veya ötektik altı yapıların modifiye edilmesine olanak tanır. Ancak yüksek sıcaklıkta işlenen Al-Mg alaşımlarında yüksek miktarlarda magnezyumun varlığı durumunda sodyumun kullanımı çatlak oluşumuna ve gevreklik sorunlarına yol açabilir. Bu nedenle sodyumun alaşımlara ilavesi, özenle kontrol edilmeli ve alaşımların özellikleri dikkate alınarak uygulanmalıdır (Turhan, 2002; Kaufman & Rooy, 2004).

İKİNCİ BÖLÜM

2. MATERYAL METOT

Bu bölümde, tezin kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ayrıntılı bir şekilde açıklanmaktadır. Deneysel çalışmalar “Deney Parametreleri ve Yöntem”, “Kalıp Hazırlığı ve Ön Isıtma İşlemi”, “Ergitme İşlemi ve Döküm Süreci”, “Dökümlerin İncelenmesi ve Testler” başlıkları altında değerlendirilmiştir.

2.1. DENEY PARAMETRELERİ VE YÖNTEM

Bu çalışmada, A356 alüminyum döküm alaşımı ilavesiz ve %0,03, %0,06 ve %0,1 oranlarında Erbiyum (Er) ilavesi yapılarak dökümler gerçekleştirilmiştir. Döküm sonrasında, azaltılmış basınç testi (RPT) ve K-mold kalıbıyla sıvı metalin temizlik seviyesi belirlenmiştir. RPT yöntemiyle elde edilen numuneler, Arşimet prensibi kullanılarak yoğunluk testine tabi tutulmuştur. Ergimiş alüminyumun akıcılığı, dört kanallı akıcılık testi ve spiral akışkanlık testi yöntemleriyle incelenmiştir. Alüminyum numunelerin mekanik özellikleri ise çekme ve sertlik testleri kullanılarak belirlenmiştir. Son olarak, metalografik çalışmalar yapılarak numunelerin mikro yapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, A356 alüminyum alaşımının döküm özelliklerinin farklı kokil kalıplara dökülerek incelenmesini amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda özel olarak tasarlanmış kokil kalıplar kullanılmıştır. Bu kokil kalıplara yapılan dökümler, A356 alüminyum alaşımında Er ilavesinin etkilerini araştırmak için gerçekleştirilmiştir. Kullanılan deney parametreleri Tablo 6’da yer almaktadır.

Tablo 6: Deney Parametreleri

Deney No	İlave Miktarı	Döküm Sıcaklığı	Kalıp Sıcaklığı	RPT Kalıbı	Mekanik Test Kalıbı	Dört Kanallı Akıcılık Kalıbı	Spiral Akıcılık Kalıbı	K-Mold Kalıbı	Basamak Kalıbı
1	İlavesiz A356	700°C	250°C	*	*	*	*	*	*
2	%0,03 Er	700°C	250°C	*	*	*	*	*	*
3	%0,06 Er	700°C	250°C	*	*	*	*	*	*
4	%0,1 Er	700°C	250°C	*	*	*	*	*	*

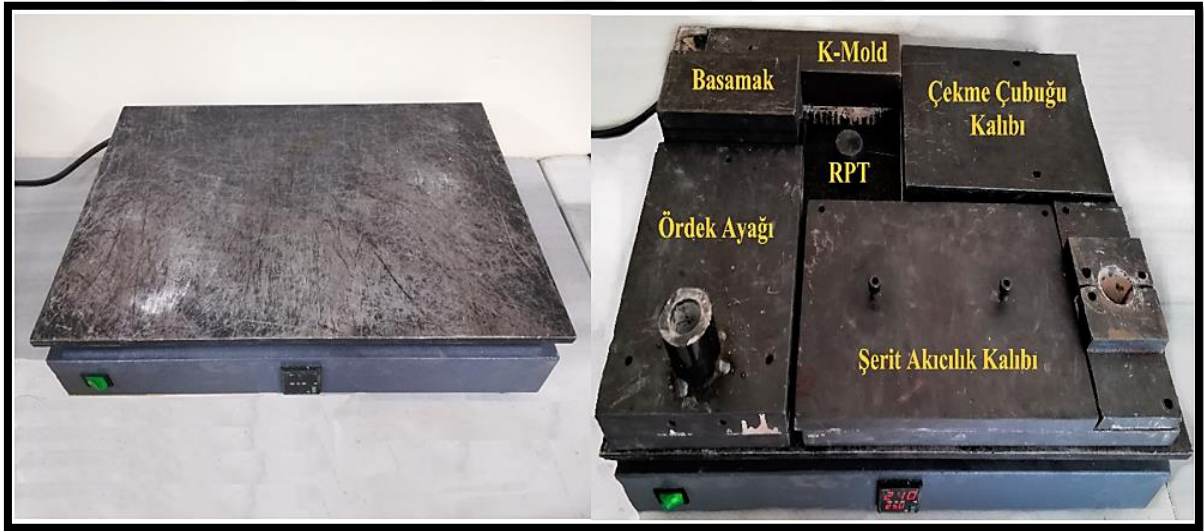
2.2. KALIP HAZIRLIĞI VE ÖN ISITMA İŞLEMİ

Döküm işleminin başarılı bir şekilde tamamlanabilmesi için, kokil kalıplardan numunelerin zarar görmeden ve kolaylıkla çıkarılması son derece önemlidir. Aksi takdirde, döküm parçasının kalıptan çıkarılması esnasında uygulanan kuvvet, hem kalıba hem de parçaya zarar verebilir. Bu nedenle, döküm öncesi kokil kalıplara, döküm parçalarının hatasız bir

şekilde çıkarılmasını sağlamak ve kalıp ömrünü uzatmak amacıyla kalıp ayırıcı bor nitrür gibi özel kaplamalar uygulanmıştır. Bu uygulamalar, döküm işleminin verimliliğini artırarak ürün kalitesini maksimum seviyede tutmaya yardımcı olmaktadır.

Sıvı alüminyumun kalıba yapışmadan katılaşıp kalıbın şeklini alabilmesi için, kalıplara ön ısıtma işlemi uygulanması gerekmektedir. Ayrıca, kokil kalıp yüzeyindeki nemin atılması ve alüminyumun kalıp içerisinde rahat hareket edebilmesi için de bu işlem yapılmalıdır. Metal kalıpların ısıtma işlemi, Elektromag M 4060 marka ısıtıcı tablalar ile gerçekleştirilmiştir. Bu ısıtıcı tablalar, Şekil 2’de görülen 40x60 cm ebatlarına sahiptir ve 50°C ila 300°C arasında ısı kontrolü sağlamaktadır.

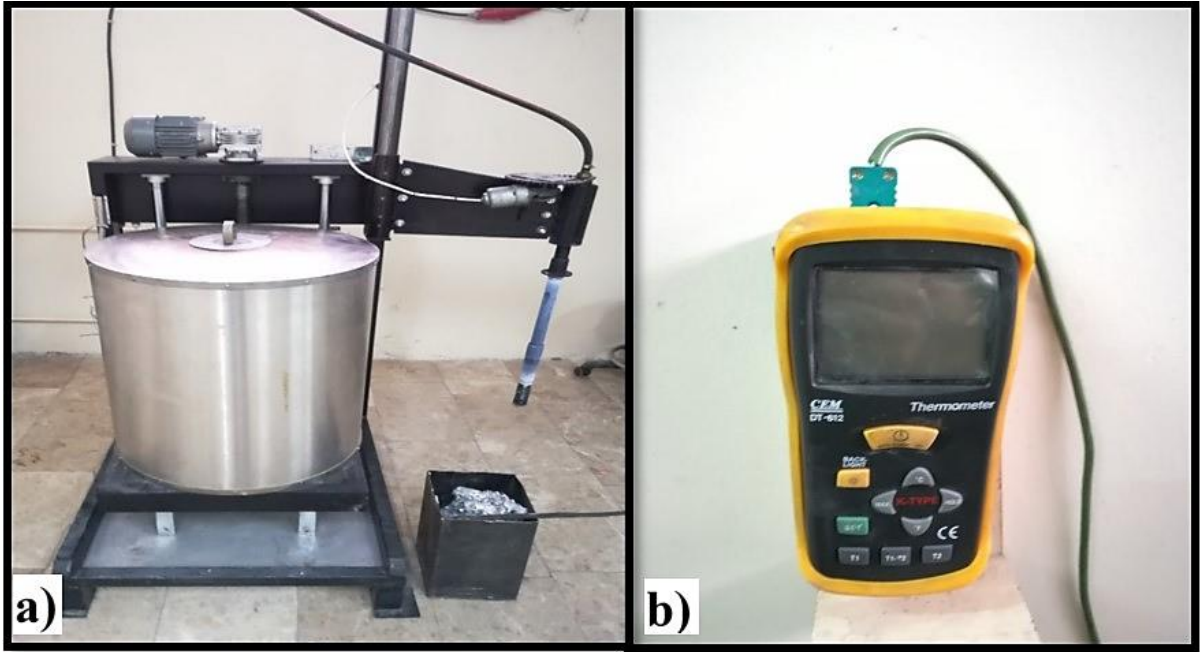
Döküm öncesi, kokil kalıplar ısıtıcı tablalar ile 250 °C’ye kadar ısıtılmış ve döküme hazır hale getirilmiştir. Bu sayede, döküm sonrası numunelerin kolaylıkla çıkartılması sağlanmış ve kalıp ömrü ile elde edilen ürün kalitesi korunmuştur.



Şekil 2: Isıtıcı Tabla ve Kalıpların Isıtılması

2.3. ERGİTME İŞLEMİ VE DÖKÜM SÜRECİ

Ergitme işlemi, deneysel çalışmanın temel aşamasını oluşturmakta ve sonuçların güvenilirliğini sağlamak için kritik bir rol oynamaktadır. Ergitme işlemi, 8 kg kapasiteli çan tipi elektrik direnç ocağı içinde gerçekleştirilmiştir. Bu ocağın içinde, yüksek kaliteli silisyum karbür (SiC) malzemeden üretilmiş bir pota bulunmaktadır. K tipi termokopul ve elektronik kontaktör termostat donanımına sahip elektrik direnç ocağı, sıcaklığı hassas bir şekilde kontrol etmeyi mümkün kılmaktadır. Ayrıca, ocak astarı, yüksek termal izolasyon özelliklerine sahip kalsiyum oksit türü dökme astar malzemelerle kaplanmıştır. Sıvı metal temizleme işlemleri için bir grafit lansın gireceği genişlikte bir delik de bulunmaktadır. Şekil 3’te gösterilen ocağın kullanımı ile alüminyum ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3: a) Çan Tipi Ergitme Ocağı (Elektrik Direnç Ocağı) b) K Tipi Termokopul

Ergitme işlemi için ilk adım olarak, %100 birincil A356 alüminyum alaşımı ocağa yerleştirilmiş ve ergitme işlemi sırasında ergimiş metalin ağırlığı sürekli 5000 g olarak hazırlanmıştır. Ergitme işlemi gerçekleştirildikten sonra, deney parametrelerine uyumlu olarak Er ilavesi yapılmıştır. Ardından, sıvı metal temizleme işlemine tabi tutulan alaşım, 700 °C sıcaklıkta döküm işlemleri için hazırlanmıştır. Bu adımlar, deneyin standartlarına ve yöntemlerine uygun olarak gerçekleştirilmiştir.

Döküm işlemi sırasında, öncelikle ocak yüzeyinde bir cüruf tabakası sıyırma yöntemiyle temizlenmiştir. Daha sonra, kepçe yardımıyla ocaktan alınan sıvı metal, RPT numunelerin dökümü için kullanılmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi pota, çift kol yardımıyla kaldırılarak kokil kalıplara dökümler gerçekleştirilmiştir. Döküm işlemi, sıvı metal sıcaklığı 700 °C ve kalıp sıcaklığı 250 °C olarak ayarlanan kokil kalıplara gerçekleştirilmiştir. Kalıplar, yeterli soğuma süresinin ardından açılarak numuneler çıkarılmıştır. Deney parametrelerine uygun olarak 4 farklı şekilde hazırlanan numuneler, sonraki incelemelerde kullanılmıştır ve erbiyumun mikroyapı, akıcılık ve mekanik özellikler üzerindeki etkisi analiz edilmiştir.



Şekil 4: Döküm İşleminde Örnek Görüntü

Şekil 4’te gösterildiği gibi gerçekleştirilen döküm süreci, deneysel çalışmanın temelini oluşturmuş ve ilave edilen Er oranının alaşımın özellikleri üzerindeki etkinin değerlendirilmesi için uygun bir zemin oluşturmuştur. Bu işlemler, döküm sürecinin standart prosedürlerine uygun olarak gerçekleştirilmiş ve numunelerin kontrollü bir şekilde alınmasını sağlamıştır.

2.3.1. Dökümlerin İncelenmesi ve Testler

Tez kapsamında belirlenen parametrelere göre döküm deney numuneleri aşağıda belirtilen test ve inceleme aşamalarına tabi tutulacaktır.

- Azaltılmış basınç (RPT) testi ve yoğunluk ölçümü
- K-mold testi
- Mikro yapı incelemeleri
- Sıvı metal ilerleme mesafesi ölçümü
- Basamak test kalıbı
- Sertlik testi
- Çekme testi

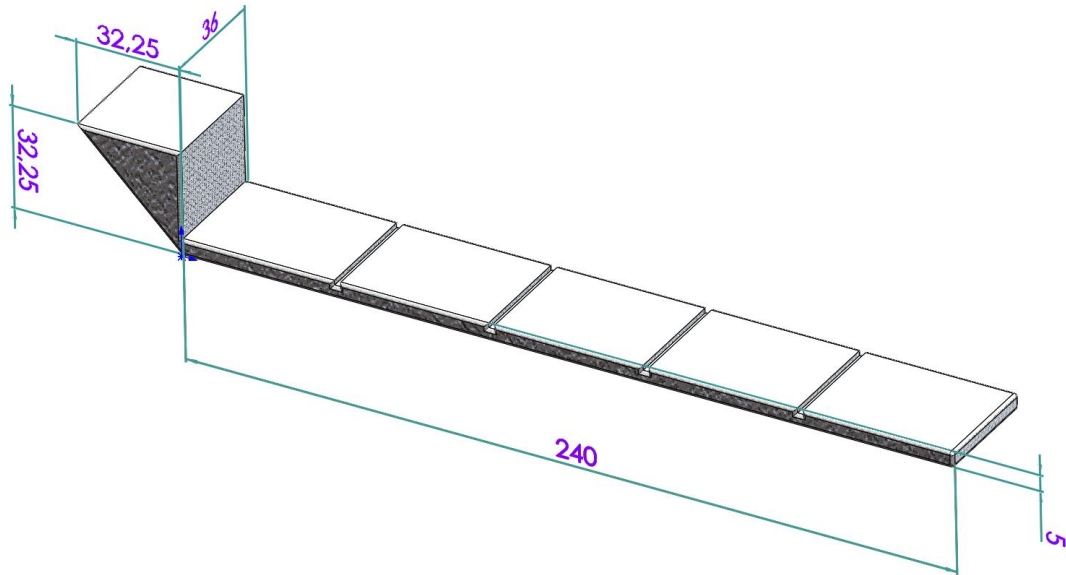
Ek olarak, numunelerin içerdği % gözenek miktarı, Eşitlik 2'deki formül kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Gözenek} = [(Teorikyoğ. - Deneyselyoğ.) / Teorikyoğ.] * 100 \quad (\text{Eşitlik 2})$$

RPT numunesi dikey olarak kesilerek numune yüzeyinden sıvı metal kalitesi değerlendirilmektedir. Eğer test numunesinde çok sayıda gaz boşluğu tespit edilirse, sıvı alaşımda yüksek miktarda hidrojen çözünmüş olduğu varsayılır. Buna karşılık, az sayıda gaz boşluğu varsa, sıvı metalde daha az miktarda çözünmüş hidrojen olduğu düşünülür.

