





ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINA DAİR SON YILLARDAKİ AKADEMİK VE ENDÜSTRİYEL GELİŞMELERE GENEL BAKIŞ VE DEĞERLENDİRME

Tuğçe YAĞCI *,** 
Ümit CÖCEN * 
Osman ÇULHA ** 
Adem KORKMAZ ** 

Alınma: 18.02.2021; düzeltme: 15.11.2021; kabul: 16.11.2021

Öz: Alüminyum döküm alaşımları; hafifletme, enerji tasarrufu, geri dönüşüm ve çevre duyarlılığı gibi ülkemizin ve Dünya'nın öncelikli çalışma alanlarında yer alan konular göz önüne alındığında, endüstrinin gözde alaşım grubunu temsil etmektedir. Son yıllarda başta otomotiv ana ve yan sanayisi olmak üzere, havacılık, uçak ve uzay endüstrisinde kullanım alanlarının artmasıyla, alüminyum alaşımlarının sahip olduğu mukavemet, sertlik, kırılma tokluğu, yorulma ömrü gibi birtakım özelliklerin geliştirilmesi ihtiyaç haline gelmiştir. Alüminyum döküm endüstrisindeki teknolojik ilerlemeler, dönemin malzemesinin gelişimi ile paralellik gösterdiğinden, ürün ve sektör çeşitliliğinin artışı, alaşımların sahip oldukları özellikler sınırlandırmaktadır. Bu amaca yönelik olarak gerek akademik gerekse endüstriyel ölçekte pek çok çalışma yapılmış ve literatüre kazandırılmıştır. Bu çalışmada, alüminyum döküm alaşımları ile ilgili özellikle son yıllarda yapılan ulusal ve uluslararası araştırma makaleleri derlenmiştir. Makaleler, mikroyapısal ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesine yönelik çalışmalar, tane inceltme ve modifikasyon çalışmaları, alüminyum dökümde hesaplamalı malzeme mühendisliği ve bilgisayar destekli simülasyon çalışmaları olmak üzere üç alt başlıkta sunulmuştur. Ayrıca, derleme çalışmasının son bölümünde alüminyum döküm endüstrisine yönelik, son yıllarda yayınlanan arge, inovasyon ve rekabetçilik konulu raporlara dayanarak, küresel ölçekte alüminyum döküm endüstrisinde ülkemizin statik ve dinamik durumuyla ilgili güncel bilgiler ve istatistik verileri aktarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: alüminyum alaşımları, döküm, tane inceltme, modifikasyon, mekanik özellikler, hesaplamalı malzeme mühendisliği, simülasyon.

Overview and Evaluation of Academic and Industrial Developments in Last Years on Aluminum Casting Alloys

Abstract: Aluminum casting alloys represents the industry's favorite alloy group, considering the issues in our country's and the world's priority research areas such as lightening, energy saving, recycling and environmental awareness. In recent years, it has become a necessity to develop some properties of aluminum alloys such as strength, hardness, fracture toughness, fatigue life, with the increase in usage areas in the aviation, aircraft and space industries, especially in the automotive key and sub-industry. As the technological advances in the aluminum casting industry are in parallel with the development of the material of the period, the increase in product and sector diversity limits the properties of alloys. For this purpose, many studies have been done on both academic and industrial scale and have been added to the literature. In this study, national and international research articles on aluminum casting alloys, especially in recent years, are reviewed. The articles are presented under three subheadings: studies for improving

* Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 35410, İzmir/Türkiye

** Manisa Celal Bayar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği, 45140, Manisa/Türkiye

Tuğçe Yağcı (tugce.yagci@cbu.edu.tr)

microstructural and mechanical properties, grain refinement and modification studies, computational material engineering in aluminum casting and computer aided simulation studies. In addition, in the last part of the compilation study, based on the reports on R&D, innovation and competitiveness published in the aluminum casting industry in recent years, current information and statistical data about the static and dynamic situation of our country in the aluminum casting industry on a global scale are presented.

Keywords: aluminum alloys, casting, grain refinement, modification, mechanical properties, computational materials engineering, simulation.

1. GİRİŞ

Alüminyum, yer kabuğunda en bol bulunan üçüncü elementtir. Metalik özellik gösteren alüminyum “doğada en çok bulunan metal” unvanını taşımaktadır. Öte yandan, son 50 yıldır demir-çelikten sonra endüstriyel alanlarda en çok kullanılan metaldir. II. Dünya Savaşı ve Sanayi Devrimi sonrasında artan enerji, daha hafif ve yüksek dayanıma sahip komponentler, üretim kolaylığı ve geri dönüşüm ihtiyacı, alüminyumu endüstriyel kullanımda ön plana çıkarmıştır. (Eroğlu ve Şahiner; 2018). Alüminyum alaşımları, sahip oldukları yüksek özgül mukavemet (mukavemet/yoğunluk), korozyon ve aşınma direnci, yüksek elektriksel ve ısı iletkenlik, kolay işlenebilirlik, dökülebilirlik ve çevre dostu gibi özellikleri ile otomotiv ve havacılık endüstrisinde tercih edilmektedir. Üretilen parçaların ağırlıklarının azaltılması ve bunun doğal bir sonucu olarak ortaya çıkan enerji verimliliği, alüminyum alaşımlarını diğer rakiplerine göre üstün kılmaktadır. 1889 yılında mutfak araç gereçleri ile endüstri yolculuğuna başlayan alüminyum; deniz ve havacılık sektörü, konserve kutuları, büyük ölçekli borular, köprü inşaatlarında kendisine kullanım yeri bulmasının ardından, 2000li yıllarda motor blokları, otomotiv jantları, doğalgaz sıvılaştırma üniteleri, zırh plakları üretiminde tercih edilmesi ile serüvenine güçlenerek devam etmektedir (Campbell, 2003; Zhao ve Wu, 2010).

Diğer bir yandan, alüminyum alaşımlarının sahip olduğu fiziksel ve mekanik özellikler göz önüne alındığında gelecek yıllar içinde önemli bir malzeme grubu olacağı düşünülmektedir. Yurtiçi ve Yurtdışında ortaya konulan farklı araştırma çalışmalarında, artan dünya nüfusu, küresel ısınma ve şehirleşme artışı ile birçok bölge ve ülkede alüminyum alaşımlarına olan talebin artması beklenmektedir. (Demirci, M. K., 2011). Dünya üzerinde alüminyum talebinin 2020-2025 yılları arasında %24, 2025-2030 yılları arasında %26 ve 2030-2050 yılları arasında ise %136 oranında artış göstereceği öngörülmektedir. Bu kapsamda, alüminyumun ortaya koyduğu geri dönüşüm avantajı ve çevre dostu bir malzeme olması ve sahip olduğu diğer özellikler, onu geleceğin en parlak malzemesi konumuna getirmektedir (TALSAD, 2020).

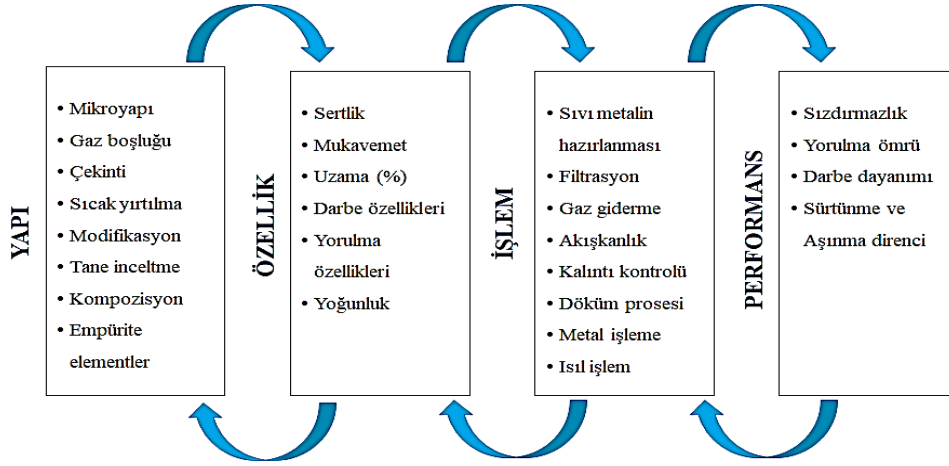
Bu derleme çalışmasında, alüminyum döküm alaşımlarının mikroyapısal ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi, tane inceltme ve modifikasyon işlemlerinin doğası ve gelişimi, hesaplamalı malzeme mühendisliği ve simülasyon destekli tasarım çalışmalarına dair son yıllardaki akademik ve endüstriyel gelişmeler üzerinde durulmuştur. Ayrıca, küresel ölçekte alüminyum döküm endüstrisinde Türkiye'nin yeriyle ilgili istatistiksel bilgiler verilmiştir.

2. ALÜMİNYUM DÖKÜM ALAŞIMLARINDA MİKROYAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİN İYİLEŞTİRİLMESİNE YÖNELİK ARAŞTIRMALAR

Metalurji biliminin temelini teşkil eden, yapı-özellik-işlem-performans ilişkisini oluşturan bileşenler arasında güçlü bir bağ bulunmaktadır. Bir malzemede makro ve mikro yapısal karakter değiştiğinde, malzemenin gösterdiği özellikler, uygun üretim/işleme koşulları ve performans kriterleri buna bağlı olarak değişmektedir. Bu bütünlük ilişkisinin alüminyum döküm süreci ve alaşımları için uyarlanmış hali Şekil 1'de verilmektedir. Buna göre, sıvı metalin hazırlanması, filtrasyon, tane inceltme ve modifikasyon işlemleri, gaz çözünürlüğü ve kalıntı kontrolü, empürite elementleri gibi üretimde yer alan önemli parametrelerde yapılacak değişiklikler, doğrudan malzemenin yapısını, özelliklerini ve performansını etkilemektedir. Şekil 1'de görüldüğü gibi alüminyum dökümü, ergiyik metalin hazırlanmasından son ürüne

kadar içerisinde pek çok parametre kontrolünü aynı anda barındıran karmaşık bir mühendislik işlemidir.