2.3.1.2. K-mold testi

K-mold testi, ergimiş metallerin katılaşma davranışını ve iç yapısındaki inklüzyonları değerlendirme amacıyla kullanılan bir test yöntemidir. Bu testte, ergimiş metal içerisinde çentikler bulunan bir kokil kalıba dökülmüştür. Çentiklerin bulunması, numunenin kolayca kırılmasını sağlamaktadır. Numune kalıptan çıkarılmasının ardından, çentiklerden bir basit darbeye kırılarak parçalara ayrılmıştır. Kırık yüzey görüntüsü, numunenin iç yapısındaki inklüzyonları ve gözenekleri açığa çıkarır. İmaj analiz yöntemi kullanılarak, kırık yüzeyler detaylı bir şekilde incelenmiştir. İmaj analiz yöntemi, yüzeydeki inklüzyonlar ve gözeneklerin daha ayrıntılı bir şekilde incelenmesine ve analiz yapılmasına büyük ölçüde katkı sağlamıştır. Şekil 6'da K-mold numune görseli verilmektedir.



Şekil 6: K-Mold Numunesi

Alınan numunelerdeki sıvı metal kalitesi aşağıda verilen Eşitlik 3'teki K değeri ile ifade edilmektedir.

$$K = \frac{s}{n} \quad (\text{Eşitlik 3})$$

Eşitlikteki;

K: Bir numunenin kırık yüzeyinde bulunan inklüzyonların sayısını,

n: İncelenen örnek sayısını,

s: Küçük parçanın n parçasında bulunan toplam kapanım sayısını ifade etmektedir.

Buna göre;

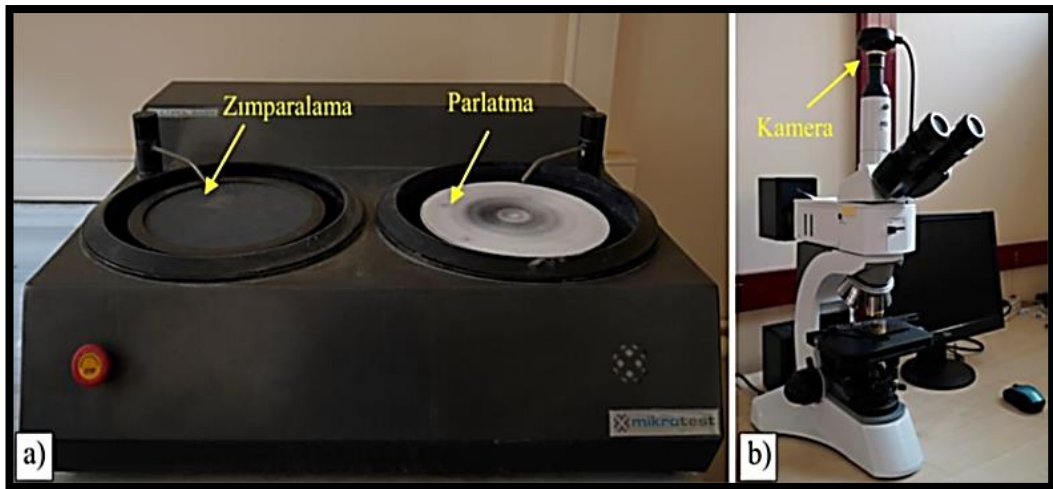
$K < 0,5$ olduğunda sıvı metalin temiz olduğunu göstermektedir.

$0.5 < K < 1,0$ kabul edilebilir değerler arasında olsa da sıvı metalin uygun bir işlemle temizlenmesi gerektiğini belirtir.

$K > 1,0$ sıvı metalin mutlaka temizlenmesi gerektiğini işaret eder (Balaban vd., 2020).

2.3.1.3. Mikro yapı incelemeleri

Mikro yapı incelemeleri, akıcılık kalıplarının sıvı metalin ilerlediği en son kısımdan numune kesilip ilerleme yönünü gösterecek şekilde elde edilen numunelerden (4 kanallı akıcılık numunesinin her bir kesit kalınlığından, spiral kalıbından en uç kısımdan aynı teknikle) gerçekleştirilmiştir. Dökümlerden alınan numuneler, ilk olarak bakalite alınmıştır. Ardından, numuneler metalografik inceleme sürecine tabi tutulmuştur. Bu süreçte, incelenecek yüzeyler önce kaba ve sonrada ince zımparalama işleminden geçirilmiştir, sırasıyla 60-100-200-400-600-800-1000-1200 mesh'lik zımpara kâğıtları kullanılmıştır. Daha sonra, alümina süspansiyonu ile parlatılmış ve Keller çözeltisi ile dağlanmışlardır. Bu işlemler, numunelerin mikroyapısal analiz için hazırlanmasını sağlamıştır. Şekil 7'de zımparalama ve parlatma cihazına ait görsel bulunmaktadır.



Şekil 7: Mikro Yapı İncelemelerinde Kullanılan Cihazlar a) Zımparalama ve Parlatma Cihazı
b) Optik Mikroskop

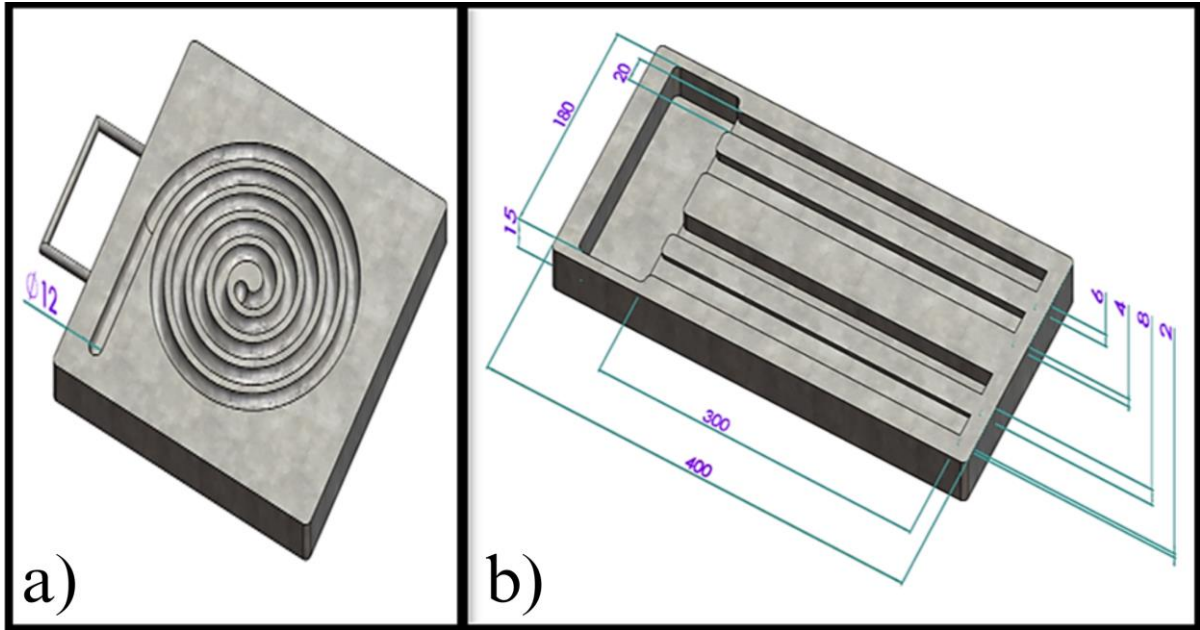
Metalografik olarak hazırlanan yüzeylerin mikroskopik incelenmesi ve tane boyutu ölçümleri, Şekil 7’de görülen NMM-800/820 serisi metalürjik optik mikroskop ve bağlı dijital kamera ile yapılmıştır.

İmaj analizi sistemleri, genellikle bir mikroskop, mikroskoba bağlı bir kamera ve bu kamera aracılığıyla hazırlanan numunelerden alınan görüntülerin bilgisayara aktarılmasıyla çalışır. Ardından, bilgisayar programlarıyla, kullanıcı tanımlı veya otomatik olarak, görüntülerin analizi gerçekleştirilir. Yazılım, analiz yapmak için görüntülerdeki renk farklılıklarını kullanır, her bir kontrasttaki rengi farklı birer faz veya bölge olarak algılar ve bu farklılıklara göre sonuçlar üretmektedir.

2.3.1.4. Sıvı metal akıcılık ölçümü

Sıvı metal ilerleme mesafesi ölçümü, sıvı metalin akıcılığını belirlemeye yönelik bir tekniktir. Akışkanlık ölçümleri, sıvı metalin viskozitesi (yoğunluğu) ve sıcaklık etkileşimleri gibi özellikleri anlamaya yardımcı olur.

Akıcılık testleri için, Şekil 8’de gösterilen önceden hazırlanmış dört kanallı akıcılık test kalıbı ve spiral akıcılık test kalıbı kullanılmıştır. Ergitme işleminden sonra elde edilen sıvı metal, belirlenen sıcaklık ve basınç koşullarında kalıplara dökülmüştür. Sıvı metal, kalıp kanalında ilerlemeye başladığında, sürekli bir akış meydana gelir. Bu akış, metalin kalıbın içinde dengeli bir şekilde yayılmasını sağlar ve kalıp boşluklarını doldurur. Metal, kalıp içinde istenen şekli ve özellikleri alana kadar bu akış devam eder. Akış, metalin katılaşmasıyla son bulur.

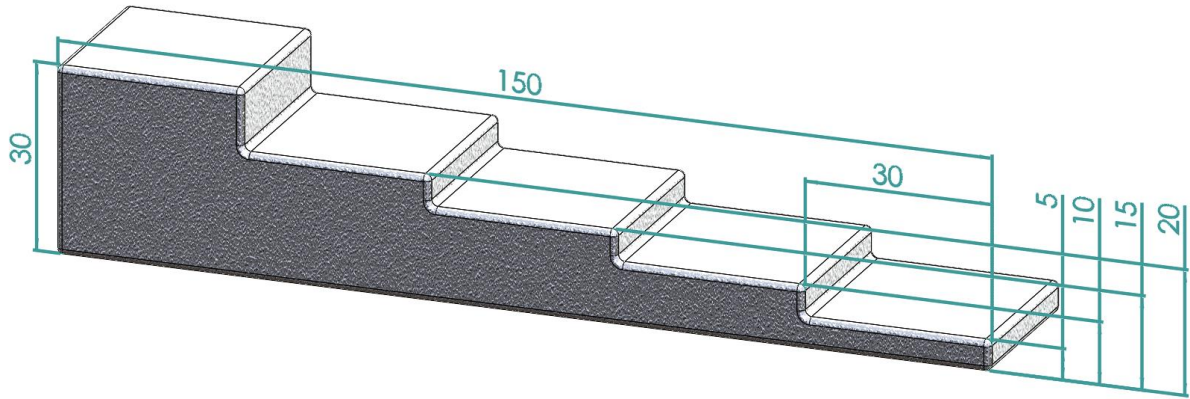


Şekil 8: a) Spiral Akıcılık Test Kalıbı b) Dört Kanallı Akıcılık Test Kalıbı

Akış sırasında, metalin kanal içinde katılaştığı bölgeler gözlemlenmiştir. Bu bölgelerdeki katılaşma noktaları, akışın kesildiği noktaları belirlemek için kullanılmıştır. Bu aşamada, metalin durmadan aktığı mesafe ölçülmüş ve sıvı metal ilerleme mesafesi hesaplanmıştır. Bu toplam uzunluk, metalin akıcılık özelliğini ifade eden bir parametredir.

2.3.1.5. Basamak test kalıbı

Basamak test kalıbı, döküm endüstrisinde hem mekanik hem de mikroyapı özelliklerinin belirlenmesinde kritik bir rol oynamaktadır. Bu kalıp, farklı kesit kalınlıklarına sahip numunelerin mekanik testlerini gerçekleştirmek ve numunelerin katılaşma davranışını ve içyapısını incelemek amacıyla kullanılmaktadır. Şekil 9'da farklı kesit kalınlıklarına sahip basamak test kalıbı numunesi görülmektedir.

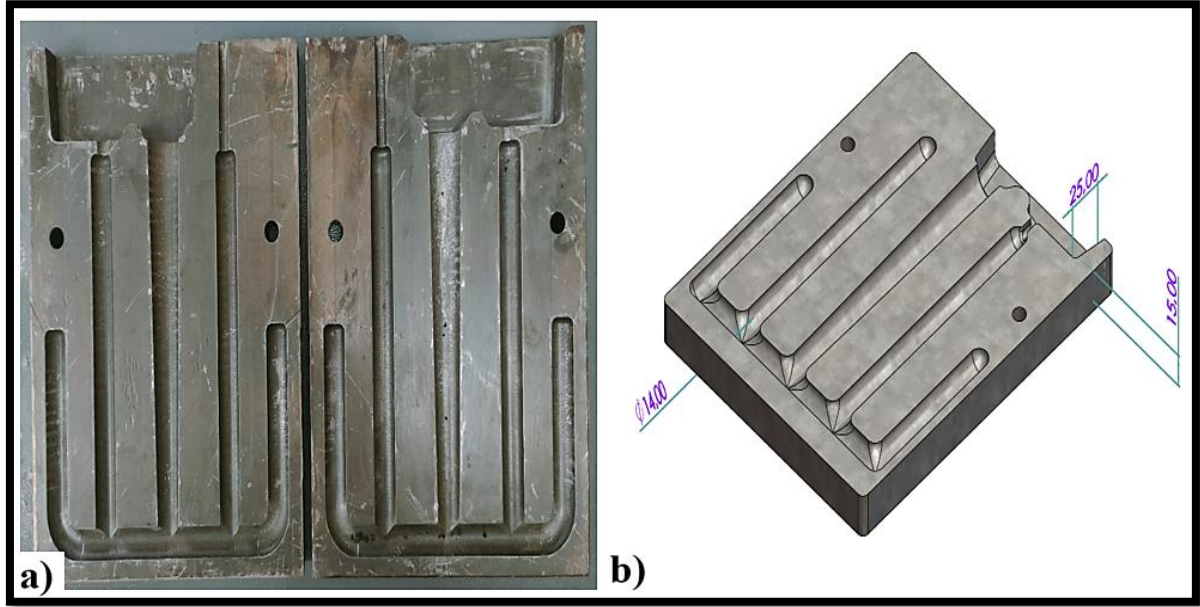


Şekil 9: Basamak Test Kalıbı Numunesi

Deneysel çalışmalar kapsamında, A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda Er ilavesiyle dökümler yapılmıştır. Basamak test kalıbından elde edilen numunelerin farklı kesit kalınlıkları ve katılaşma zamanlarında mikro yapı üzerindeki değişim incelenmiştir. Bu amaçla, her bir kesit kalınlığından alınan numuneler mikroskobik düzeyde incelenmiş ve içyapıları detaylı olarak değerlendirilmiştir. Mikro yapı incelemeleri, alaşımın içyapısı üzerindeki değişiklikleri anlamamıza ve işlenebilirliğini değerlendirmemize yardımcı olur.

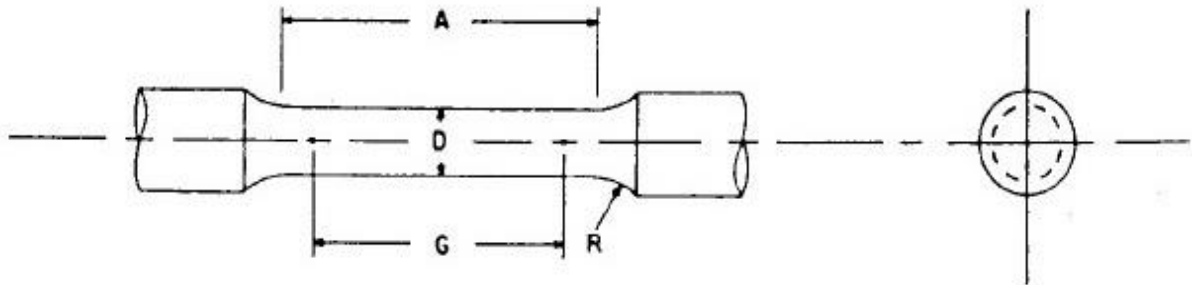
2.3.1.6. Çekme testi

Çekme testi, materyalin gerilme-deformasyon davranışını incelemek ve mukavemet özelliklerini değerlendirmek için kullanılan bir test yöntemidir. Bu çalışmada, A356 alaşımına farklı miktarda Er ilavesinin mekanik özelliklere olan etkilerini araştırmak için dört farklı kimyasal kompozisyon (ilavesiz, %0,03, %0,06 ve %0,1 Er ilaveli) üzerinde toplam 16 çekme çubuğu numunesi dökülmüştür. Mekanik testlerin yapılması için tasarlanan çubuklu mekanik test kalıbı ve ölçüler Şekil 10'da gösterilmiştir.



Şekil 10: a) Mekanik Test Kalıbı Fotoğrafı b) Mekanik Test Kalıbı Ölçüleri

Çalışma kapsamında, mekanik test kalıbından elde edilen numuneler, çekme testlerinde kullanılmak üzere uygun formda işlenmiştir. Şekil 11’de ASTM E8/E8M-13a standardına uygun olarak hazırlanan çekme test çubuklarının ölçüleri verilmiştir. Şekil 11’de gösterildiği gibi, çekme çubukları A: 62 mm uzunluğunda, D: 9 mm çapında, R: 8 mm çapında ve G: 54 mm ölçülerine göre çekme çubukları imal edilmiştir.



Şekil 11: Çekme Testi için Döküm Numunesinin Şematik Gösterimi

Çekme testleri, 1 mm/dk’lık çekme hızı altında 100 kN’luk kapasiteli MTS Hydraulic Wedge Grip marka 370.10 model bir deney makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Numuneler, önceden belirlenmiş tutuculara sıkıca sabitlenmiştir ve deney makinesi tarafından uygulanan yük altında test edilmiştir. Test sürecinde, numuneler üzerinde kontrollü bir şekilde yük artışı uygulanırken, deney makinesinden gerilme ve uzama verileri kaydedilmiştir.

Sonuç olarak, deneysel çalışma kapsamında çekme testi yöntemi kullanılarak malzemelerin akma mukavemeti, çekme mukavemeti ve % uzama değerleri belirlenmiştir. Bu elde edilen değerler, numunelerin mekanik özelliklerinin derinlemesine analiz edilmesi için son derece önemli bilgiler sunmaktadır.

2.3.1.7. Sertlik testi

Alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için Brinell sertlik ölçüm testi kullanılmıştır. Bu test, malzeme yüzeyine belirli bir yükün ve belirli bir çapta sert bir bilyanın belirli bir süre boyunca uygulanmasıyla oluşan izin çapının ölçülmesine dayanan bir sertlik ölçme yöntemidir. Bu yöntem, genellikle düşük çekme mukavemetine sahip malzemelerin sertlik değerlerinin belirlenmesinde kullanılır. Brinell sertlik deneyinde, bilya test numunesinin yüzeyine dik bir açıyla yerleştirilir ve belirli bir test kuvveti uygulanır. Bu kuvvet belirli bir süre boyunca istikrarlı bir şekilde korunur ve sonra bilya çıkarılır. Oluşan izin çapı, en az iki yönde ölçülür ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak Brinell sertlik değeri hesaplanır. Bu değer, test numunesinin malzemesinin sertlik özelliğini temsil etmektedir.

Bu deneysel çalışma kapsamında numuneler, oda sıcaklığında BMS makine AFFRI marka cihazda test edilmiştir. Sertlik ölçümleri, HB test metodu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Testte, 10 mm çaplı bilye ile her bir numuneden, 1500 kg-f yük altında en az on adet sertlik değeri ölçülmüş ve bu değerlerin ortalaması hesaplanmıştır.

Elde edilen sertlik değerleri, A356 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine Er ilavesinin etkisini değerlendirmek için önemli bir ölçüttür.

ÜÇÜNCÜ BÖLÜM

3. BULGULAR

Tez kapsamında gerçekleştirilen deneysel çalışmaların sonuçlarına dayanarak, A356 alüminyum alaşımının kokil kalıplara döküm deneylerinde elde edilen bulguların değerlendirmesi verilecektir. İlk aşamada, ilavesiz döküm deneyleri gerçekleştirilmiş ve daha sonra değişen oranlarda Er ilavesi yapılarak deneyler tekrarlanmıştır. Döküm deneyleri sırasında, RPT ve K-mold kalıplarına yönelik dökümlerden elde edilen veriler, sıvı metal kalitesi üzerinde detaylı bir analiz sunmuştur. Spiral ve dört kanallı akıcılık kalıplarında ise sıvı metal ilerleme mesafelerinin belirlenmesi, döküm sürecinin akıcılığına ilişkin önemli bilgiler sağlamıştır. Ayrıca, basamak kalıbında alınan numunelerden mikroyapı incelemeleri, mekanik test kalıbından alınan numunelerden ise çekme ve sertlik testleri gerçekleştirilmiştir.

3.1. SIVI METAL KALİTESİNİN TESPİTİ

Tez çalışmasının ana odak noktası, değişen oranlarda Er ilavesinin alaşım özelliklerine olan etkisinin detaylı bir şekilde incelenmesidir. Gözenekler ve inklüzyonlar, özellikle alüminyum dökümlerinde döküm kalitesini belirgin bir şekilde etkileyen kritik faktörler arasındadır. Bu bağlamda, sıvı metal döküm öncesinde oluşabilecek hataların etkilerini azaltmak amacıyla azotla temizleme prosedürü uygulanmıştır. Sıvı metalin kalıba dökülmesi sürecindeki temizlik düzeyinin değerlendirilmesi için RPT ve K-Mold testleri uygulanmıştır.

Gözenekliliğe neden olan gazlar ve inklüzyonların katılaşma sürecinde daha az büyümesine olanak sağlamak amacıyla sıvı metal, azaltılmış basınç altında katılaştırılmıştır. Bu işlem için RPT test numuneleri elde edilmiş olup ergimiş metal kalitesi kontrolü sağlanmıştır. Döküm deneylerinden elde edilen RPT numunelerine ait fotoğraf görüntüleri Şekil 12’de verilmiş, çalışmanın görsel açıdan da desteklenmesini sağlamış ve elde edilen bulguların daha kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına yardımcı olmuştur.



İlavessiz



%0,03 Er İlaveli



%0,06 Er İlaveli



%0,1 Er İlaveli

Şekil 12: RPT Test Numune Görüntüleri

Şekil 12'deki görüntülerden de görüldüğü üzere, numunelerin üst kısmında çöküntülerin olduğu gözlemlenmiştir. Bu çöküntülerin varlığı, sıvı metal temizliğinin uygun olduğuna dair bir işaret olarak değerlendirilmektedir. Bu bulgu, temizleme işleminin etkinliğini ve numunelerin kalitesini göstermektedir (Uludağ vd., 2012).

Ayrıca, RPT numunelerinin yoğunluk ölçümleri yapılarak gözenek durumları belirlenmiştir. Arşimet prensibiyle yapılan yoğunluk ölçümlerinin sonuçları, Tablo 7'de sunulmuştur.

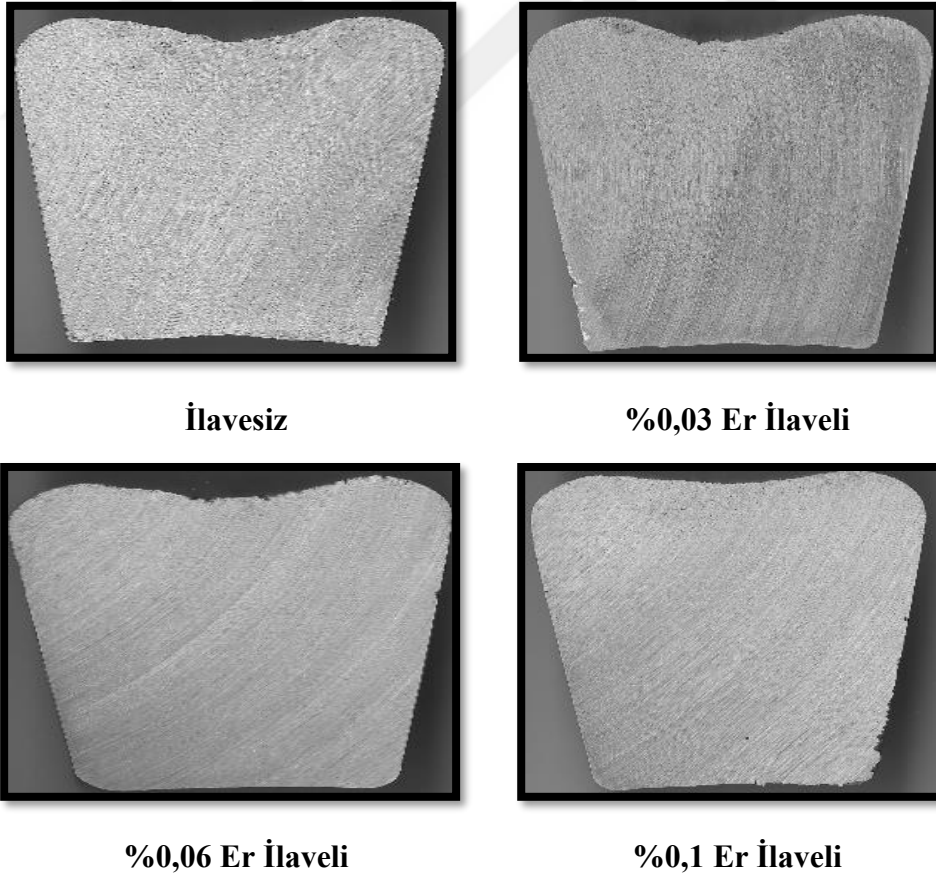
Tablo 7: RPT Döküm Numuneleri Yoğunluk ve Gözenek Sonuçları

Numune Adı	Havada Ağırlık (g)	Suda Ağırlık (g)	Deneysel Yoğunluk (g/cm ³)	Referans Yoğunluk (g/cm ³)	Hesaplanan Gözenek %
------------	--------------------	------------------	--	--	----------------------

İlavesiz A356	110,07	68,78	2,661	2,67	0,337
%0,03 Er İlaveli	115,86	72,41	2,662	2,67	0,309
%0,06 Er İlaveli	110,12	68,80	2,660	2,67	0,364
%0,1 Er ilaveli	116,23	72,58	2,658	2,67	0,449

Tablo 7’deki RPT döküm numunelerinden elde edilen yoğunluk ölçüm sonuçlarının incelenmesi, deneysel ve teorik yoğunluk arasındaki ilişkiden yola çıkılarak gözenek değerlerinin hesaplanmasını içermektedir. Teorik yoğunluk değerini belirlerken, alaşımın kimyasal bileşimi ve standart değerlerin göz önünde bulundurulması önemlidir. Tablo 7’de sunulan verilere göre, tüm deney numunelerinde hesaplanan gözenek değerlerinin %0,5’in altında olduğu belirlenmiştir.

RPT numuneleri kesilmiş, zımparalanmış ve kesit yüzeylerindeki gözenek durumları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Şekil 13’te, RPT numunelerinin kesit yüzeylerine ait görüntüler sunulmuştur.



Şekil 13: RPT Numune Kesit Görüntüleri

RPT numunelerinin kesit yüzey görüntülerini incelediğimizde, her bir döküm işleminde kabul edilebilir seviyede sıvı metal temizliği sağlandığı gözlemlenmektedir. Numune yüzeyindeki çöküntülerin ve gözeneklerin minimum düzeyde olması, sıvı metal temizliği açısından uygun olduğunu doğrulamaktadır.

Bununla birlikte, sıvı metal temizliğinin kontrolüne yönelik başka yöntemlerin de incelenmesi ve karşılaştırılması önemlidir. Bu nedenle, RPT döküm numuneleri yanında diğer test yöntemi olan K-mold kalıba döküm numuneleri incelenmiştir. Şekil 14’de, K-mold döküm numunesine ait örnek fotoğraf görüntüsü sunulmuştur. Bu test yöntemi, sıvı metalin kalıba dökülmesi sürecindeki temizlik düzeyinin değerlendirilmesine olanak tanımaktadır.



Şekil 14: K-Mold Kalıbı ile Yapılan Döküm Numune Görseli

Tez kapsamında, K-Mold kalıbından elde edilen numunelerin kırık yüzeyleri detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Numuneler, çentikli bölgelerden kırılarak kırık yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir. Şekil 15’de, K-Mold numunelerine ait kırık yüzey görüntüleri sunulmuştur. Bu inceleme, döküm numunelerinin yapısal bütünlüğünün ve kalitesinin değerlendirilmesine olanak sağlamaktadır. Literatürde yapılan araştırmalar, döküm numunelerinin kırık yüzeylerinin incelenmesinin, döküm işlemi sırasında oluşabilecek potansiyel kusurların belirlenmesi ve döküm kalitesinin geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır. Bu kapsamda, K-Mold kalıbı ile döküm sonucu elde edilen numunelerin kırık yüzeylerinin detaylı analizi, tezin değerlendirme sürecine katkı sağlamaktadır.



İlavesiz



%0,03 Er İlaveli



%0,06 Er İlaveli



%0,1 Er İlaveli

Şekil 15: K- Mold Numunelerinin Kırık Yüzey Görüntüleri

Tez çalışması kapsamında, K-mold döküm numunelerinin hızlı katılaşması sonucunda çok ince bir matris olduğu ve bu durumun kırık yüzeyinde inklüzyonların belirgin bir şekilde görülmesine neden olduğu gözlemlenmiştir. Şekil 15’de, farklı oranlarda Er elementi ilavesi yapılarak K-mold parçalarından en uç kademesinden başlayarak sıralı bir şekilde çekilen resimler bulunmaktadır. Bu resimlerde, döküm deney numunelerinden elde edilen örnek kırık yüzey görüntüleri sunulmaktadır. K-mold numune kırık yüzeylerinde gözlenen inklüzyonların sayımı yapılarak, elde edilen değerler Tablo 8’de rapor edilmiştir.