Alüminyum metali, saf halde endüstriyel kullanımda istenilen mekanik gereksinimleri karşılayamadığı için alaşımlandırılarak kullanılmaktadır. Alüminyum başta silisyum (Si) olmak üzere, magnezyum (Mg), bakır (Cu), çinko (Zn), titanyum (Ti), bor (B), stronsiyum (Sr), mangan (Mn), demir (Fe) gibi pek çok element ile alaşım oluşturabilmektedir. Alaşımlama işlemi ile, alüminyum üretim kapasitesi büyük ölçüde artış göstermiş, ürün yelpazesi çeşitlenmiş ve genişlemiştir. Bahsi geçen her bir alaşım elementi, mikroyapısal özellikler üzerinde farklı etkilere sahiptir. Örneğin, yüksek mukavemet ihtiyacı olmayan fakat yüksek korozyon direncinin olması gereken durumlarda Cu içermeyen alüminyum alaşımları tercih edilirken, yüksek mukavemet değerlerinin gerektiği fakat korozyon direncinin kritik olmadığı durumlarda ise %5'e kadar Cu içeren alüminyum alaşımları kullanılabilir. Bir başka alaşım elementi olan silisyum, sıvı metale akışkanlık sağlarken, aynı zamanda dökümü gerçekleştirilen iş parçasında çekinti oluşma eğilimini de azaltmaktadır. Al-Si döküm alaşımlarında yapıda bulunması istenmeyen elementlerin başında demir gelir. Alüminyum ile oldukça kararlı yapıda, fakat kırılğan yapıya sahip intermetalik bileşikler oluşturan demir elementi, parçanın sünekliğini olumsuz etkilediği gibi, korozyon dayanımını da düşürmektedir.



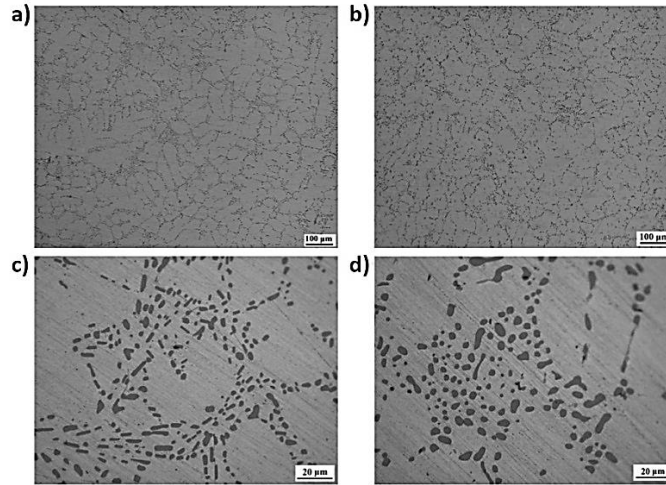
Şekil 1:

Alüminyum dökümde yapı-özellik-işlem-performans ilişkisi.

Kum ve kokil kalıba dökümde yaklaşık %0,6 civarına kadar tolere edilen demir için bu oran, basınçlı dökümlerde zaman zaman %3'e kadar çıkabilmektedir. Döküm alaşımlarında demirin yarattığı bu zararlı etkilerden kurtulmak için alaşım içine bir miktar mangan ya da kobalt eklenmektedir (Fortini ve diğ., 2016; Hwang, 2008).

Alüminyum alaşımlarında mikroyapısal ve mekanik özelliklerin iyileştirilmesinde ergiyiğe eklenen farklı alaşım elementlerinin yanı sıra, ısıtma işlem uygulamalarından da faydalanılmaktadır. Alüminyum döküm alaşımları genellikle, T6 olarak adlandırılan çökelme sertleşmesi ısıtma işlemine tabi tutulmaktadır. Çözeltiye alma, su verme ve yaşlandırma adımlarından oluşan bu ısıtma işlemi ile, yapı içerisinde ikincil fazların (Mg_2Si , Al_2Cu gibi.) fazının çökmesi sağlanmakta ve dayanım artırılmaktadır (Kayalı ve Ensari, 1986). Konuyla ilgili literatürde pek çok uygulama ve araştırma örneği bulunmaktadır. 2015 yılında gerçekleştirilen bir çalışmada, Yang ve ekibi, çökelme sertleşmesi ısıtma işleminde, soğuma hızının (96 K/s ve 3 K/s) A356 alüminyum alaşımları üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Alaşımı 540°C sıcaklıkta farklı sürelerde çözeltiye alan araştırmacılar, sonrasında ötektik silisyumun morfolojik değişimlerini ve gerilme özelliklerini incelemişlerdir. Bu incelemeler sırasında ergiyik haldeki A356 alüminyum alaşımının dökümü için paslanmaz çelik be bakırdan imal edilmiş iki farklı

kalıp çeliği kullanılmıştır. İki farklı kalıp içerisinde gerçekleştirilen ısıt işlemlerinin sonuçları analiz edildiğinde, sırasıyla çekme dayanımının ve ötektik silisyum en-boy oranının, yaklaşık olarak 225MPa ve 3,6 olduğu görülmüştür. Çalışmanın sonuçları, yüksek soğutma hızının ötektik silisyum morfolojisini hızla değiştirdiğini ve aynı zamanda alaşımın gerilme özelliklerini de iyileştirdiğini göstermiştir (Yang ve diğ., 2015). Bir diğer çalışmada, T6 ısıt işleminin lantan (La) ve seryum (Ce) elementleri içeren mishmetal (nadir toprak elementleri içeren metal veya alaşım türü) ile modifiye edilmiş A356 alaşımlarının mikroyapısı, gerilme özellikleri ve kırılma davranışları üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Mikroyapısal analiz sonucunda, ötektik silisyum partiküllerinin boyutlarının büyük ölçüde azaldığı ve silisyum fazının küreselleşme derecesinin, modifiye edilmiş A356 alaşımları için önemli ölçüde iyileştiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, mishmetal ile modifiye edilmiş A356 alaşımları için ötektik silisyum partiküllerinin küreselleşmesinde T6 ısıt işleminin, modifiye edilmemiş numunelere göre daha büyük etkiye sahip olduğu tespit edilmiştir. Modifiye edilmiş A356 alaşımlarında, ötektik silisyum partiküllerinin ortalama çapı, küreselliği ve en-boy oranı sırasıyla 1,48–1,78, 2,01–2,23 ve 1,62–2,01 μm değer aralıklarına kadar düşürülmüştür. T6 ısıt işlemleri gören A356 alaşımlarının, modifikasyonsuz alaşıma göre, çekme dayanımı, akma dayanımı ve yüzde uzama miktarı ötektik silisyum partiküllerinin küreselleştirilmesi ve Mg_2Si 'nin çökeltilmesiyle artırılmıştır. T6 ısıt işlemleri gören ve mishmetal ile modifiye edilmiş alaşımlar için yüzde uzama değerleri önemli oranda geliştirilerek %7,55–10,25 oranlarına çıkarılmıştır. Numuneler üzerinde gerçekleştirilen taramalı elektron mikroskobu analizi neticesinde, modifiye edilmiş alaşımların kırılma sırasında sünek davranış gösterdiği tespit edilmiştir. Kırılmaya, mikroyapıdaki ötektik silisyum partiküllerinin ve nadir toprak elementleri içeren intermetalik bileşiklerin neden olduğu vurgulanmıştır. Ayrıca, Şekil 2'de çalışmada kullanılan numunelerden elde edilmiş mikroyapı görüntülerine yer verilmiştir (Zhu ve diğ. 2012).



Şekil 2:

A356 alaşımının a) ve c) T6 ısıt işlemleri uygulanmış b) ve d) %0,5 mishmetal ile modifiye edilmiş mikroyapı görselleri (Zhu ve diğ. 2012).