Tablo 8: K- Mold inklüzyon, Parça Sayıları ve K Değerleri

Numune adı	İnklüzyon sayısı	K- mold parça sayısı	K değeri
İlavesiz (A356)	3	5	0,6
%0,03 Er ilaveli	2	5	0,4
%0,06 Er ilaveli	4	5	0,8
%0,1 Er ilaveli	3	5	0,6

Tez çalışması kapsamında, Şekil 15’de sunulan K-Mold kırık yüzey görüntüleri ile Tablo 8’de verilen K-Mold ölçüm sonuçlarına dayanarak yapılan analizlerde, tüm döküm

deneylerinde elde edilen K değerlerinin benzer olduğu ve genellikle 1 değerinin altında olduğu gözlemlenmiştir. Bu değerler, sıvı metalin temizliği açısından kritik öneme sahiptir. Örneğin, K-Mold değeri 0,5'in altındaysa sıvı metalin temiz olduğu kabul edilirken, $0,5 < K\text{-değeri} < 1,0$ aralığında değerler kabul edilebilir seviyelerde olduğunu gösterir ve K-değeri $> 1,0$ olduğunda ise sıvı metalin temizlenmesi gerektiği vurgulanmaktadır (Gyarmati vd, 2019; Tokatlı vd., 2022). Belirlenen K değerlerinin analizi, tüm deneylerde sıvı metalin kalitesinin uygun seviyelerde olduğunu ve temizleme işleminin etkinliğini doğrulamaktadır.

Ayrıca, K-Mold değerleri ve RPT sonuçları incelendiğinde, dökümde gaz kaynaklı boşlukların oluşmasını önlemek ve sıvı metal temizliğinin yeterliliğini sağlamak için uygun önlemlerin alındığı belirlenmiştir. Bu durum, olası gözenek oluşumlarının genellikle gaz kaynaklı olmayacağını ve varsa bile yetersiz besleme kaynaklı çekinti gözeneklerinden kaynaklanabileceği şeklinde yorumlanmıştır.

3.2. AKICILIK TESTİ SONUÇLARI

Döküm prosesinde akıcılığın incelenmesi, metalürjik ve endüstriyel uygulamalar açısından önemli bir konudur. Bu bağlamda, A356 alüminyum alaşımına Er ilavesinin akıcılık üzerindeki etkisi çeşitli çalışmalarda araştırılmıştır. Bu araştırmalarda, spiral akıcılık kalıbı ve farklı kesit kalınlıklarına sahip dört kanallı akıcılık kalıbı kullanılmıştır. Döküm numunelerinin fotoğrafları Şekil 16'da gösterilmiştir.

a)



b)



c)



d)

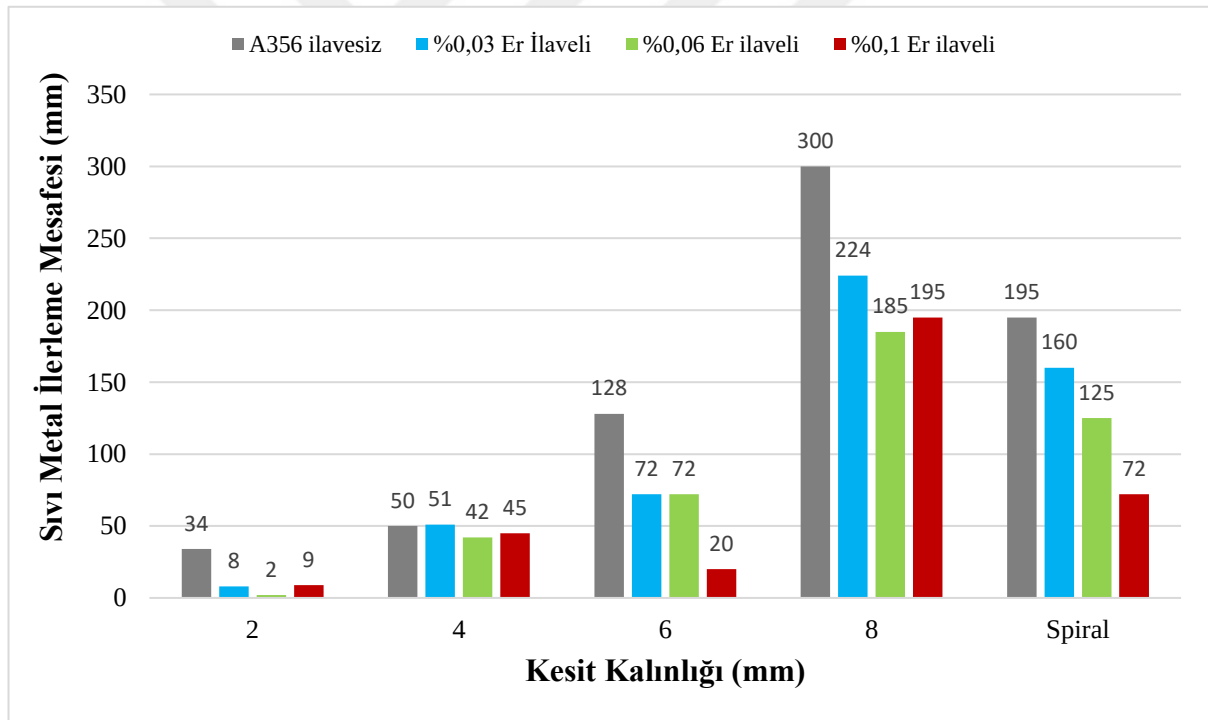


Şekil 16: Akıcılık Döküm Numuneleri a)İlavesiz b)%0,03 Er İlaveli c) %0,06 Er İlaveli d)%0,1 Er İlaveli

A356 alaşıma Er ilavesi ile akıcılık özelliklerinin değişkenlik gösterdiği, Şekil 17’deki görüntülerden açıkça anlaşılmaktadır. Deney numunelerinin sıvı metal ilerleme mesafelerine dair elde edilen değerler ise Tablo 9’da ve Şekil 17’de detaylı bir şekilde sunulmuştur. Bu değerler, Er ilavesinin akıcılık üzerindeki etkisinin nicel olarak değerlendirilmesine olanak sağlamakta ve yapılan döküm deneylerinin sonuçlarını daha kapsamlı bir şekilde analiz etmemize yardımcı olmaktadır.

Tablo 9: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri

Döküm No	Alaşım İlavesi	Döküm Sıcaklığı (°C)	Kesit Kalınlığı (2 mm)	Kesit Kalınlığı (4 mm)	Kesit Kalınlığı (6 mm)	Kesit Kalınlığı (8 mm)	Spiral (mm)
1	A356 ilavesiz	720	34	50	128	300	195
2	%0,03 Er İlaveli	720	8	51	72	224	160
3	%0,06 Er ilaveli	720	2	42	72	185	125
4	%0,1 Er ilaveli	720	9	45	20	195	72



Şekil 17: Sıvı Metal İlerleme Mesafesi Ölçüm Değerleri

Tablo 9 ve Şekil 17’deki verilere göre, ilavesiz A356 alaşımı dökümünde farklı kanal kalınlıklarında sıvı metal ilerleme mesafeleri belirlenmiştir. 2 mm kalınlığındaki kanalda 34 mm, 4 mm kanalda 50 mm, 6 mm kanalda 128 mm ve 8 mm kanalda sıvı metal kalıp boşluğu kadar ilerleyerek 300 mm dolum ölçülmüştür. %0,03 Er ilavesi yapılan dökümde ise sırasıyla 8 mm, 51 mm, 72 mm ve 224 mm sıvı metal ilerlemesi tespit edilmiştir. %0,06 Er ilavesi yapılan dökümde elde edilen değerler ise 2 mm, 42 mm, 72 mm ve 185 mm sıvı metal ilerlemesi

tespit edilmiştir. %0,1 Er ilavesi yapılan döküm deneyinde ise sıvı metal ilerleme mesafelerinin 9 mm, 45 mm, 20 mm ve 195 mm olduğu ölçülmüştür. Spiral kalıba döküm yapıldığında ise sıvı metal ilerleme mesafelerinin ilavesiz dökümde 195 mm, %0,03 Er ilaveli dökümde 160 mm, %0,06 Er ilaveli dökümde 125 mm ve %0,1 Er ilaveli dökümde 72 mm olduğu tespit edilmiştir. Literatürde, alüminyum döküm alaşımlarının akışkanlığının, sıvı metal temizliği gibi işlemlerden önemli ölçüde etkilendiği sıkça vurgulanmaktadır. Akışkanlık ayrıca, alaşımın katılaşma aralığı, katılaşma sıcaklığı, kayma hızı ve içinde bulunan takviye parçacıkları gibi birçok faktör tarafından da şekillendirilmektedir (Ravi vd., 2008).

Colombo ve arkadaşları yaptıkları çalışmada, Er elementinin alüminyum alaşıma ilavesinin akıcılık üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceğini göstermektedir. Özellikle yüksek oranlarda Er ilavesi (%0,41 gibi), alaşımın dökülebilirliğini azaltarak döküm sırasında daha fazla hata oluşmasına yol açabilir (Colombo vd., 2017).

Bu bağlamda, Er ilavesinin A356 alüminyum alaşımının akışkanlığı üzerindeki etkilerini değerlendirirken, döküm parametreleri, porozite oluşumu ve genel döküm performansı gibi faktörlerin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir. Yüksek Er içeriğinin akışkanlığı olumsuz etkileyebileceği dikkate alınarak, Er ilavesinin miktarı dikkatlice ayarlanmalı ve döküm sürecine uygun bir şekilde ilave edilmelidir.

3.3. MİKROYAPI İNCELEME SONUÇLARI

A356 alaşımına farklı oranlarda Er ilavesi eklenerek yapılan dökümlerin mikro yapılarının analiz edilmesi amacıyla basamak kalıp dökümlerinden numuneler alınmıştır. Bu çalışmada, basamak kalıbından çıkan numunelerin farklı kesit kalınlıklarındaki iç yapılar incelenmiş ve Er ilavesinin mikro yapı üzerindeki etkileri detaylandırılmıştır. Şekil 18’de basamak kalıbı döküm numunelerinin görselleri sunulmuştur.



İlavesiz



%0,03 Er İlaveli



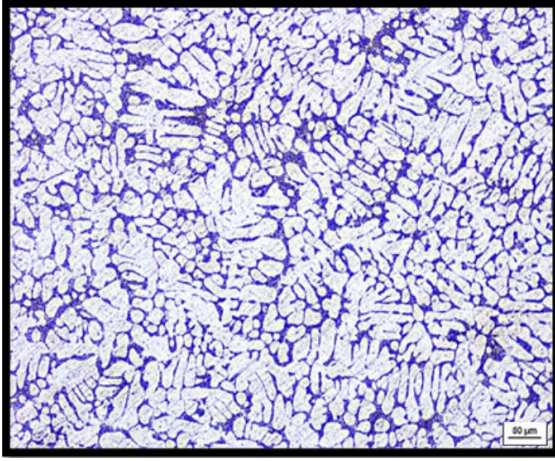
%0,06 Er İlaveli



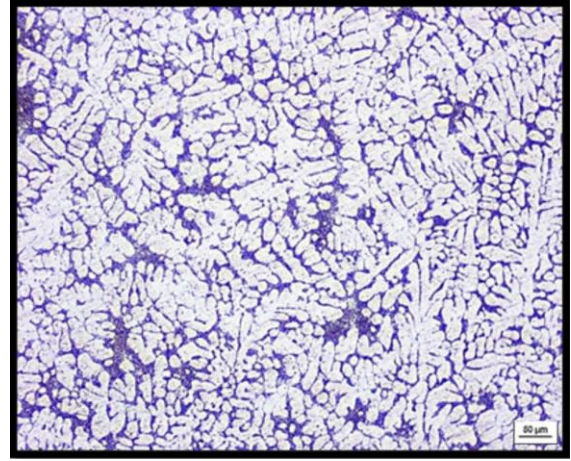
%0,1 Er İlaveli

Şekil 18: Basamak Kalıbı Döküm Numune Görselleri

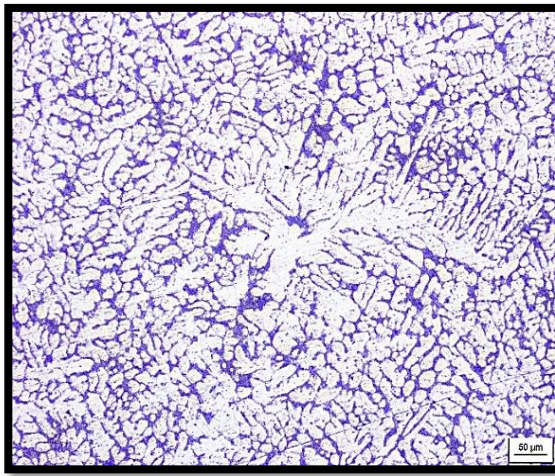
Mikroyapı analizlerinde, farklı kesit ve modüllerdeki katılaşma süreçlerinin incelenebilmesi için basamak kalıbının her bir kesitinden numuneler alınmış ve numunelerin mikroyapıları 50X büyütme ile fotoğraflanmıştır. Bu çalışma, kesit kalınlığının mikroyapı üzerindeki etkilerini detaylandırmak amacıyla yapılmıştır. Şekil 19'da 5 mm, Şekil 20'de 10 mm, Şekil 21'de 15 mm ve Şekil 22'de 20 mm kesit kalınlığına sahip bölgelerden alınan numunelerin 50X büyütme ile çekilen mikroyapı görüntüleri sunulmuştur.



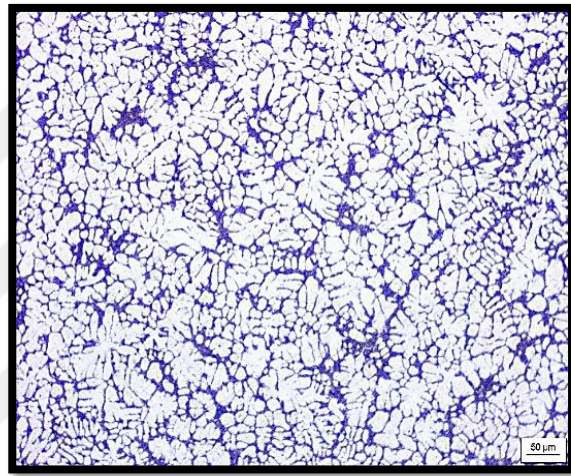
İlavesiz



%0,03 Er İlaveli

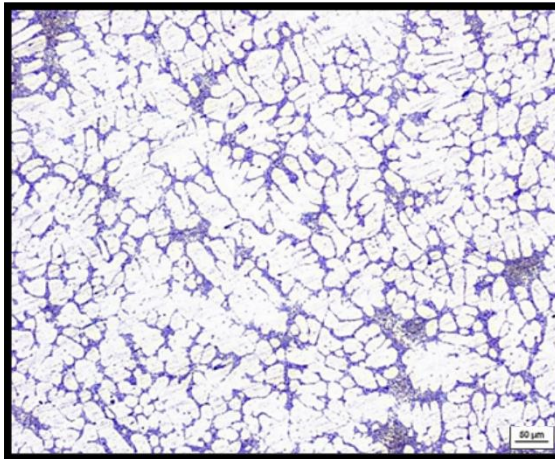


%0,06 Er İlaveli

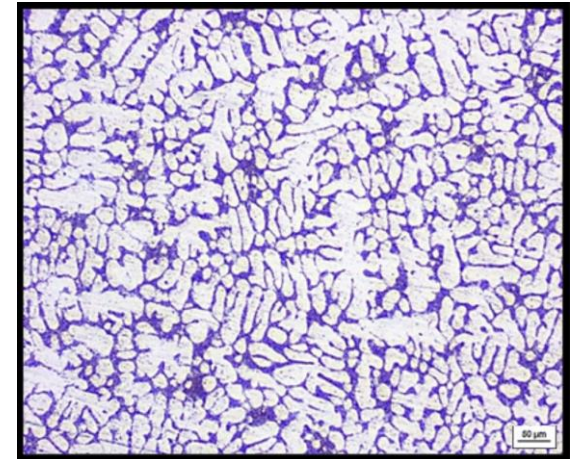


%0,1 Er İlaveli

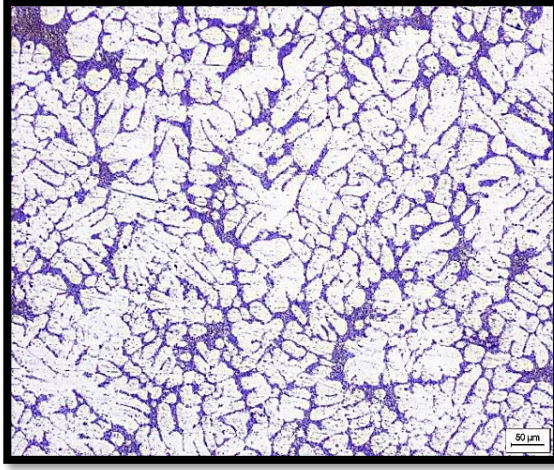
Şekil 19: 5 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri



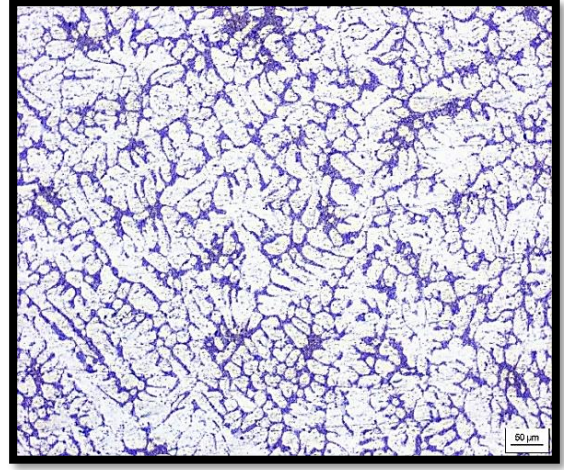
İlavesiz



%0,03 Er İlaveli

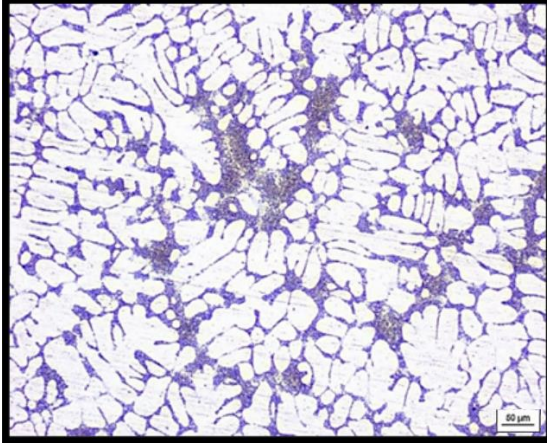


%0,06 Er İlaveli

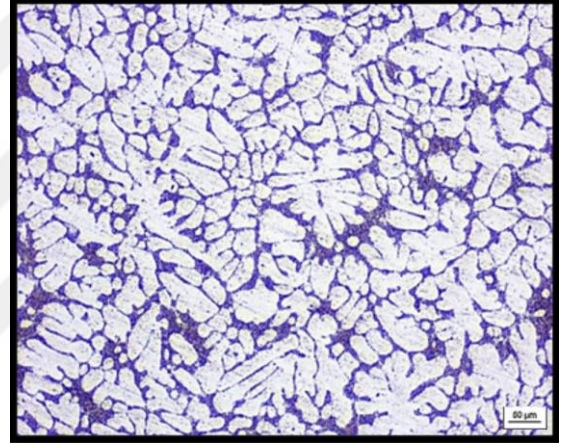


%0,1 Er İlaveli

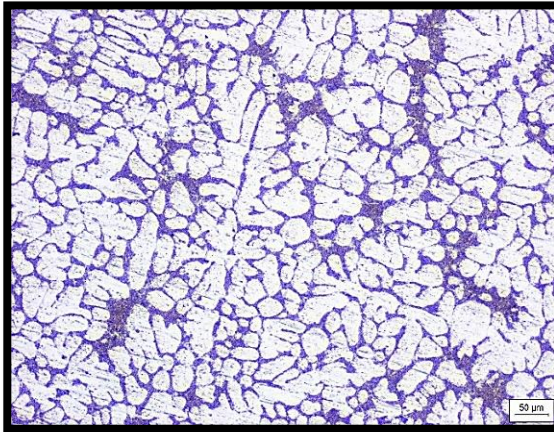
Şekil 20: 10 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri



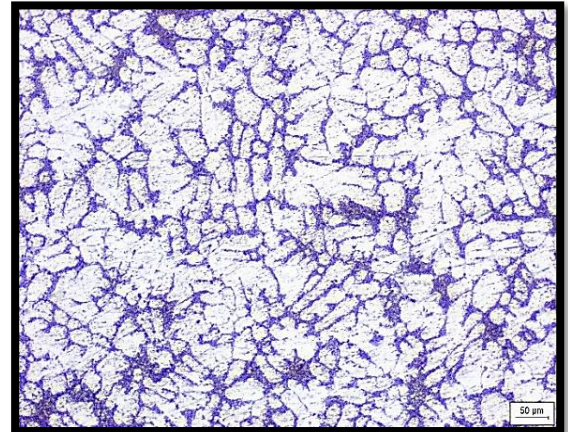
İlavesiz



%0,03 Er İlaveli

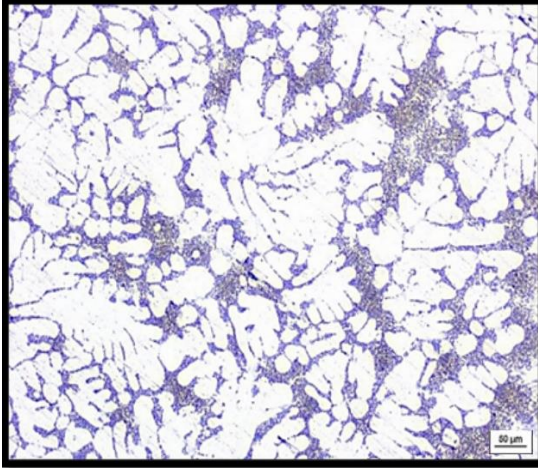


%0,06 Er İlaveli



%0,1 Er İlaveli

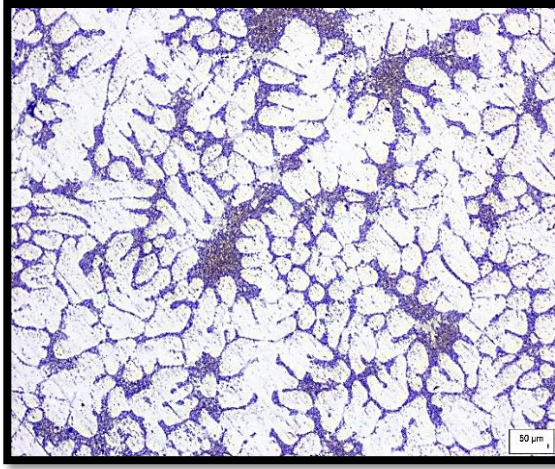
Şekil 21: 15 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri



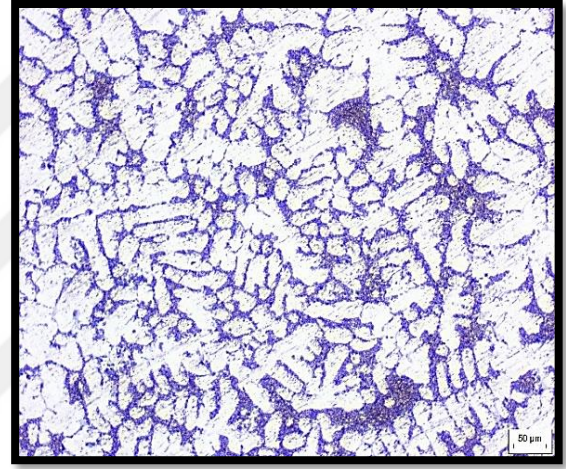
İlavesiz



%0,03 Er İlaveli



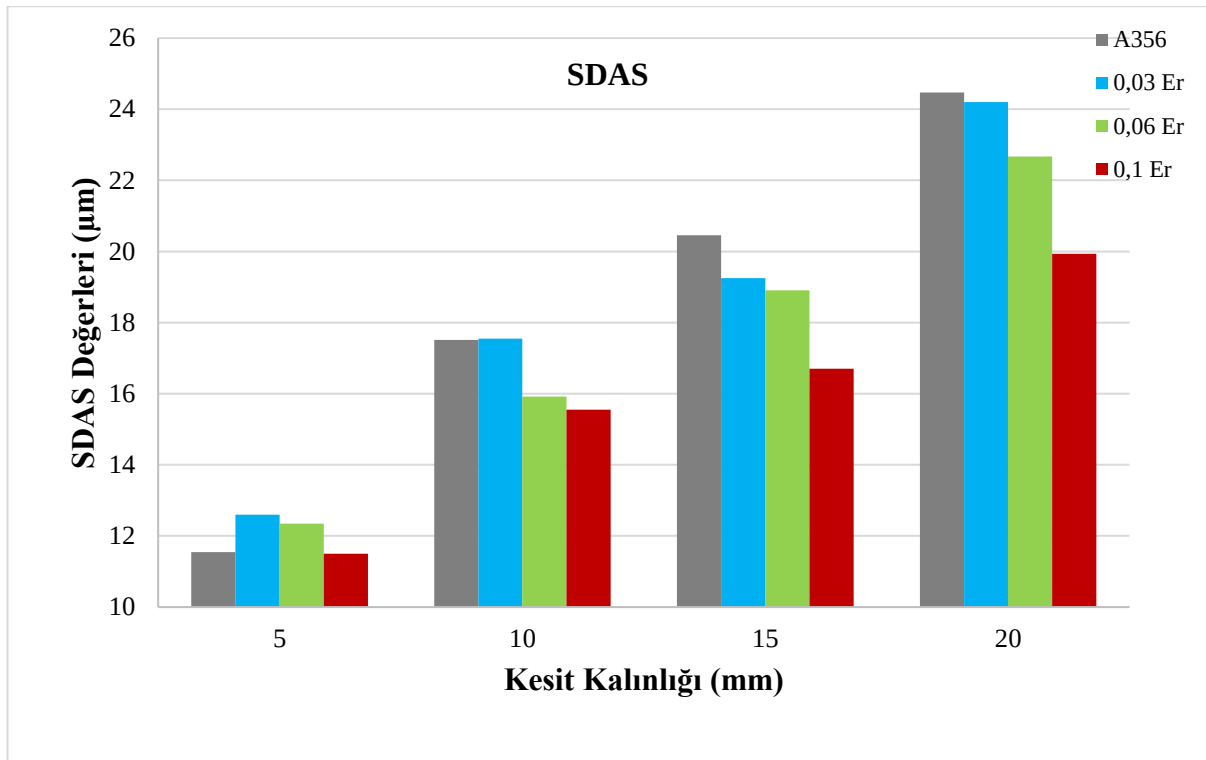
%0,06 Er İlaveli



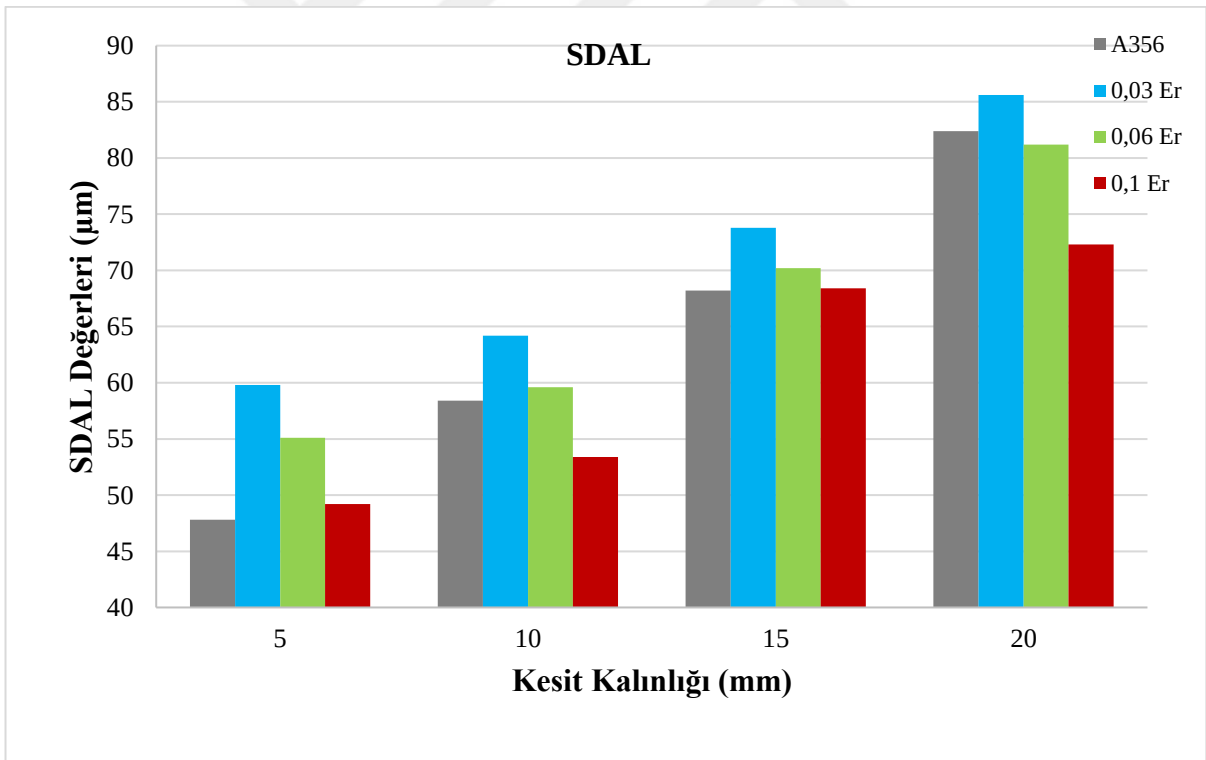
%0,1 Er İlaveli

Şekil 22: 20 mm Kalınlığındaki Basamak Kesitine Ait Mikroyapı Görüntüleri

A356 alüminyum alaşımının mikroyapısal detaylarını gösteren mikroyapı resimleri, farklı kesit kalınlıklarına ve değişen Er ilavelerine göre elde edilmiştir. Şekillerde sunulan mikroyapı görüntüleri incelendiğinde, kesit kalınlığının artmasıyla birlikte tane yapılarının ve Si kristallerinin boyutlarının arttığı gözlemlenmiştir. Mikroyapısal analizler, kalınlığın artmasıyla birlikte tanelerin büyüdüğünü ve Er ilavesinin artmasıyla mikro yapıların küçüldüğünü ortaya koymuştur. Söz konusu olgular, tüm dökümler için geçerli olup, özellikle Er ilavesinin artmasıyla yapıda belirgin değişiklikler tespit edilmiştir. Mikroyapı resimleri kullanılarak ikincil dendrit kol aralığı (SDAS) ve ikincil dendrit kol uzunluğu (SDAL) ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Şekil 23’de Er oranının ve kesit kalınlığının SDAS değerleri, Şekil 24’de ise SDAL değerleri grafik olarak sunulmuştur.