Zhu ve arkadaşlarının mishmetal üzerine gerçekleştirmiş olduğu bir başka çalışmada, A356 alüminyum döküm alaşımına içerisine yapılan ağırlıkça %0,1-1,0 oranında mishmetal ilavesinin ilgili alaşımın mikroyapısı, mekanik özellikleri ve kırılma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, alaşım içerisine yapılan az miktarda mishmetal ilavesinin, tane kabalaşmasına, ötektik silisyumun iyi modifiye edilmesine ve Al, Si, Mg, La ve Ce elementlerini içeren nadir toprak elementi esaslı intermetalik bileşiklerin oluşmasına neden olduğunu tespit etmişlerdir. Gerçekleştirilen çekme testleriyle, mishmetal ilavesinin, alaşımların çekme mukavemetini ve sünekliğini azalttığı görülmüştür. Mishmetal ile modifiye edilmiş A356 alaşımlarının; α -Al, ötektik silisyum ve Al-Si-Mg-La-Ce fazlarını

içerdiğini gözlemlemişlerdir. A356 alaşımı içerisinde yapılan az miktarda Ce-zengin mishmetal ilavesinin tane kabalaşmasına neden olduğu tespit edilmiş ve bu durum, ötektik silisyum çekirdeklenme sıcaklığının düşmesiyle, sıvı-katı donma aralığının genişlemesi ve α -Al dendritlerinin büyümesi için yeterli zamanın oluşması ile ilişkilendirilmiştir. Modifikasyon sonrasında, ötektik silisyum partikülleri, fiber yapılara dönüştürülerek gerilme konsantrasyonun azaltılması ve sünekliğin iyileştirilmesine katkı sağlandığı sonucuna varılmıştır. Modifikasyon etkisinin Ce açısından zengin mishmetal ilavesinin seviyesine bağlı olduğu görülmüştür. Ce açısından zengin mishmetal ilavesinin ağırlıkça %0,2'den küçük olduğu durumlarda mikroyapıda kısmi modifikasyon, %0,3'ten büyük olduğu durumlarda ise tam modifikasyon sağlandığı tespit edilmiştir. Diğer yandan, %0,1-1,0 arasında değişen Ce açısından zengin mishmetal ilavesinin, Al, Si, Mg, La ve Ce elementleri içeren istenmeyen intermetalik bileşiklerin oluşmasına neden olduğu görülmüştür. Ce açısından zengin mishmetal ilavesi, modifiye edilmiş A356 alaşımlarında mukavemet ve uzama miktarının düşmesine sebep olmuştur. Bu durumun, tane kabalaşmasından ve nadir toprak elementleri içeren bileşiklerin oluşumundan kaynaklandığı ileri sürülmüştür (Zhu ve diğ. 2010). Mazahery ve arkadaşları 2019 yılında yaptıkları bir çalışmada, evropiyum (Eu) ilavesi ve soğutma hızlarının A360 alüminyum alaşımının modifikasyonu ve mekanik özellikleri üzerine etkilerini araştırmışlardır. Modifiye edilmiş A360 alaşımında, mikroyapısal özellikleri analiz etmek için taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik mikroskop incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Öte yandan, alaşımın mekanik özelliklerini değerlendirmek için çekme testi yapılmıştır. Ayrıca, soğutma hızının, çekme mukavemeti ve kopma gerilmesi üzerindeki etkisi incelenmiştir. Çalışmada, yaklaşık 600 ppm Eu ilavesiyle, silisyum fazının iğnemsî yapıdan ince lifli bir morfolojiye dönüşümü sağlanmıştır. Silisyum partiküllerinin ve intermetalik fazların yapısal özelliklerinin geliştirilmesi ile ikincil dendrit kolları arası mesafe (SDAS) değerlerinde azalma elde edilmiştir. Dendritlerin ve ötektik parçacıkların boyutunun küçültülmesi, A360 alaşımının mukavemetinin artışında önemli bir rol oynamıştır. Eu ile modifiye edilmiş alaşımın mukavemeti ve uzama değerleri, SDAS değerlerinin azalmasıyla artmıştır. Çekme testi ölçümleri, Eu ile modifiye edilmiş, en düşük SDAS değerine (9 μ m) sahip numunelerde, oda sıcaklığında en yüksek gerilme mukavemeti (229MPa) tespit edilmiştir. 36 μ m SDAS'a sahip numunelerde çekme dayanımında yaklaşık 32MPa düşüş kaydedilirken, 53 μ m SDAS değerine sahip numunelerde 62MPa azalma gözlemlenmiştir. Sonuç olarak en düşük SDAS değerinin, en yüksek gerilme mukavemeti ile ilişkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, Eu modifiyeli A360 alüminyum döküm alaşımlarında SDAS değerlerinin azalması ve ötektik silisyumun modifiye edilmesi ile %4,1 uzama değerine ulaşıldığı belirtilmiştir (Mazahery ve diğ. 2019). Sjölander ve Seifeddine isimli bilim adamları 2010 yılında yaptıkları çalışmada, farklı alaşım elementlerinin, alüminyum döküm alaşımlarının ısıl işlemindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışma sonucunda, ötektik silisyum fazını modifiye etmek için Sr elementi kullanıldığında, çözeltiye alma işlem süresinin kısaldığı ve küreselleştirme işleminin çok hızlı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, Si element atomlarının, ötektik Si parçacıklarına difüzyonundan dolayı, Al-Si döküm alaşımlarının su verme hassasiyetinin yüksek olduğu görülmüştür. Artan su verme hızı ile yaşlanma sonrası mukavemetin arttığı, ancak su verme hızı ~4°C/s'yi aştığında mukavemette yalnızca küçük bir artış elde edildiği belirtilmiştir. Yaşlanma sonrası birim şekil değişimi ile su verme arasındaki ilişkinin daha karmaşık ve alaşımın bileşimine bağlı olduğu bilinmektedir. 170–210°C aralığındaki herhangi bir sıcaklıkta yapılan yapay yaşlandırma işleminde, Al-Si-Mg alaşımlarının aynı akma mukavemetine sahip olduğu görülürken, Cu içeren alaşımların artan yaşlanma sıcaklığıyla birlikte akma mukavemeti değerlerinde azalma tespit edilmiştir (Sjölander ve Seifeddine, 2010). Bir diğer araştırma makalesinde, alçak basınçlı döküm ile üretilen A356 alüminyum alaşımının, yorulma performansı ve mikroyapısal özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla, T6 ısıl işlem koşullarının optimizasyonu amaçlanmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar neticesinde, A356 alaşımı için 200 MPa'dan daha düşük değişen gerilim genliklerinde hasar çevrim sayısını artırmak için, 540°C'de 6 saatlik bir çözeltiye alma işlemi ve 160°C'de 16

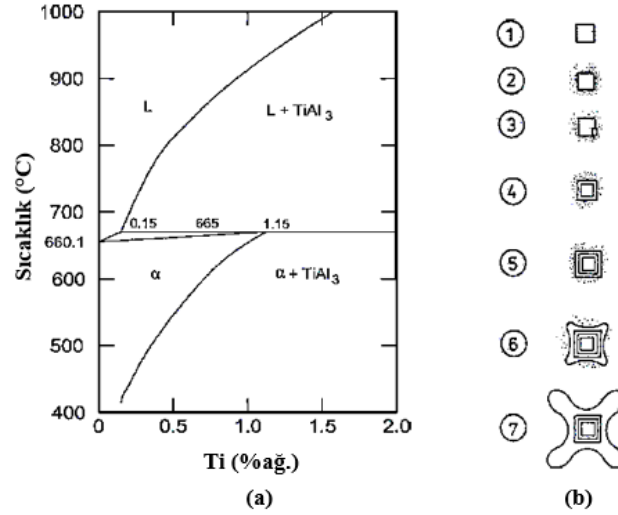
saatlik bir yaşlandırma süresinde T6 ısıtma işlemi önerilmiştir. Maksimum gerilme mukavemetini arttırarak veya gerilme mukavemetinin mikrogözeneklilik değişimine bağlı olan duyarlılığını azaltarak, dolayısıyla mikrogözeneklilik dağılımındaki değişikliklere karşı, hasar çevrim sayısının hasara sebep olma olasılığını azaltarak, yorulma ömrünün geliştirilebileceği öne sürülmüştür (Lee, 2013). Konuyla ilgili yapılan bir başka çalışmada, Al-Si döküm alaşımların mekanik özelliklerinin mikro gözeneklilik dağılımına bağlı değişimi incelenmiştir. Bu inceleme sırasında, mikro gözeneklerin ve ötektik Si parçacıklarının kapladığı alan ve boyut dağılımını içeren etkili boşluk alan fraksiyonu yaklaşımı kullanılmıştır. Ötektik Si partiküllerinin gerçek ve nominal alan fraksiyonunun, artan Si içeriği ile arttığı gözlemlenmiştir. Mikro boşlukların tipik morfolojisinin, Si içeriği arttıkça çekinti boşluğundan porozite tipine değiştiği ve artan Si içeriği ile kırılma yüzeyindeki gözenekliliğin ortalama değerinin azaldığı tespit edilmiştir. Al-Si döküm alaşımlarının mukavemetinin, mikro gözenekliliklere ve ötektik Si fazının nominal alan fraksiyonuna bağlı olduğu belirtilmiştir. Gerilme mukavemeti ve gerinim değerlerinin mikro gözeneklilik değişimine duyarlılığının, artan Si miktarı ile arttığı gözlemlenmiştir. Ek olarak, hasarsız bir durumda elde edilebilen gerilme mukavemetinin maksimum değeri, nominal Si içeriği artarken, gerilme uzamasının maksimum değeri azalır (Choong Do Lee ve diğ., 2016).

2.1. Tane İnceltme ve Ötektik Modifikasyon Çalışmaları

Tane inceltme, alüminyum döküm alaşımlarında mekanik özelliklerin homojen dağılımı ve kontrol altında tutulabilmesi için kritik bir öneme sahiptir (Shaha ve diğ., 2015.). Döküm yapısında ikincil fazların ve mikroporozitelerin boyut ve dağılımı, sıvı metalin iş parçasını daha yüksek verimlilikte beslemesi sonucu çekinti porozitelerinin eliminasyonu, dayanım değerlerinin artması ve yorulma ömrünün uzaması gibi parametreler açısından, tane inceltme çalışmaları akademik ve endüstriyel araştırmalarda güncelliğini korumaktadır.

Tane boyutunu küçültmenin en bilinen yolu soğuma hızını artırmaktır. Dökülen parçanın hızlı soğuyan kısımlarında, daha yavaş soğuyan kısımlarına nazaran daha ince taneler ortaya çıkmaktadır (Askeland, 1990). Birçok farklı kesit kalınlığına sahip herhangi bir iş parçasına hiçbir müdahalede bulunmadan döküldüğü takdirde, ince kesitler daha ince taneli ve dolayısıyla daha iyi mekanik özelliklere sahip olacak şekilde katılaşacak, öte yandan kalın kesitler daha kaba tane yapısı sergileyecek ve katılaşma tamamlanacaktır. (Navaneeth, 2009). Alüminyum alaşımlarında Al-Ti-B master alaşımlarının kullanılmasıyla tane inceltme etkisinin mekanizmasının anlaşılması için Şekil 3(a)'da yer alan Al-Ti faz diyagramının göz önüne alınması gerekmektedir. Diyagram üzerinde dikkat edilmesi gereken ilk husus, titanyum ilavesinin alüminyumun ergime noktasını yükseltmesidir. Saf alüminyum 660°C'de ergirken, Ti eklenmesi bu değeri 665°C'ye çıkarır. Bu etkinin, katı alüminyum tanelerinin çekirdeklenmesi ve büyümesinde önemli rolü vardır. Tane inceltme mekanizması adına en iyi açıklama 1983 yılında Backerud tarafından yapılmıştır ve Şekil 3(b) konuyla ilgili makalesinden alınmıştır (Backerud, 1983). Şekilde tane inceltme işleminin mekanizması şematik olarak gösterilmektedir. Titanyum ilaveleri, %5-10 arasında Ti içeren alüminyum master alaşımları ile yapılmaktadır. Bu alaşımlar, çok sayıda titanyum alüminit ($TiAl_3$) bileşiğinin kristalini içermektedir. Dökümden tipik olarak birkaç dakika önce bir master alaşım ergiyiğe eklendiğinde, bu mikroskobik parçacıkların milyonları ergiyiğe salınmaktadır. Bu parçacıklardan birinin varlığı Şekil 3(b), (1) numaralı gösterimde yer almaktadır. $TiAl_3$ kristali sıvı alüminyum ile temas ettiğinde çözünmeye başlamaktadır. Bu, parçacığın yüzeyindeki sıvı metalin, Şekil 3(b)'de (2) ile gösterildiği gibi titanyumca zenginleştirildiği anlamına gelmektedir. Al-Ti faz diyagramında gösterildiği gibi, alüminid ile temas halinde bulunan Ti-zengin metal, baz alaşımının ergime noktasının üzerinde bir sıcaklıkta katılaşmaya başlayabilmektedir. Dolayısıyla, alüminyumun ilk çekirdeklenmesi, Şekil 3(b), (3)'te gösterildiği gibi alüminid parçacığının yüzeyinde olacaktır. Alüminyum kristali daha sonra alüminitin (4 ve 5) yüzeyi çevresinde büyümektedir. Bu süreçte, kristalin yakınında çözünmüş titanyumu tüketmekte ve büyüme durmaktadır. Metal soğudukça dendritik büyüme başlamaktadır (6) ve katılaşma ilerledikçe devam etmektedir (7).

Tane inceltme işlemi ve mekanizmasının açıklanmasının ardından, alüminyum alaşımlarında modifikasyon işlemine bakıldığında modifikasyonun, soğutma rejiminin optimizasyonu, termal ve kimyasal etkilerle olmak üzere 3 farklı yolla gerçekleştiği görülmektedir. Yüksek katılma hızı, çözeltiye alma tavlama ve çeşitli elementlerin ilavesiyle yapılan kimyasal modifikasyon yöntemleriyle, mikroyapıdaki ötektik silisyum fazının morfolojisinde değişiklik yapılabilmektedir. Kimyasal etki, modifikasyonun en sık kullanılan yöntemidir. Çözeltiye alma tavı, kimyasal modifikatörler keşfedilmeden evvel mekanik özellikleri artırmak ve silisyum fazını küreselleştirmek amacıyla kullanılmaktaydı. Bu yöntemde, katılan yapı ötektik sıcaklığın üzerine çıkarılır ve çözünme işlemi için biraz bekledikten sonra ani soğutma yapılarak daha ince taneli bir yapı eldesi sağlanırdı. Öte yandan, kokil ve basınçlı dökümde soğutma hızı üzerinde kritik bir etki mümkün olmadığından soğutma hızının artırılması ile de modifikasyon da günümüzde nadiren tercih edilmektedir. Bu iki yönteme karşın, aynı etki sadece ppm seviyesinde element ilavesiyle de gerçekleştirilmesi endüstriyel uygulamalarda kimyasal modifikasyonun tercih edilmesinde önemli rol oynamaktadır (Apelian, D.) Kimyasal modifikasyon işleminde stronsiyum sıklıkla tercih edilen bir elementtir.



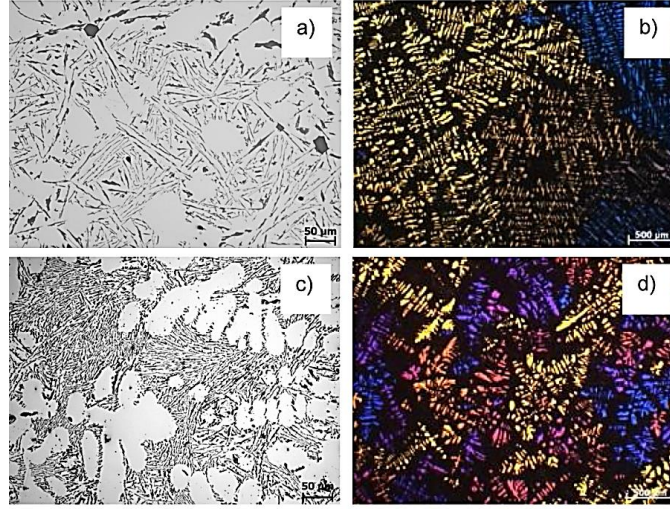
Şekil 3:

(a) Al-Ti ikili faz denge diyagramının alüminyumca zengin kısmı, (b) TiAl₃ kristalinin üzerinde alüminyumun çekirdeklenmesi ve büyümesinin şematik gösterimi.

Alüminyum döküm alaşımlarında gerek tane inceltme gerekse modifikasyon konularında literatürde son yıllarda yapılmış pek çok çalışmaya rastlanmaktadır. Cui ve arkadaşları 2014 yılında yaptıkları bir çalışmada, Al-3B-5Sr bileşimine sahip, yeni bir master alaşımını yerinde (in-situ) sentez yöntemiyle geliştirmişler ve bu alaşımın A356 döküm alaşımının modifikasyonu ve tane inceltici performansı üzerine etkilerini araştırmışlardır. Hem Al-3B-5Sr master alaşımının hem de modifiye edilmiş Al-3B-5Sr/7Si alaşımının mikroyapı analizlerinde, B ve Si elementleri arasında gerçekleşen reaksiyonların mekanizmaları değerlendirilmiştir. Çalışmada, AlB₂ ve çözünmüş Sr arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu kübik morfolojide SrB₆ fazı elde edilirken, hazırlanan yeni master alaşım, tane inceltme ve modifikasyon işlemlerinin, tek basamakta başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesini sağlamıştır. Matris A356 alaşımına kütlece %0,5 Al-3B-5Sr master alaşımı eklenmesi, yapıdaki iğnemsiz ötektik Si fazını fibröz ötektik Si fazına dönüştürmüş, dendrit uzunluklarının 1000µm'den 300µm'ye azalmasını sağlamıştır. Bunun yanı sıra, master alaşımı katkılı numunelerde maksimum çekme dayanımı, katkısız numunelere oranla yaklaşık %26 artarken, uzama miktarında da %4,5'lik bir artış gözlenmiştir (Lee, 2016). Al-5Ti-1B master alaşımının, ısıtma işlemi tabii tutulan A356 alüminyum döküm alaşımına eklenmesiyle tane boyutunda, mikroporozitelerde ve alaşımın gerilme özelliklerinde