Şekil 23: Ölçülen SDAS Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Er Oranına göre Değişimi



Şekil 24: Ölçülen SDAL Değerlerinin Basamak Kalınlığı ve Er Oranına göre Değişimi

Şekil 23'de, basamak kalınlığına bağlı olarak SDAS değerlerinin nasıl değiştiği gösterilmektedir. 5 mm kalınlığındaki basamak için SDAS değerleri sırasıyla 11,5 µm, 12,6 µm, 12,35 µm ve 11,5 µm olarak belirlenmiştir. 10 mm kalınlığındaki basamakta ise bu değerler 17,5 µm, 17,55 µm, 15,9 µm ve 15,55 µm olarak ölçülmüştür. 15 mm kalınlığındaki basamağın

SDAS değerleri sırasıyla 20,45 μm , 19,25 μm , 18,9 μm ve 16,7 μm olarak kaydedilmiştir. Son olarak, 20 mm kalınlığındaki basamağın SDAS değerleri 24,46 μm , 24,2 μm , 22,66 μm ve 19,93 μm olarak tespit edilmiştir. İlavesiz A356 alaşımı için basamak kalınlığı arttıkça SDAS değerleri 11 μm 'den 24 μm 'ye yükselmiştir. Aynı eğilim, 0,03 Er, 0,06 Er ve 0,1 Er ilaveli örneklerde de gözlenmiştir.

Şekil 24'de, model kesit kalınlığına bağlı olarak SDAL değerlerindeki değişim gösterilmektedir. 5 mm kalınlığındaki basamak için SDAL değerleri 47,8 μm , 59,8 μm , 55,1 μm ve 49,2 μm olarak belirlenmiştir. 10 mm kalınlığındaki basamakta ise bu değerler 58,4 μm , 64,2 μm , 59,6 μm ve 53,4 μm olarak ölçülmüştür. 15 mm kalınlığındaki basamağın SDAL değerleri sırasıyla 68,2 μm , 73,8 μm , 70,2 μm ve 68,4 μm olarak kaydedilmiştir. 20 mm kalınlığındaki basamak için SDAL değerleri ise 82,4 μm , 85,6 μm , 81,2 μm ve 72,3 μm olarak tespit edilmiştir. İlavesiz A356 alaşımı için 5, 10, 15 ve 20 mm kalınlıktaki basamaklara karşılık gelen SDAL değerleri sırasıyla 48 μm , 58 μm , 68 μm ve 82 μm olarak ölçülmüştür. Aynı artış eğilimi, 0,03 Er, 0,06 Er ve 0,1 Er ilaveli örneklerde de gözlenmiştir. Soğuma hızının artması (kesit kalınlığının azalması) ile SDAL ve SDAS değerlerinde azalma olduğu belirlenmiştir. Elde edilen veriler, daha önce yapılan döküm çalışmaları ile uyum içindedir ve soğuma hızının, A356 alaşımlarının mikroyapısal özelliklerini belirlemede önemli bir faktör olduğunu doğrulamaktadır.

Ayrıca Er ilavesi ile ilgili elde edilen sonuçlarda A356 ve diğer alüminyum alaşımlarında yapılan önceki döküm çalışmalarıyla tutarlıdır. Er ilavesi, α -Al tanelerinin boyutunda belirgin bir küçülmeye yol açmıştır. Shi ve ark. tarafından yapılan araştırmalarda, farklı Er ilave miktarlarının A356 alüminyum alaşımlarında nasıl değişiklikler yarattığı incelenmiştir. Araştırma sonuçlarına göre, ilavesiz α -Al tanelerinin boyutu ortalama 85,6 μm iken, %0,1 Er ilavesi bu değeri 57,3 μm 'ye düşürmüştür. Er ilave miktarının %0,2'ye çıkarılması, α -Al tanelerinin boyutunu 42,6 μm 'ye indirirken, %0,3 Er ilavesi ile en düşük değer olan 22,2 μm 'ye ulaşmıştır. Ancak, %0,4 Er ilavesi ile α -Al taneleri boyutunda tekrar bir artış gözlemlenerek 47,1 μm olmuştur. Bu veriler, Er ilavesinin belirli bir noktaya kadar α -Al tanelerinin küçülmesinde etkili olduğunu göstermektedir (Shi vd., 2015).

Mikroyapının oluşumunda önemli bir diğer faktör ise sıvı metalin soğuma hızıdır, çünkü artan katılaşma hızı mikroyapıda incelmeye neden olmaktadır. Bu çalışmada, soğuma hızının etkilerini araştırmak amacıyla, farklı Er oranlarında ve ilavesiz A356 alaşımlarının dökümleri basamak kalıplarında gerçekleştirilmiştir. Basamak kalınlıkları 5 mm ile 20 mm arasında değişmekte olup, ince basamaklarda soğuma hızının daha yüksek, kalın basamaklarda ise daha düşük olması beklenmektedir.

Sheykh-Jaberi ve arkadaşlarının araştırması, soğuma hızının A356 alüminyum alaşımının mikroyapısı üzerindeki etkilerini kapsamlı bir şekilde incelemiştir. Çalışmada, farklı soğuma hızlarıyla elde edilen mikroyapısal değişiklikler analiz edilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, 1,8 K/s soğuma hızında SDAS değeri 43 μm , 0,12 K/s soğuma hızında 90 μm ve 0,08 K/s soğuma hızında ise 124 μm olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, soğuma hızının azalmasıyla birlikte SDAS değerlerinde belirgin bir artış olduğunu göstermektedir (Sheykh-Jaberi vd., 2019)

Jeon ve Bae, soğuma hızının mikroyapı üzerindeki etkilerini inceleyerek kesit kalınlıkları 5, 10, 15 ve 20 mm olan bir kum kalıp kullanmışlardır. Bu kalınlıklara denk gelen soğuma hızları sırasıyla 1,9, 0,8, 0,5 ve 0,3 K/s olarak belirtilmiştir. Bu soğuma hızları için SDAS değerleri sırasıyla 30, 40, 55 ve 70 μm olarak belirlenmiştir (Jeon & Bae, 2019).

3.4. MEKANİK TEST SONUÇLARI

3.4.1. Çekme Test Sonuçları

Deneyisel çalışmada, A356 alüminyum alaşımının Er ilavesiz hali ile %0,03, %0,06 ve %0,1 oranlarında Er ilave edilerek üretilen döküm numuneleri, mekanik testler için değerlendirilmiştir. Bu amaçla, mekanik test kalıbından elde edilen test numuneleri çekme testi ve sertlik ölçümleri için kullanılmıştır. Deney sonucunda, her bir dökümden alınan numuneler, Er ilavesinin alaşımın mekanik özelliklerine etkisini incelemek üzere test edilmiştir. Şekil 25’de, mekanik test kalıbından çıkan örnek bir döküm numunesinin görseli verilmiştir.



Şekil 25: Mekanik Test Kalıbı Döküm Numunesi Görüntüsü

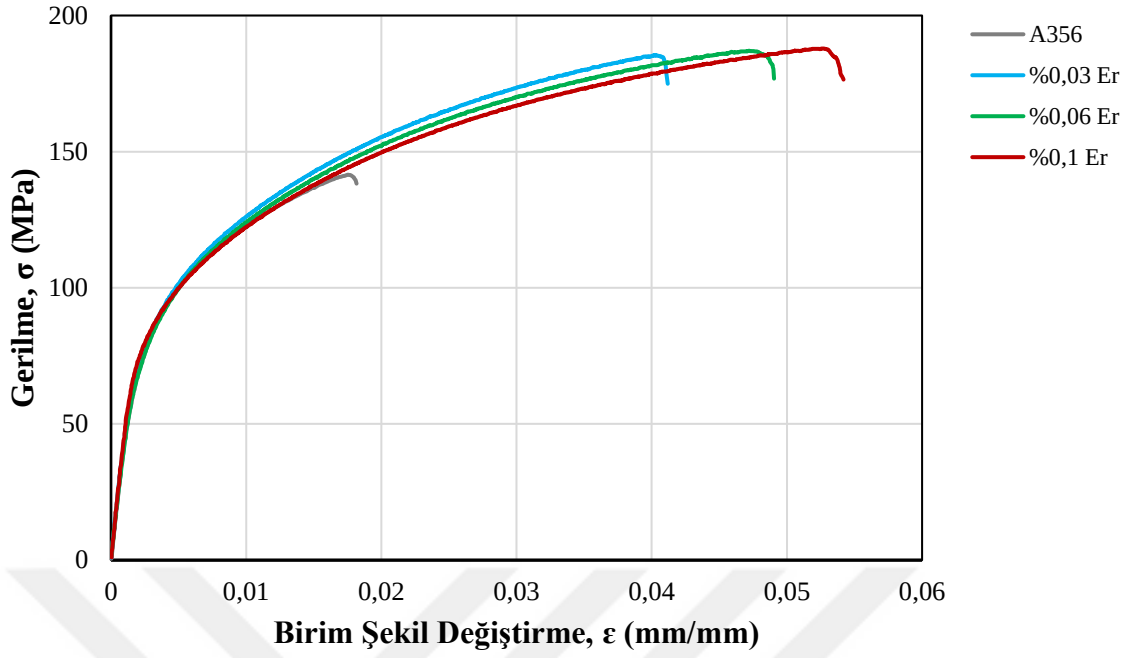
Deneysel çalışmanın sonuçlarına ilişkin olarak, çekme testi sonuçları Tablo 10’da sunulmuştur. Her bir döküm için en az üç numune üzerinde testler yapılmış olup, verilerin güvenilirliğini sağlamak amacıyla numune sayısı yeterli düzeyde tutulmuştur. Tabloda yer alan değerler, her bir döküm için elde edilen ortalama çekme testi sonuçlarını ifade etmektedir.

Tablo 10: Çekme Test Deneyi Sonuçları

Numune Adı	Maksimum Gerilme (MPa)	Akma Mukameveti (MPa)	% Uzama	Young Modulu (Gpa)	Tokluk (kJ/m ³)
İlavesiz A356	141,5263	91,426	1,043	44,565	2122,745
%0,03 Er İlaveli	185,4471	93,028	2,351	43,458	6353,181
%0,06 Er İlaveli	187,0736	92,718	2,796	40,241	7758,02
%0,1 Er İlaveli	187,8793	91,752	3,102	45,784	8966,548

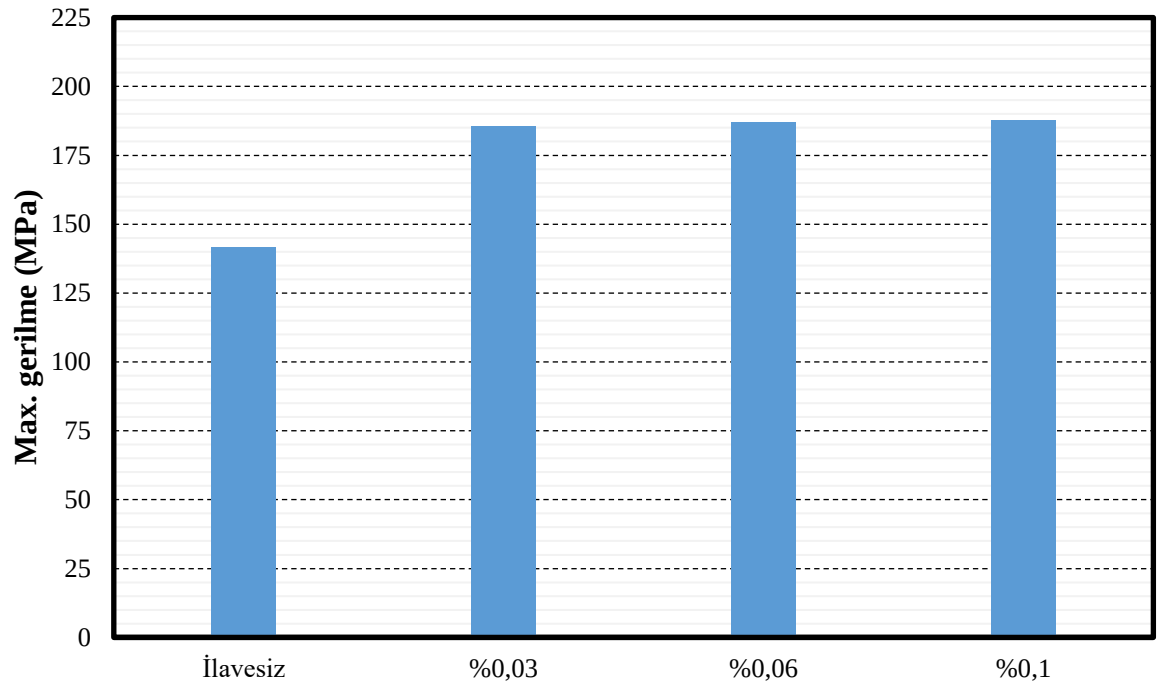
Tablo 10’da sunulan veriler, maksimum çekme gerilmesi, akma mukavemeti, yüzde uzama, Young modülü ve tokluk değerlerini kapsamaktadır. İncelemeler, çekme gerilmesinin ilavesiz dökümlerde 141,52 MPa olduğunu, %0,03 Er ilavesiyle 185,44 MPa’ya, %0,06 Er ilavesiyle 187,07 MPa’ya ve %0,1 Er ilaveli dökümlerde 187,88 MPa’ya yükseldiğini göstermektedir. Akma mukavemeti açısından ilavelerin belirgin bir etkisi gözlemlenmemiş olup, değerler 91-93 MPa aralığında seyretmiştir. İlavesiz dökümlerde %1,043 olan yüzde uzama, %0,03 Er ilavesiyle %2,351’e, %0,06 Er ilavesiyle %2,796’ya ve %0,1 Er ilavesiyle %3,10’a yükselmiştir. Tokluk değerleri açısından da Er ilavesinin alaşıma pozitif katkı sağladığı belirlenmiştir. İlavesiz A356 alaşımında 2122 kJ/m³ olan tokluk değeri, %0,1 Er ilavesiyle 8966 kJ/m³ ‘e kadar artmıştır. Şekil 26’da ise gerilme-birim şekil değişimi grafiği ayrıntılı olarak sunulmaktadır.