meydana gelen etkilerin incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmiştir. Çalışma sonucunda, alaşıma kütlece %0,06 ila 0,15 değerleri arasında Ti eklenmesinin; yapıdaki mikroporozitelerin ve ikincil dendrit kolları arasındaki mesafenin azalması, mekanik özelliklerin iyileşmesi için optimum olduğu anlaşılmıştır. Ti içeriğinin optimum aralığındaki nihai gerilme mukavemeti ve uzaması, Ti içermeyen alaşımlara kıyasla, sırasıyla 50 MPa ve %3 oranında artmıştır (Lee, 2016). Haskel ve arkadaşları 2018 yılında yaptıkları bir çalışmada, stronsiyum ilavesinin ve T6 ısıl işleminin A356 alüminyum alaşımının, yorulma davranışlarının üzerindeki etkilerini hem ayrı ayrı hem de bir bütün olarak ele almışlardır. Çalışmada, alaşımın statik ve döngüsel yorulma özellikleri arasında doğrudan bir ilişki gözlemlenmiştir. Öte yandan yorulma testi sonuçlarında, T6 ısıl işlemi uygulanmış alaşımın, özellikle düşük devirde en iyi performansa sahip olduğu ve Sr ile modifiye edilmiş alaşımların, düşük devirlerde göreceli olarak daha düşük performans sergilediği görülmüştür. Kırılma yüzeylerinin analizinde ise, Si partiküllerinin morfolojisindeki değişikliklerin, yorulma çatlaklarının yayılmasında etkin rol oynadığı onaylanmıştır (Haskel ve diğ., 2018). Bolzoni ve ekibi gerçekleştirdikleri bir çalışmada, Nb-B aşılmasının, ticari Al-Si döküm alaşımlarında tane inceltme performansı üzerine olan etkilerini değerlendirmişlerdir. Çalışmada, ötektik altı A380 ve A356 ve ötekteğe yakın A413 kompozisyonlarına sahip Al-Si alaşımları kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, tane inceltme etkisini gözlemlemek ve Mg, Fe, Cu, Mn, Zn gibi Al döküm alaşımlarında yaygın olarak bulunan alaşım elementleri ile olası etkileşimleri ortaya çıkarmaktır. Al₃Nb ve NbB₂ intermetaliklerin, Al döküm alaşımlarda tane incelmelerinden sorumlu heterojen çekirdekler olduğu tespit edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma sonucunda, Nb-B tane inceltici ilavesinin, Al-Si döküm alaşımlarının mikroyapısal özelliklerini olumlu etkilediği saptanmıştır. Nb-B aşılmasının ana etkisinin Al-Si ötektik fazının morfolojisinde bir değişim olmasına rağmen, yapıdaki birincil α -Al dendritlerinin inceltmesinde de etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca aşılama işleminin, Al-Si alaşımlarının tane boyutu ve soğuma hızı arasındaki bağımlılığı azalttığı ve bu yöntemin farklı dökümlere de uygulanabileceği kanıtlanmıştır. Nb-B aşılmasıyla, birincil α -Al dendritlerinin çekirdeklenmesine yarayan aşırı soğumanın azaltılabildiği gözlemlenmiştir. Bunun yanı sıra Nb-B aşılmasının, Al-Si alaşımlarının mekanik performansında bir miktar iyileşme sağladığı tespit edilmiştir (Bolzoni ve diğ., 2015). Bolzoni ve ekibi tarafından yapılmış olan bir başka çalışmada, Nb-B aşılmasının tane inceltmeye olan etkisinin karakterizasyonu için, ticari Al-12Si-0.6Fe-0.5Mn alaşımı kullanılmıştır. Al-Si eriyiğine Nb tozu ve KBF₄ ilave edilmesinin, birincil α -Al dendritleri ile Al₃Nb, NbB₂ gibi düşük kafes uyumsuzluğu olan etkili çekirdekler meydana getirdiğini, dolayısıyla heterojen çekirdeklenme yoluyla tane inceltmesini kayda değer şekilde desteklediği vurgulanmıştır. Nb-B aşılmasının, hacimsel tane sayısında önemli bir artışa neden olduğu, katılma için gereken aşırı soğumanın azaltılmasını sağladığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Nb-B ile aşılama tane boyutunun katılma sırasındaki soğutma hızına daha az bağımlı hale getirilebileceği tespit edilmiştir. Nb-B aşılmasından sonra görülen tane boyutunun referans alaşımlara göre çok daha düşük ve soğutma hızının bir fonksiyonu olarak sapmanın çok daha az olduğu görülmüştür. Nb-B aşılması ile elde edilen önemli ölçüde tane inceltme etkisi, büyüme kısıtlamasından ziyade etkili çekirdekleyici bölgelerinin varlığından kaynaklanmaktadır. Nb-B aşılması ile, tane boyutunun 1500 μ m'den 520 μ m'ye düşürüldüğü tespit edilmiştir (Bolzoni ve diğ., 2015). Chen ve arkadaşları, B elementinin tane inceltici etkisini araştırmak için yaptıkları başka bir çalışmada, Si ilavesinin AlB₂'nin çekirdeklenme davranışı üzerine olan etkisi araştırmış ve Al alaşımının tane inceltme mekanizması hakkında bazı yeni bilgiler vermişlerdir. Çalışmada, AlB₂ ve Al fazlarının ara yüzeyinde bir SiB₆ tabakasının yaratılmasının, kristalografik uyumsuzluğu azaltılabileceği ve bunun AlB₂'nin çekirdeklenme potansiyelini önemli ölçüde artırabileceği öne sürülmüştür. Si zehirlenmesi, kompozisyondaki Si konsantrasyonunun ağırlıkça %3,5'ten yüksek olduğu durumda meydana gelmektedir. B elementini Al-Si alaşım sistemine eklemenin, Si zehirlenmesini azaltmak veya önlemek için etkili bir yol olduğu savunulmaktadır. Ayrıca, inceltici olarak Al-B master

alaşımaları kullanıldığında, artan Si içeriği ile tane boyutunun sürekli olarak azaldığı bilinmektedir. Mevcut çalışmada, Silisyumun, AlB_2 'nin tane inceltme verimliliği üzerindeki etkilerini ortaya çıkarmak için AlB_2 ve Si arasındaki ara yüzey yapısı ve bileşimi araştırılmıştır. AlB_2 , ergiyik haldeki alaşıma ilave edildiğinde silisyumun, AlB_2 yüzeyine yayılabildiği ve alt tabakada bazı intermetalik bileşikler oluşturabildiği gözlemlenmiştir. AlB_2 parçacıklarının, yüksek Si konsantrasyonlarına sahip alaşımlarda, α -Al fazı için potansiyel çekirdeklenme bölgeleri olduğu ileri sürülmüştür. Tane incelmesinin, ağırlıkça %4,0 ila 5,5 Si aralığında meydana geldiği tespit edilmiştir. Sonuç olarak, AlB_2 'nin çekirdeklenme potansiyelinin, yüzeyi üzerinde bir SiB_6 tabakası oluşturularak önemli ölçüde artırılabilirliği ortaya konulmuştur. Bununla birlikte, AlB_2 ve Al arasındaki ara yüzeyde bulunan SiB_6 'nın, Al-Si ergiyiğinde kararlı halde olmayabileceği ve dahası Si parçacıklarına dönüşebileceği tespit edilmiştir (Chen ve diğ., 2016). Bolzoni ve Babu yaptıkları çalışmada, Al-2Nb-2B alaşımını kullanarak alüminyum alaşımaları da mümkün olan en ince tane boyutunu elde etmeye odaklanmıştır. Bolzoni daha önce yapmış olduğu bir çalışmada B'nin KBF_4 'ten geri kazanımının oldukça düşük olduğunu gözlemlenmiştir. Bu nedenle, geri kazanım oranını arttırmak için Al-5B alaşımını kullanmış ve toz malzemedan Nb geri kazanımının da oldukça düşük ve değişken olduğunu belirtmiştir. Bu durumun, Nb'nin yüksek sıcaklıklarda kolayca oksitlenmesinden kaynaklandığı ileri sürmüştür. Daha sonra bilim adamı çalışmalarını geri kazanımı daha verimli olan Al-2Nb-2B master alaşımını kullanarak gerçekleştirmiştir. Çalışmada, düşük B içerikli alaşımların (B<Nb), özellikle yüksek B içeriğine sahip olanlara kıyasla diğer Al-Nb-B alaşımlarından daha iyi performans gösterdiği açıkça ortaya konulmuştur. Bilim insanı bu durumun nedeni olarak, düşük B içeriğine sahip alaşımlarda NbB_2 ve Al_3Nb bileşiklerinin oluşma olasılığının daha yüksek olmasını ileri sürmüştür. En iyi tane inceltme performansının B<Nb kompozisyonundaki alaşımlarla elde edildiğini gözlemlenmiştir. Aynı işlem, alaşım ilave oranını azaltabilmek amacıyla bir Al-5Nb-5B üretmek için de kullanılmıştır. Al-2Nb-2B alaşımının daha yüksek nominal ilave oranlarında, Al-5Nb-5B'den daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır. Bu durum, alaşımdaki Nb ilavesini artırarak, alaşımın tane inceltme verimliliğinin arttırılamayacağını göstermiştir. Al-Nb-B ana alaşımları ile aşılınmış Al-Si alaşımlarının tane büyüklüğünün, aşılınmamış alaşımlara kıyasla her zaman daha ince olduğu kanıtlanmıştır. Nihayetinde, en iyi sonucun Nb içeriğinin B içeriğinden daha yüksek olduğu, düşük borlu alaşımlar ile elde edildiği tespit edilmiştir. Ayrıca, çalışma sırasında kullanılan alüminyum alaşımına yönelik elde edilmiş optik mikroskop görüntülerine Şekil 4'te yer verilmiştir (Bolzoni ve diğ., 2019). Kamali ve arkadaşları ise, Ti ilavesinin Al-4.5Cu-0.3Mg alüminyum döküm alaşımı üzerindeki mikroyapısal ve mekanik özellikler üzerine olan etkilerini araştırmak için bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Yüksek mukavemetli bu alüminyum döküm alaşımına eklenen farklı miktarlarda titanyum elementinin (ağ. %0,001 ila 0,5) alaşımın mikroyapısı, mekanik özellikleri ve kalite endeksi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Alaşımın sıcak yırtılmaya duyarlılığı ve bunun geliştirilmesi için ağırlıkça en az %0,05 Ti'nin gerekli olduğu öne sürülmüştür. Mikroyapısal çalışmalarda Ti ilavesinin, tane boyutunu 190 μ m'den 48 μ m'ye düşürdüğü, ancak daha yüksek Ti içeriğinin (ağırlıkça %40,05 Ti) tane boyutunu önemli ölçüde değiştirmediği ortaya konulmuştur. Ti ilavesi ile akma mukavemetinin arttığı, ancak birim şekil değiştirme değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Ayrıca, ısıl işlem uygulamasının alaşımın maksimum çekme dayanımı, uzama miktarını arttırdığı ve kalite endeksini iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Kırılma yüzeylerinin taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmesi sonucunda, kırılmanın hem döküm hem de ısıl işlem görmüş numunelerde sünek olarak gerçekleştiği görülmüştür. Ayrıca daha yüksek Ti içeriğinde, tane sınırlarında meydana gelen intermetalik Al_3Ti varlığının çatlak büyümesi için teşvik edici olduğu belirlenmiştir (Kamali ve diğ., 2014).



Şekil 4:

Al-10Si alaşımı için sırasıyla optik/polarize ışık altında elde edilen mikrograflar: a) ve b) referans, c) ve d) Al-Nb-B alaşımları ile aşılınmış numuneler. (Bolzoni ve diğ., 2019).

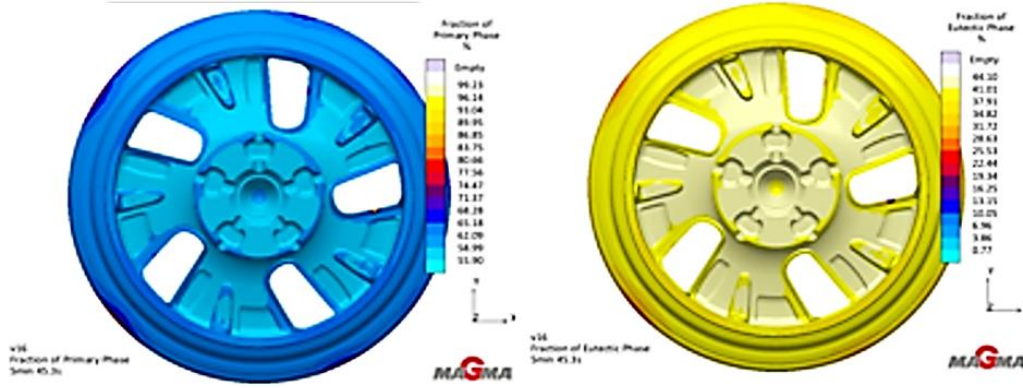
2.2. Alüminyum Dökümde Bilgisayar Destekli Simülasyon Çalışmaları

En eski üretim metodlarından bir olan ve içerisinde pek çok aşamalı problemi barındıran döküm sürecinde, iş parçasının modelinin geometrik tasarımı ve gerekli malzeme özelliklerini sağlayacak mühendislik alaşımı seçimi iki kritik unsurdur. Ergiyik metal alaşımı ile kalıp boşluğunun homojen şekilde doldurulması ile başlayan ve katılaşmanın tamamlanıp iş parçasının eldesine kadar geçen tüm döküm prosesinde, sürecin kontrol altında tutulması, ürünün mekanik özellikleri ve performans kriterleri üzerinde etkilidir. Özellikle karmaşık geometriye sahip iş parçalarının üretiminde kullanılacak kalıpların tasarımı ve döküm sürecine göre optimizasyonu oldukça zordur. Alüminyum döküm endüstrisini de kapsayan bu darboğazların işlem parametrelerine dayalı tespiti ve eliminasyonu, son yıllarda geliştirilen bilgisayar destekli üretim yazılımları aracılığıyla, döküm prosesinin modellenmesi ve simülasyonu ile mümkün hale gelmiştir. Döküm simülasyon yazılımları ile kalite ve maliyet hedeflerine etkiyen parametrelerin tümü eş zamanlı olarak incelenmektedir. Simülasyon analizleri sonucu elde edilen verilerle alüminyum alaşımının kalıbı doldurma, katılaşma ve soğuma süreçleri analiz edilebilmektedir. Ayrıca, iş parçasındaki olası kalıntı gerilmeler, çarpılmalar, mikroyapısal ve mekanik özelliklerle ilgili sanal veriler de kapsamlı olarak değerlendirilmektedir. Rekabetçilik, araştırma-geliştirme ve inovasyon kavramlarının son derece önemli olduğu günümüzde, alüminyum endüstrisine döküm simülasyonları ile yeni ürün ve proses tasarımında kolaylık, kalite artışı, enerji ve zaman tasarrufu sağlanmaktadır. Şekil 5'te ilgili döküm simülasyonları yazılımları kullanılarak sanal ortamda elde edilen bir jant ürününe ait görsellere yer verilmiştir.

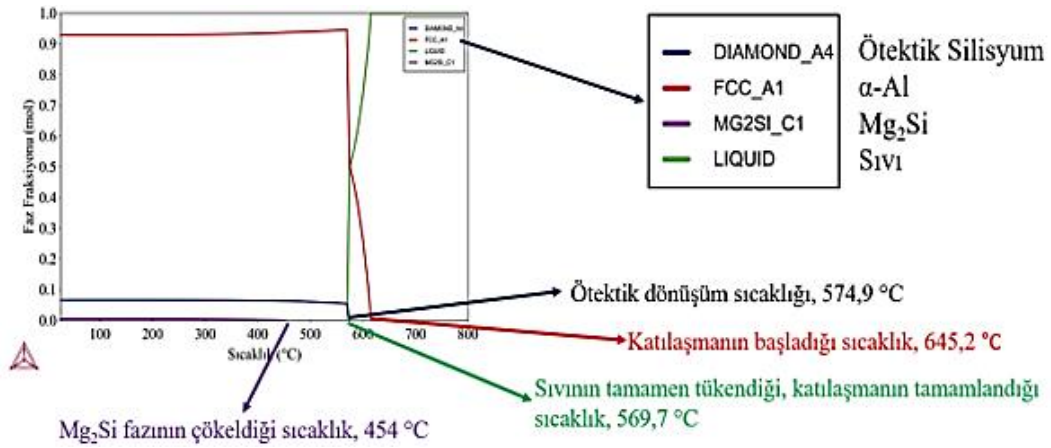
Alüminyum dökümde simülasyon çalışmalarının yanı sıra, hesaplamalı malzeme mühendisliği konusu da son dönemlerde oldukça ilgi görmektedir. Hesaplamalı malzeme mühendisliği, malzemelerde fiziksel, termal ve kimyasal parametreler ile temel malzeme özelliklerinin ve davranışının bilgisayar destekli modellenmesidir. Bilim adamları ve mühendisler, hali hazırda Thermo-Calc ve JMatPro gibi ticari olarak kullanılan hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımlarından faydalanarak, çalıştıkları malzemelere ait termodinamik, termodinamik ve termokinetik özelliklerinin, gerçek üretim öncesi belirlenmesi ve optimizasyon çalışmalarını yürütmektedir. Şekil 6'da bir alüminyum döküm alaşımının katılaşma analizinin, hesaplamalı malzeme mühendisliği yaklaşımları temelinde gerçekleştirilmesine yönelik bir görsele yer verilmiştir.

Özellikle son yıllarda, endüstride alüminyum döküm çalışmalarında hesaplamalı malzeme mühendisliği ve simülasyon programlarından sıklıkla faydalanılmaktadır. Bu durum, sanal ve

gerçek üretim ve malzeme verilerinin eşleştirilmesi ve dökümde süreç benzetim çalışmalarının verimliliğinin artırılması için, akademik ve endüstriyel boyutlu çalışmalara hız kazandırmıştır. Bu bölümde gerek hesaplamalı malzeme mühendisliği gerekse döküm simülasyonu konularıyla ilgili literatüre kazandırılan araştırmalara yer verilmiştir.



Şekil 5. Magmasoft yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizlere birer örnek.



Şekil 6:

Hesaplamalı malzeme mühendisliği ile elde edilen bir alüminyum döküm alaşımına ait katılaşma analizi grafiği ve önemli sıcaklıkların gösterimi.

Kabir ve arkadaşları gerçekleştirmiş oldukları çalışmada, $540 \pm 20^\circ\text{C}$ 'de çözeltiye alma işleminde yaşlandırma süresinin ve su verme sıcaklığının, A201.0 alüminyum alaşımının mikroyapı ve mekanik özellikleri üzerine olan etkilerini incelemişlerdir. Çalışmada, termodinamik modelleme yaklaşımını kullanan JMatPro hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı yardımıyla, katılaşmayla ortaya çıkan metallar arası fazları belirlemişlerdir. CuAl_2 , Al_2CuMg ve Mg-Si fazı gibi metallar arası fazların alaşımın sertliğine katkıda bulunduğu gözlemlenmiştir. Yaşlandırma, $170 \pm 20^\circ\text{C}$ sabit sıcaklıkta ve maksimum 105 saate kadar gerçekleştirilmiştir. Artan yaşlanma süresiyle birlikte, alaşım matrisiyle uyumlu olan Guinier-Preston (GP) bölgelerinin de varlığının arttığı ve dolayısıyla alaşımın sertliğinin artış gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca, yaşlanma sıcaklığının daha fazla artmasıyla (aşırı yaşlanma), birlikte, çökelti ve alaşım matrisi uyumluluğunun ve alaşımın sertliğinin azaldığı belirtilmiştir. Ayrıca, çözeltiye alma sıcaklığından su verildiğinde, CuAl_2 'nin çökmesiyle, A201.0 alaşımının mikroyapısının, dendritik yapıdan CuAl_2 ile doymuş α fazına sahip bir yapıya dönüştüğü belirlenmiştir. JMatPro yardımıyla, Mg-Si , CuAl_2 çöktürleri ve $\text{S-Al}_2\text{CuMg}$ fazlarının ve