Çekme Testi Grafiği

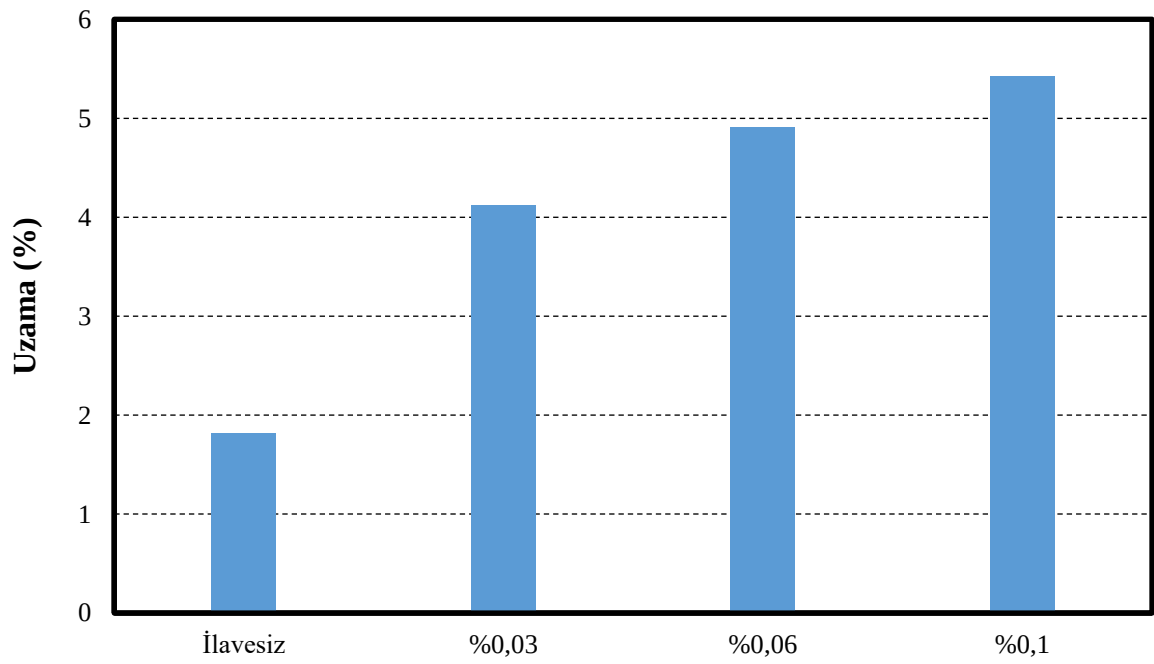


Şekil 26: Döküm Deneylerine Ait Gerilme Birim Şekil Değişirme Grafikleri

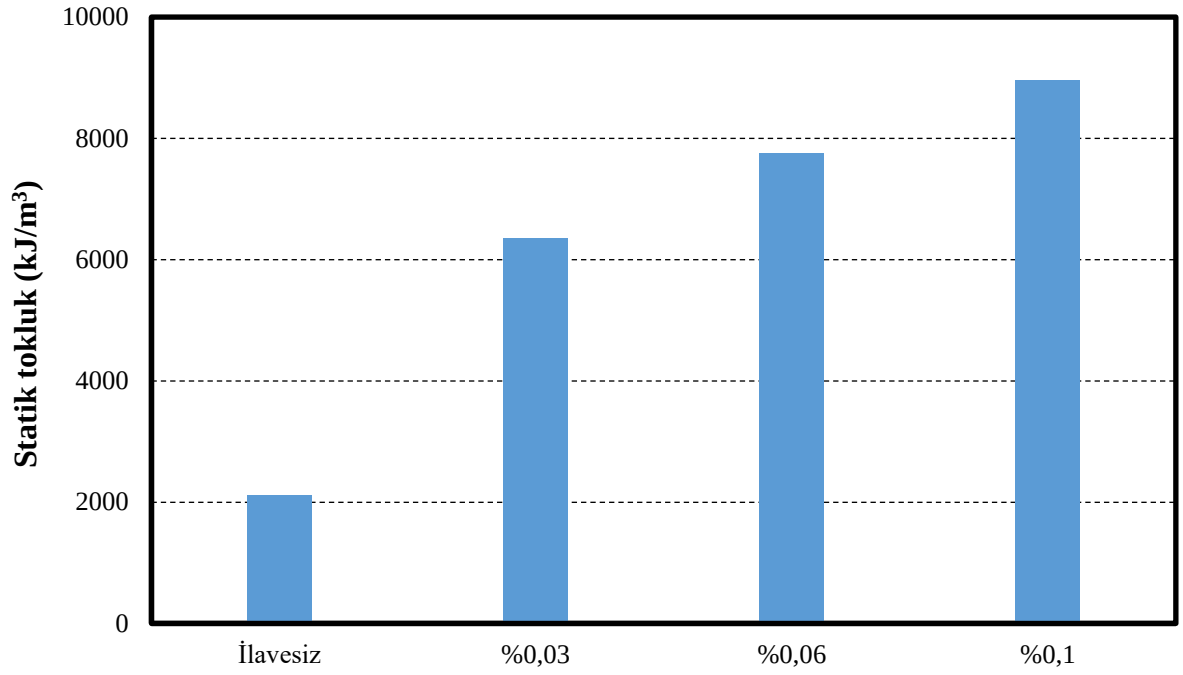
Şekil 26’da yer alan grafik incelendiğinde, Er ilavesinin gerilme ve şekil değişirme üzerindeki belirgin etkileri açıkça görülmektedir. A356 alüminyum alaşımına Er elementi ilavesi, tüm örneklerde çekme dayanımını artırmıştır. En yüksek çekme dayanımı, en yüksek Er ilave oranına sahip dökümlerde elde edilmiştir. Bu sonuçlar, Er ilavesinin A356 alaşımının mekanik özelliklerini iyileştirdiğini ve çekme gerilmesine olumlu katkı sağladığını göstermektedir. Ayrıca, Şekil 27’de çekme testlerinden elde edilen maksimum gerilme değerleri, Şekil 28’de % uzama ve Şekil 29’de tokluk değerlerinin Er ilavesi ile nasıl değiştiği grafiklerle detaylandırılmıştır. Bu veriler, Er ilavesinin alaşımın genel performansını nasıl etkilediğini kapsamlı bir şekilde ortaya koymaktadır.



Şekil 27: Er İlavesine Bağlı Olarak Maksimum Gerilme Değerleri Değişimi



Şekil 28: Er İlavesine Bağlı Olarak % Uzama Değerleri Değişimi



Şekil 29: Er İlavesine Bağlı Olarak Statik Tokluk Değerleri Değişimi

Yapılan analizler, Er ilavesinin A356 alüminyum alaşımının mekanik özelliklerine olan etkisini açıkça göstermektedir. Şekillerde verilen verilere göre, çekme gerilmesi değerleri ilavesiz dökümlerde 141,52 MPa iken, %0,03 Er ilavesinde 185,44 MPa, %0,06 Er ilavesinde 187,07 MPa ve %0,1 Er ilavesinde 187,88 MPa olarak ölçülmüştür. Bu veriler, Er ilavesinin çekme dayanımını artırdığını göstermektedir.

Ayrıca, %uzama değerleri incelendiğinde, Er ilavesinin malzemenin sünekliğini iyileştirdiği görülmüştür. İlavesiz dökümde %1,816 olan uzama oranı, %0,03 Er ilavesi ile %4,118'e, %0,06 Er ilavesi ile %4,905'e ve %0,1 Er ilavesi ile %5,42'e çıkmıştır. Bu, Er ilavesinin sünekliği artırarak malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini geliştirdiğini göstermektedir.

Tokluk değerlerine bakıldığında, Er ilavesinin A356 alaşımına önemli ölçüde olumlu katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. İlavesiz alaşımda 2122 kJ/m³ olan tokluk değeri, %0,03 Er ilavesi ile 6353 kJ/m³, %0,06 Er ilavesi ile 7758 kJ/m³ ve %0,1 Er ilavesi ile 8966 kJ/m³ olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, Er ilavesinin alaşımın enerji absorbe etme kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır.

Er ilavesinin Al-Si-Mg alaşımlarının mekanik özellikleri üzerindeki etkileri konusunda yapılan araştırmalar, elde edilen sonuçların literatürdeki verilerle tutarlı olduğunu göstermektedir. Literatürde yer alan çalışmalara göre, Er ilavesi alaşımların mekanik özelliklerini iyileştirebilmektedir. Özellikle düşük oranlarda Er ilavesi, alaşımın dayanımını artırmakta ve malzemenin sünekliğini geliştirmektedir. Bununla birlikte, yüksek miktarlarda Er

ilavesinin mekanik özellikler üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği de belirtilmektedir. Bu bulgular, Er ilavesinin dikkatli bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini ve uygun miktarların kullanılmasıyla Al-Si-Mg alaşımlarının performansının önemli ölçüde artırılabilirliğini göstermektedir (Colombo vd., 2017).

Pandee ve arkadaşları yaptıkları çalışmada Er elementinin Al-7Si-0.3Mg döküm alaşımına eklenmesi, çekme mukavemetini artırmak için etkili bir yöntem olarak incelenmiştir. Özellikle %0,2 Er eklenmesi, dökümün çekme mukavemetini önemli ölçüde iyileştirirken, bu iyileşme mikroyapının optimize edilmesiyle ilişkilidir. Ancak, daha yüksek Er miktarları eklenmesi durumunda, Er içeren intermetalik fazların oluşumu artar ve bu da çekme mukavemetinin hafifçe azalmasına sebep olabilir. Bu nedenle, Er eklemelerinin miktarı ve süreci dikkatlice kontrol edilmelidir, böylece alaşımın mekanik özellikleri maksimum düzeyde korunabilir (Pandee vd., 2017).

Wen ve arkadaşlarının yaptıkları çalışmalarda, Er elementinin Al-Mg-Mn-Zr alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisi incelenmiştir. Özellikle %0,2 ağırlık oranında Er eklenmesi, ikincil Al₃Er çökeltilerinin oluşumunu teşvik ederek alaşımın çekme mukavemetini %50 oranında artırmakta ve yeniden kristalleşme sıcaklığını 25°C kadar yükseltmektedir. Bu çökeltiler, yüksek sıcaklıklarda dahi mukavemet sağlayarak malzemenin performansını iyileştirmektedir. Bununla birlikte, Er miktarının artması, birincil Al₃Er oluşumuna neden olarak tane sınırlarında istenmeyen yapılar oluşturmakta ve bu da mekanik özellikler üzerinde olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle, optimum Er oranının belirlenmesi, alaşımların mekanik performansını maksimize etmek için kritik bir öneme sahiptir (Wen vd., 2009).

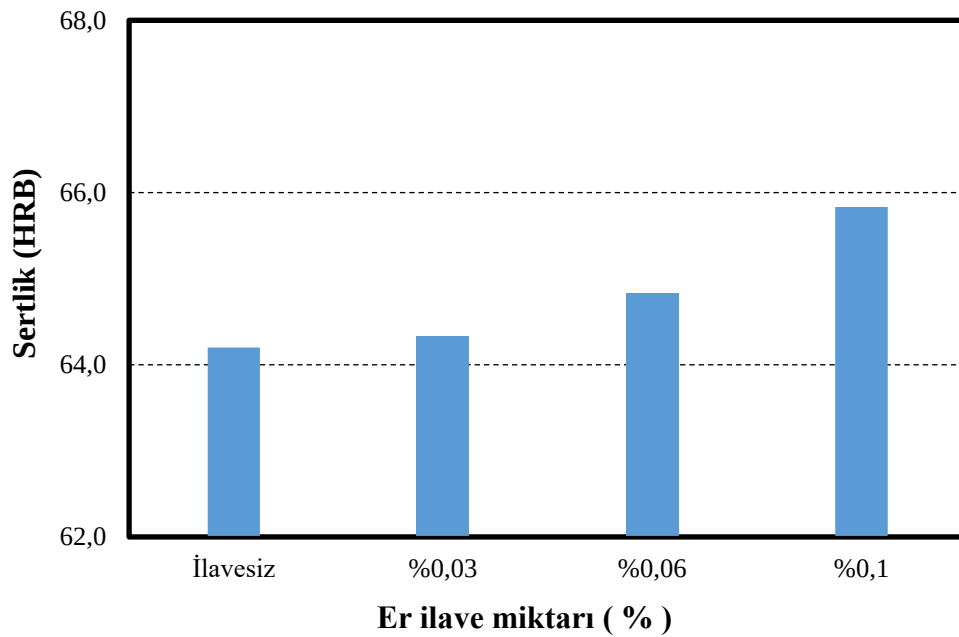
3.4.2. Sertlik Test Sonuçları

İlavesiz A356 alaşımı ile farklı oranlarda Er ilavesi yapılan sıvı metal dökümlerinden elde edilen numunelerin sertlik ölçümleri Brinell yöntemiyle oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Bu testlerde HRB metodunu kullanarak, 1,6 mm çapında bir bilye ve 2,5 kgf ön yük ile 62,5 kgf toplam yük uygulanmıştır. Her bir numuneden en az altı ölçüm alınmış ve bu ölçümlerin ortalaması alınarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Tablo 11’de, döküm deney numunelerinin sertlik ölçüm sonuçları detaylı olarak sunulmuştur. Ölçümler sırasında, istatistiksel olarak anormal olan çok yüksek ya da çok düşük değerler, ortalamalara dahil edilmeden dikkate alınmamıştır. Bu durumda, elde edilen sonuçların doğruluk ve güvenilirlik düzeyini artırmıştır.

Tablo 11: Sertlik Ölçüm Sonuçları

Numune adı	Sertlik (HRB) değerleri					
İlavesiz	62	63	66	54	66	64
% 0,03 Er ilaveli	66	62	66	63	62	67
% 0,06 Er ilaveli	64	62	65	68	66	64
% 0,1 Er ilaveli	67	66	67	66	61	68

Tablo 11’deki veriler incelendiğinde, tüm değerlerin ilgili alaşım için belirlenen sınırlar içinde olduğu görülmektedir. Er ilavesi yapılan numunelerde sertlik sonuçlarının birbirine oldukça yakın olduğu ve önemli bir farklılık göstermediği belirlenmiştir. Er ilavesinin alaşımın sertlik özelliklerinde belirgin bir değişiklik yaratmadığı gözlemlenmiştir. Hafif bir artış kaydedilse de, bu artışların istatistiksel olarak anlamlı olmadığı düşünülmektedir. Şekil 30’da, değişen Er oranlarına bağlı olarak elde edilen sertlik sonuçlarının grafiksel gösterimi sunulmuştur, bu grafikler de sonuçların tutarlılığını ve Er ilavesinin sınırlı etkisini görsel olarak desteklemektedir.