ergiyik içinde Cu intermetalik fazların varlığı doğrulanmış ve bu fazların alaşımın sertliği üzerinde etkili olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, alaşımın sahip olduğu en yüksek sertlik değerine 10 saatlik yaşlandırma süresinde ulaşılmıştır (Kabir ve diğ., 2014). Choi ve ekibinin yapmış olduğu bir diğer çalışmada, yeni bir 5XXX serisi Al-Mg-Zn-Mn-Fe-Si alüminyum alaşımı homojenize edilmiş ve sonrasında korozyon özellikleri incelenmiştir. Homojenizasyon işlemi sırasıyla 3, 6, 12, 18, 24 ve 30 saatte ve 450°C sabit sıcaklıkta yapılmıştır. Korozyon direncinin, artan homojenizasyon işlem süresiyle istikrarlı bir şekilde arttığı ve 24 saatlik işlem süresinde doymuş hale geldiği tespit edilmiştir. Homojenizasyon işlemiyle, tane sınırı hacim oranının ve korozyon hızının azaldığı gözlemlenmiştir. Homojenizasyon işleminden önce, tane sınırında tanınan ikincil fazların başlıca β -(Al₃Mg₂), τ -(Mg₃₂ (Al, Zn)₄₉) ve Al₆(Mn, Fe) ve homojenizasyondan sonra ise Mg₂Si ve Si olduğu tespit edilmiştir. Homojenizasyondan önce, tane sınırında ikincil faz olarak büyük miktarda magnezyumun mevcut olduğu ve daha düşük standart indirgenme potansiyeline sahip olan magnezyumun taneler arası korozyonu yoğunlaştıracağı öne sürülmüştür. Homojenizasyon işlemiyle, yüksek Mg içeriğine sahip β ve τ fazları tanelere difüze olarak tane sınırında azalırken, silisyumun yüksek sıcaklık homojenizasyonu, tane sınırına difüze olabildiği veya tane sınırında Si ve/veya Mg₂Si olarak kalabildiği belirtilmiştir. Sonuç olarak, Si ve Mg₂Si'nin sahip olduğu yüksek indirgeme potansiyeli sayesinde, taneler arası korozyonu azaltabildiği ve yeni geliştirilen Al alaşımının korozyon direncinin arttırılabileceği kanıtlanmıştır (Choi ve diğ., 2018). Li ve arkadaşları, 6351 alaşımının su verme hassasiyetini, zaman-sıcaklık-dönüşüm (TTT) ve zaman-sıcaklık-özellik (TTP) eğrileri ile incelemiş, dahası alaşımın çözeltiye alma sertliğini ve su verme sonrası elektrik iletkenliğini kesintili bir su verme tekniği ile araştırmışlardır. TTT ve TTP eğrileri, sırasıyla kesintili bir su verme yöntemi ile belirlenmiş ve JMatPro yazılımı ile simüle edilmiştir. İzotermal dönüşüm sırasındaki mikroyapı değişimi, geçirimli elektron mikroskobu (TEM) ile analiz edilmiş ve sonuçlar Avrami denklemi ile incelenmiştir. Çalışmada, 6351 alaşımının elektrik iletkenliğinin arttığı ve belirli bir izotermal sıcaklıkta bekleme süresinin uzatılmasıyla sertliğin azaldığı tespit edilmiştir. TEM analiz sonuçları incelendiğinde, aşırı doymuş katı çözeltinin çözüldüğü ve iğnemsiz β' fazının izotermal sıcaklıkta bekletmenin ilk aşamasında çökeldiği belirlenmiştir. 6351 alaşımının TTT ve TTP eğrileri incelendiğinde, burun sıcaklıklarının yaklaşık 360°C'ye ve yüksek su verme hassasiyeti sıcaklık bölgesinin 230-430°C'ye denk geldiği görülmüştür. Ayrıca, en hızlı izotermal dönüşüm oranının 360°C sıcaklıkta olduğu ve bu sıcaklığın aşağısında ya da yukarısında bu oranın azaldığı belirtilmiştir. Burun sıcaklığında tutma süresinin uzamasıyla birlikte çubuksu β' ve levha şeklindeki β fazlarının oluştuğu gözlemlenmiştir. Çalışmada, TTT ve TTP eğrilerinin burun sıcaklıkları yaklaşık olarak 360°C ve yüksek su verme hassasiyeti sıcaklık aralığı 230-430°C olarak belirlenmiştir. Su verme faktörü analizi, optimum mekanik özellikleri elde etmek için, su vermeye duyarlı alanlarda soğutma hızının 15°C/s' den fazla olması gerektiğini göstermiştir (Li ve diğ., 2013). Shang ve arkadaşlarının konuyla ilgili gerçekleştirmiş olduğu diğer bir çalışmada, 6082 alüminyum alaşımının su verme hassasiyeti, TTP eğrileri ile incelenmiştir. Su verme hassasiyeti sıcaklık aralığının, 6082 Al alaşımında 250-440°C arasında değiştiği ve burun sıcaklığının yaklaşık 360°C olduğu belirtilmiştir. İzotermal ısıtma işlem sırasında, Mg₂Si partiküllerinin aşırı doymuş katı çözeltide çökeldiği ve çökeltme hızının burun sıcaklığında en yüksek hıza ulaştığı tespit edilmiştir. İzotermal ısıtma işlemi ilk aşamalarında, 360°C'de, çubuksu β' ve β partiküllerinin çökeldiği gözlemlenmiştir. İzotermal sıcaklıkta bekletme süresinin uzatılmasının, matris içerisinde daha fazla sayıda ve daha iri β partiküllerinin oluşmasına yol açtığı görülmüştür. Ayrıca, hem β' hem de β partiküllerinin çökeltmesinin, çözünen madde kaybına ve çözeltiye alma sertliğinin azalmasına yol açtığı tespit edilmiştir (Shang ve diğ., 2011). Casari ve ekibinin gerçekleştirdiği bu çalışmada ise, modifiye edilmemiş A356 alaşımlarına eser miktarda Ni veya V ilavesi yapılarak gerilme özelliklerinin değişimi araştırılmıştır. Bu elementlerin nominal konsantrasyonları sırasıyla 600 ve 1000 ppm olarak ayarlanmıştır. Çalışmada, döküm ve T6 ısıtma işlemi koşulları altında, kum ve kalıcı kalıp

dökümünden elde edilen numuneler incelenmiş, soğuma hızı ve katılma analizleri Magma Soft simülasyon programı aracılığıyla gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizler sonucunda, Ni ilaveli, kum kalıba döküm numunelerinde hem akma mukavemetinin hem de maksimum çekme dayanımının sırasıyla %87 ve %37 oranında azaldığı tespit edilmiştir. V ilavesi yapılarak elde edilen numunelerde ise bu değerlerin sırasıyla %42 ve %25 oranında artış gösterdiği gözlemlenmiştir. T6 ısıtılmasından sonra bu değerlerin referans alaşıma göre %18 oranında daha yüksek mekanik özellikler gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, kalıcı kalıba döküm numunelerinde hem Ni hem de V'nin mekanik özellikler üzerinde herhangi bir etkisinin olmadığı ve T6 ısıtılma koşullarının anlamlı bir istatistik göstermediği belirlenmiştir. Ayrıca, kum kalıba döküm alaşımlarında gözlemlenen büyük SDAS değerleri ve ötektik Si partikülleri nedeniyle tane içi bir kırılmanın, kalıbı kalıba döküm numunelerinde ise tane içi ve taneler arası kırılmanın birlikte meydana geldiği gözlemlenmiştir. Ek olarak, V ilaveli kum kalıba döküm numunelerinde akma mukavemeti ve UTS değerlerindeki artışın, α -Al fazı içerisine yerleşen V elementinden kaynaklandığı kanıtlanmıştır. Sonuç olarak V ilavesinin hem kum hem de kalıcı kalıba döküm yöntemiyle elde edilen A356 alaşımlarında mekanik özellikleri arttırdığı tespit edilmiştir (Casari ve diğ., 2014). Bruna ve ekibinin gerçekleştirdikleri çalışmada, ProCAST yazılımı kullanarak, kum kalıba döküm yöntemiyle elde edilen Al-Si alaşımları için gelişmiş bir gözeneklilik tahmini uygulaması gerçekleştirmişlerdir. Sunulan bu hesaplamaların mikro ve makro gözenekliliğin tüm temel davranışlarını dikkate aldığı belirtilmiştir. Çalışmada belirli şekle sahip olan bir kalıp kullanılmıştır. Sonuçların doğruluğunu arttırmak için termal analizler ile veriler yeniden oluşturulmuştur. Soğutma eğrilerinden yararlanılarak, porozite oluşumunu etkileyen, düşük soğutma sıcaklığı, çekirdeklenme ve rijitlik gibi önemli katılma olaylarına ait veriler belirlenmiştir. Bu veriler daha sonra yazılım veri tabanına dahil edilerek, simülasyon sürecinde kullanılmıştır. Simülasyon çalışmalarının sonucunda, soğutma hızının düşmesiyle, gözeneklilik yüzdesinin arttığı tespit edilmiş ve deneysel araştırmalar ile bu sonuçların tutarlılığı doğrulanmıştır. Ayrıca, düşük soğutma hızlarında, katılma sırasında hidrojen çözünürlüğünde ani bir düşüş meydana geldiği ve dolayısıyla hidrojen gazı kabarcıklarının oluşumunun söz konusu olduğu belirtilmiştir. Dahası, gaz ve çekinti boşluklarının birlikte var olabileceği de görülmüştür. Böylelikle, Bruna ve arkadaşları ortaya attıkları kuram ile çekinti ve gaz boşluklarının analiz edileceğini sonucuna varmışlardır (Bruna ve diğ., 2017). Jiao ve arkadaşları çalışmalarında, yüksek basınçlı döküm yöntemi ürünü olan ötektik altı Al-Si alaşımında, Fe bakımından zengin fazların hem mikroyapısal özellikler hem de kırılma davranışı üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Al-Si alaşımındaki Fe bakımından zengin fazlar, X-ışını tomografisi ve JMatPro simülasyonu kullanılarak karakterize edilmiştir. Çalışmada, yüksek basınçlı döküm alaşımı olan AlSi10MnMg alaşımı için, Fe bakımından zengin fazların polihedral, ince kompakt ve çin alfabeti şekilli üç farklı morfolojisinin mevcut olduğu gözlemlenmiştir. Polihedral ve ince kompakt yapılı Fe bakımından zengin fazların birincil faza, çin alfabeti şekilli Fe bakımından zengin fazın ise üçlü ötektik reaksiyona katılan ikinci faza ait olduğu belirtilmiştir. Daha yavaş besleyici hızının, Fe bakımından zengin polihedral fazın besleyici içerisinde çökmesini sağlarken, kalıp boşluğunda Fe bakımından zengin ince kompakt ve çin alfabeti şekilli fazların oluşumunu azalttığı gözlemlenmiştir. Ayrıca, Fe bakımından zengin büyük boyutlu polihedral fazın, deformasyon uyumluluğunun daha düşük olduğu dolayısıyla mikro çatlakların oluşumunu ve yayılmasını tetikleyen gerilme konsantrasyonu kaynağı haline geldiği tespit edilmiştir (Jiao ve diğ., 2020). Li ve arkadaşları gerçekleştirmiş olduğu çalışmada, AlSi7 alaşımında AlB₂'nin heterojen çekirdeklenme sırasında oluşan ara yüzeyinin karakteristik özelliklerini araştırmışlardır. Bu analiz sırasında taramalı geçirimli elektron mikroskopunda, yüksek açılı dairesel karanlık alan (HAADF-STEM) görüntüleme tekniği ve elektron enerji kaybı spektroskopisi (EELS) yöntemleri kullanılmıştır. Yapılan incelemelerde, AlB₂ partiküllerinin yakınlarında Si partikülleri gözlemlenmiş; fakat AlB₂ ve Al arasında Si-B açısından zengin SiB₆ gibi bir katman görülmemiştir. AlB₂ ve Al ara yüzeyinde, yalnızca yarı kararlı SiB₆ tabakası oluşabileceği ve katılma sırasında başka bir kararlı faza (örneğin Si)

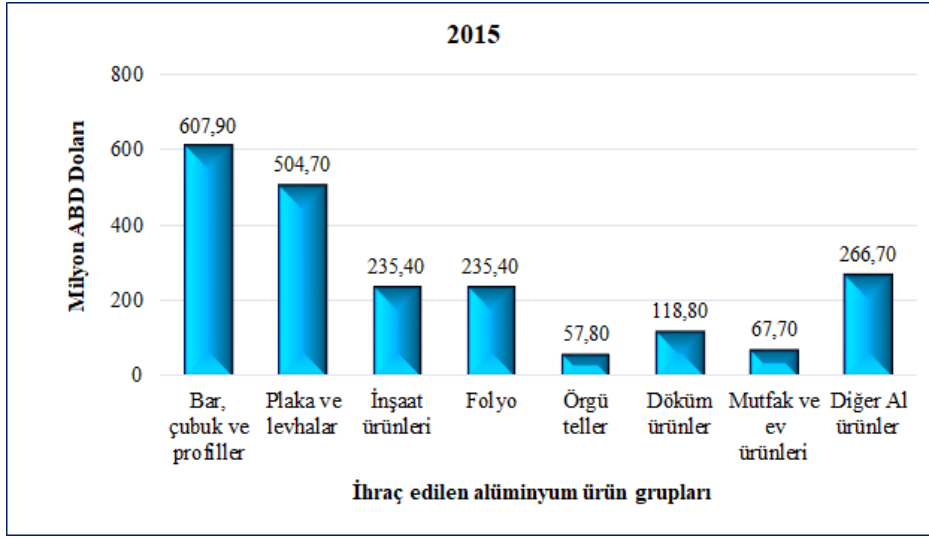
dönüşebileceği tespit edilmiştir. Al-Si-B alaşımının faz denge diyagramlarında katılaşma aralığı, alüminyum veri tabanını ve Scheil denge dışı katılaşma modülünü içerisinde barındıran Thermo-Calc hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı kullanılarak analiz edilmiştir. Çözünen silisyumun, alüminyumun AlB_2 üzerindeki heterojen çekirdeklenme davranışına etki ettiği tespit edilmiştir (Li ve diğ., 2017). Assadiki ve arkadaşları yayınladıkları makalede, alüminyum alaşımları için ilgili veri tabanına (TCAL4.0) sahip Thermo-Calc yazılımı kullanılarak, farklı alaşım elementlerinin $\alpha-Al_2Cu$ ve $\beta-Mg_2Si$ gibi yarı kararlı fazların termal kararlılığı üzerindeki etkisini araştırmışlardır. Bu fazların çökeltme sertleşmesini sağladığı ve alüminyum alaşımlarının mekanik özelliklerini iyileştirdiği bilinmektedir. Literatürde yarı kararlı faz stabilitesi üzerindeki etkilerine bağlı olarak stabilize edici etkisi olmayan (Li, Hf, Cr ve Ce) ve stabilize edici (V, Ti, Cr ve Sc) olmak üzere iki element kategorisi tanımlanmaktadır. Termodinamik hesaplamalara göre Ti'nin $\alpha-Al_2Cu$ ve $\beta-Mg_2Si$ üzerinde en güçlü stabilize edici etkiye sahip olduğu gözlemlenmiştir. Hesaplamalı malzeme mühendisliği tekniği ile elde edilen sanal veriler, diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) verileri ile karşılaştırılmış ve titanyumun yarı kararlı fazların termal kararlılığı üzerindeki etkisi deneysel olarak doğrulanmıştır. Ayrıca, Li, Hf, Co ve Ce'nin $\alpha-Al_2Cu$ ve $\beta-Mg_2Si$ üzerinde stabilize edici bir etkiye sahip olmadığı tespit edilmiştir. V, Ti, Cr, Zr ve Sc gibi alaşım elementlerinin, $\alpha-Al_2Cu$ ve $\beta-Mg_2Si$ 'nin solvüs sıcaklığını arttırdığı belirlenmiş ve bu elementlerin bir Cu içeren A356 alaşımına ağırlıkça %1 oranında eklenmesiyle, solvüs sıcaklığının 20°C kadar yükselebildiği görülmüştür (Assadiki ve diğ., 2018). Başka bir çalışmada, literatürde yer alan hem ikili Si-Sr hem de üçlü Al-Si-Sr sistemlerindeki deneysel faz dengeleri ve alaşımların termodinamik özellikleri hakkında bir inceleme yapılmıştır. Si-Sr ikili sisteminin termodinamik tanımlamaları tüm deneysel bilgiler dikkate alınarak faz diyagramlarının hesaplanması (CALPHAD, Calculation of Phase Diagrams) yaklaşımıyla yeniden değerlendirilmiştir. Elde edilen bulgulara göre, özellikle bileşiklerin standart oluşum entalpileri başta olmak üzere, deneysel verilerle daha yüksek uyumluluk elde edilmiştir. Si-Sr ikili sisteminden elde edilen yeni termodinamik tanımının literatürdeki Al-Si ve Al-Sr sistemleri ile birleştirilmesiyle, Al-Si-Sr üçlü sisteminin güvenilir ve tutarlı yeni termodinamik parametreler seti oluşturulmuş ve bu alaşım sistemi için hesaplanan faz dengesi ve termodinamik özelliklerin, deneysel verilerin çoğu ile uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Sr ilaveli 4 farklı Al-Si döküm alaşımının mikroyapıları deneysel çalışmalarla incelenmiş ve elde edilen sanal Al-Si-Sr termodinamik veri tabanına dayalı olarak, bu alaşımların katılaşma simülasyonları gerçekleştirilmiştir. (Yi ve diğ., 2020).

Diğer bir çalışmada, katılaşmış 6016 Al-alaşımlarının faz dengesini elde etmek için yüksek verimli hesaplama (high-throughput calculation) yöntemi uygulanmıştır. Birincil faz fraksiyonu, çökelti fraksiyonu ve faz kompozisyonu hesaplamaları, Thermo-Calc yazılımının Scheil-Gulliver katılaşma modeline dayalı olarak gerçekleştirilmiş ve standart 6016 Al alaşımının tüm kompozisyon aralıkları dikkate alınmıştır. Hesaplama verimliliğini artırmak için, hesaplama komutlarını otomatik olarak oluşturabilen, Thermo-Calc yazılımını çalıştırabilen ve ardından çıktı dosyalarının anahtar verilerini çıkarabilen, otomatik yürütme ve çıkarma görevleri (Automatic Execution and Extraction Tasks) (AEET) adı verilen Python tabanlı bir program geliştirilmiştir. Söz konusu yöntemin, zararlı $\alpha/\beta-AlFeSi$ fazlarının fraksiyonu, çözünürlük limitleri ve Mg/Si/Cu miktarı gibi parametrelerin yanı sıra, endüstriyel 6016 