**Şekil 30:** Er İlavesine Bağlı Olarak Sertlik Testi Sonuçlarının Grafik Gösterimi

Şekil 30’daki veriler incelendiğinde, ortalama sertlik değerlerinin ilavesiz dökümde 64,2 HRB, %0,03 Er ilaveli dökümde 64,33 HRB, %0,06 Er ilaveli dökümde 64,83 HRB ve %0,1 Er ilaveli dökümde 65,83 HRB olduğu belirlenmiştir. Er ilavesinin sertlik üzerinde hafif bir artışa yol açtığı gözlemlenmesine karşın, artışların istatistiksel olarak anlamlı olmadığı ve alaşımın sertliğindeki artış ise, Er ilavesinin tane inceltici etkisinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Sonuç olarak, Er ilavesinin sertlik özellikleri üzerinde minimal bir etkisi

olduğunu ve pratik uygulamalar açısından belirgin bir iyileşme sağlamadığını göstermektedir. Yapılan literatür çalışmaları da bu sonuçları destekler şekildedir.

Chen ve arkadaşları, Al–Cu–Mg–Er alaşımının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla cilalanmış örnekler üzerinde Vickers sertlik ölçümleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışmada, 3 kg yük altında en az 10 bağımsız ölçüm alınarak elde edilen sonuçlara göre, Al–Cu–Mg–Er alaşımının sıcak hadde levhasının Vickers sertlik değerini yaklaşık olarak 91 HV olarak ölçülmüştür. Bu sonuçlar, benzer koşullarda ölçülen Al–Cu–Mg alaşımının sertlik değeri olan 98 HV'den düşük olduğunu göstermektedir. Ayrıca, Al–Cu–Er alaşımında gözlemlenen Al₈Cu₄Er fazının varlığı, Al–Cu alaşımının temel sertleştirici bileşeni olan Al₂Cu fazının miktarında bir azalmaya yol açmıştır. Bu durum, alaşımın sertlik değerlerinde azalmaya neden olmuştur (Chen vd., 2010).

Gao ve diğerleri tarafından yapılan çalışmada, Zr veya Er eklenmesinin alaşımların sertliğini artırdığı belirtilmektedir. Araştırmalar, Al–0,2Zr alaşımının saf alüminyuma göre %20 daha yüksek sertlik gösterdiğini ortaya koymaktadır. Al–0,2Er alaşımının sertliğindeki artış ise, alaşımın tane rafinasyonu sayesinde ince taneli güçlendirme etkisinden kaynaklandığı belirtilmektedir. Saf alüminyuma hem %0,2 Zr hem de %0,2 Er eklenmesinin, alaşımın sertliğinde önemli bir artış sağladığı ve bu artışın hem ince taneli güçlendirme hem de çözelti güçlendirme mekanizmalarıyla ilişkili olduğu sonucuna varılmıştır (Gao vd., 2013).

SONUÇ

Bu araştırma, A356 alüminyum alaşımının kokil kalıba dökümünde Er katkısının farklı oranlarda (%0,03 - %0,06 - %0,1) eklenmesiyle elde edilen döküm sonuçlarını incelemektedir. Çalışmada, Er ilavesinin alaşımın akıcılık, mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri detaylı olarak değerlendirilmiştir. Deneysel çalışmaların bulguları, aşağıdaki bölümde sistematik bir şekilde sunulmuştur.

- Er ilavesinin etkisini değerlendirmek amacıyla dökümlerde gaz kaynaklı hataları en aza indirmek için sıvı metal kalitesi, RPT ve Kmold kalıpları kullanılarak test edilmiştir. Elde edilen deneysel numunelerde, RPT numunelerinin yoğunluk ölçümlerinde %0,5'in altında gözeneklilik ve Kmold kalıplarında K değerinin 1'in altında olduğu belirlenmiştir. Bu sonuçlara dayanarak, gaz hatalarının ortadan kaldırılması için sıvı metalin azot gazı ile 5 dakika süreyle temizlenmesi işleminden sonra metalin gerekli kaliteye ulaştığı doğrulanmıştır.
- Er ilavesinin A356 alüminyum alaşımının akıcılığı üzerindeki etkisini belirlemek amacıyla spiral ve farklı kesit kalınlıklarına sahip dört kanallı akıcılık kalıpları kullanılarak döküm deneyleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda, kesit kalınlığı arttıkça sıvı metalin ilerleme mesafelerinin de arttığı gözlemlenmiştir. Ancak, Er ilavesinin akışkanlık üzerinde olumsuz etkiler yaratabileceği de tespit edilmiştir. Bu bağlamda, Er ilavesinin A356 alüminyum alaşımının akışkanlığı üzerindeki etkilerini değerlendirirken, döküm parametreleri, porozite oluşumu ve genel döküm performansı gibi faktörlerin dikkatlice incelenmesi gerekmektedir. Özellikle yüksek Er içeriği, akışkanlığı olumsuz etkileyebileceğinden, Er ilavesinin miktarı dikkatlice ayarlanmalı ve döküm sürecine uygun bir şekilde ilave edilmelidir.
- Yapılan analizler, Er ilavesinin A356 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerinde belirgin etkileri olduğu net bir şekilde tespit edilmiştir. Çekme gerilmesi değerleri ilavesiz dökümlerde 141,5 MPa iken, %0,03 Er ilavesinde 185,4 MPa, %0,06 Er ilavesinde 187,0 MPa ve %0,1 Er ilavesinde 187,8 MPa olarak ölçülmüştür. Bu veriler, Er ilavesinin çekme dayanımını artırdığını göstermektedir.
- Uzama değerleri incelendiğinde, Er ilavesinin malzemenin sünekliğini iyileştirdiği görülmüştür. İlavesiz dökümde %1,816 olan uzama oranı, %0,03 Er ilavesi ile %4,118'e, %0,06 Er ilavesi ile %4,905'e ve %0,1 Er ilavesi ile %5,42'e çıkmıştır. Bu, Er ilavesinin sünekliği artırarak malzemenin şekil değiştirme kabiliyetini geliştirdiğini göstermektedir.

- Tokluk değerlerine bakıldığında, Er ilavesinin A356 alaşımına önemli ölçüde olumlu katkıda bulunduğu tespit edilmiştir. İlavesiz alaşımda 2122 kJ/m³ olan tokluk değeri, %0,03 Er ilavesi ile 6353 kJ/m³, %0,06 Er ilavesi ile 7758 kJ/m³ ve %0,1 Er ilavesi ile 8966 kJ/m³ olarak belirlenmiştir. Bu bulgular, Er ilavesinin alaşımın enerji absorbe etme kapasitesini artırdığını ortaya koymaktadır.
- Ortalama sertlik verileri incelendiğinde, değerlerinin ilavesiz dökümde 64,2 HB, %0,03 Er ilaveli dökümde 64,33 HB, %0,06 Er ilaveli dökümde 64,83 HB ve %0,1 Er ilaveli dökümde 65,83 HB olduğu belirlenmiştir. Er ilavesinin sertlik üzerinde hafif bir artışa yol açtığı gözlemlenmiş olsa da, bu artışların istatistiksel olarak anlamlı olmadığı ve alaşımın sertliğindeki artış ise, Er ilavesinin tane inceltici etkisinden kaynaklandığı düşünölmektedir. Sonuç olarak, Er ilavesinin sertlik özellikleri üzerinde minimal bir etkisi olduğunu ve pratik uygulamalar açısından belirgin bir iyileşme sağlamadığını göstermektedir.

KAYNAKÇA

- Adams, R.C. (1998). *ASM volume (15) Casting. Technology* (C. 15).
- Alım, B. (2017). *Tavlama Sıcaklığı, Basınç ve Dış Manyetik Alanın Şekil Hafızalı Nanoalaşımların X-Işını Şiddet Oranları ve Valens Elektron Yapıları Üzerine Etkilerinin İncelenmesi* (Doktora Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 498409)
- Al-Saadi, H. I. A., & Tunay, R. F. (2017). Suni Yaşlandırma İşleminin Alüminyum Alaşımının Sertliği Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(3), 525–532.
- Anson, J.P., & Gruzleski, J.E. (1999). Effect of Hydrogen Content on Relative Shrinkage and Gas Porosity in Al-7% Si Casting. *AFS Transactions*, 135-140.
- Aydoğan, F., Dizdar, K. C., Sahin, H., Mentese, E., & Dispınar, D. (2022). Mechanical property comparison of Al11Si wheels grain refined by Ti, Nb and MTS. *Archives of Foundry Engineering*, 14-18.
- Balaban, C., Şen, Ö., Özer, G. & Güler, K.A. (2020). 380 alaşımlarının soğuma eğrisinde ve akışkanlığında tane inceltmenin etkisi.
- Balaram, V. (2019). Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1285-1303.
- Başer, T. A. (2013). Alüminyum alaşımları ve otomotiv endüstrisinde kullanımı. *Mühendis ve Makina*, 51-58.
- Brown, J. R. (1999). Foseco Non-Ferrous Foundryman's. *Foseco Non-Ferrous Foundryman's Handbook*, /11, 28–38.
- Car, E. (2019). Birincil alüminyum üretimine genel bir bakış. *Metalurji Dergisi*, 156, 34-48
- Celep, O., & Deveci, H. (2021). Nadir toprak elementlerinin birincil ve ikincil kaynaklardan üretimi. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 264-280.
- Chen, X., Liu, Z., Bai, S., Li, Y., & Lin, L. (2010). Alloying behavior of erbium in an Al–Cu–Mg alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 505(1), 201-205.
- Colombo, M., Gariboldi, E., & Morri, A. (2017). Er addition to Al-Si-Mg-based casting alloy: Effects on microstructure, room and high temperature mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 708, 1234-1244.
- Cook, R. (1998). Grain refinement of aluminium–silicon foundry alloys. *London: London & Scandinavian metallurgical Co. Limited*, 9-12.
- Diné, P. (2016). Yttrium from ytterby. *Nature Chemistry*, 8(2), 192-192.
- Epstein, S. G., Kaufman, J. G., & Pollak, P. (1994). Aluminum and its Alloys. *Aluminum Association*.
- European Aluminium Association TALAT Lecture 1501, (1994). Aluminum: Physical properties, Characteristics and Alloys, Ron Cobden, Banbury.
- Gao, Z., Li, H., Lai, Y., Ou, Y., & Li, D. (2013). Effects of minor Zr and Er on microstructure and mechanical properties of pure aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 580, 92-98.
- Gyarmati, G., Fegyverneki, G., Molnár, D., & Tokár, M. (2019). The melt cleaning efficiency of different fluxes and their effect on the eutectic modification level of AlSi7MgCu alloy. *Livarski Vestnik*, 66(2), 70-87.

- Jeon, J. H., & Bae, D. H. (2019). Effect of cooling rate on the thermal and electrical conductivities of an A356 sand cast alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 808, 151756.
- Karakışlak, M. (1992). *Alüminyum Alaşımları ve Isıl İşlemleri*. İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji Fakültesi, İstanbul.
- Kaufman, J. G., & Rooy, E. L. (2004). Aluminum Alloy Properties , Processes , and Applications. *Aluminum Alloy Castings: Properties, Processes, and Applications* (ss. 1-65).
- Kissell, J. R. (1996). Aluminum and its Alloys. *Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers*, 6-53.
- Pandey, P., Patakhram, U., & Limmaneevichitr, C. (2017). Microstructural evolution and mechanical properties of Al-7Si-0.3 Mg alloys with erbium additions. *Journal of Alloys and Compounds*, 728, 844-853.
- Piguet, C. (2014). Extricating erbium. *Nature chemistry*, 6(4), 370-370.
- Ravi, K. R., Pillai, R. M., Amaranathan, K. R., Pai, B. C., & Chakraborty, M. (2008). Fluidity of aluminum alloys and composites: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 456(1-2), 201-210.
- Rosalbino, F., Angelini, E., De Negri, S., Saccone, A., & Delfino, S. (2005). Effect of erbium addition on the corrosion behaviour of Mg-Al alloys. *Intermetallics*, 13(1), 55-60.
- Savaş, Ö. (2005). *Alüminyum-silisyum döküm alaşımlarında mikro porozite oluşumuna etki eden faktörlerin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 168036)
- Shakhashiri. (2000). Chemical of the week Aluminium. *General Chemistry*, 2(1), 2-3.
- Sharma, R., & 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(1-2), 274-280.
- Sheykh-Jaberi, F., Cockcroft, S. L., Maijer, D. M., & Phillion, A. B. (2019). Comparison of the semi-solid constitutive behaviour of A356 and B206 aluminum foundry alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 266, 37-45.
- Shi, Z. M., Wang, Q., Zhao, G., & Zhang, R. Y. (2015). Effects of erbium modification on the microstructure and mechanical properties of A356 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 626, 102-107.
- Sigworth, G.K. (1983), Theoretical and Practical Aspects of the Modification of Aluminium-Silicon Alloys. *AFS Transactions*, 91, 7-16.
- Tokatlı, M., Saydam, F., Hal, M., Koşatepe, A., Çolak, M., & Yüksel, Ç. (2022). Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Yaygınca Kullanılan Sıvı Metal Temizleme Yöntemlerinin İncelenmesi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(1), 423-434.
- Torabian, H., Pathak, J. P., & Tiwari, S. N. (1994). On wear characteristics of leaded aluminium-silicon alloys. *Wear*, 177(1), 47-54.
- Totten, G. E., & MacKenzie, D. S. (Eds.). (2003). *Handbook of aluminum: vol. 1: physical metallurgy and processes* (Vol. 1). CRC press.
- Töre, C. (2012). Mekanik Tasarımda Alüminyum ve Özellikleri, *Makine Mühendisleri Odası*, Ankara.

- Turhan, S. (2002). *Aluminyumun Mekanik Özelliklerine ve Aşınma Davranışına Magnezyumun ve Silisyumun Etkisi* (Yüksek Lisans Tezi). Yükseköğretim Kurulu Ulusal Tez Merkezi'nden edinilmiştir. (Tez No. 126688)
- Uludağ, M., Cetin, R., Dişpınar, D., & Tiryakioğlu, M. (2018). On the interpretation of melt quality assessment of A356 aluminum alloy by the reduced pressure test: the bifilm index and its physical meaning. *International Journal of Metalcasting*, 12, 853-860.
- Walters, A., & Lusty, P. (2011). Rare earth elements. *Metals Handbook Volume 4 Heat Treatment*. (1989). 743-770, Ohio: ASM International.
- Wen, S. P., Xing, Z. B., Huang, H., Li, B. L., Wang, W., & Nie, Z. R. (2009). The effect of erbium on the microstructure and mechanical properties of Al–Mg–Mn–Zr alloy. *Materials Science and Engineering: A*, 516(1-2), 42-49.
- Zeytin, H. (2000). Alüminyum alaşımları otomotiv endüstrisinde uygulamaları ve geleceği. *MAM MKTAE Proje*, (50H5602).



ÖZ GEÇMİŞ

■■■■■■■■■■ tarihinde ■■■■■■■■■■ doğdum. İlköğrenimimi Erzurum'da tamamladıktan sonra ortaöğrenimimi İstanbul'da sürdürdüm ve lise eğitimimi yılında Atakent Lisesi'nde başarıyla tamamladım. Yozgat Bozok Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nden mezun olduktan sonra, mühendislik kariyerime Bayburt Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölümü'nde Tezli Yüksek Lisans programına devam ederek başladım. yılında Ağaoğlu Havacılık ve Savunma Sanayi şirketinde makina mühendis olarak göreve başladım ve halen bu görevimi sürdürmekteyim.

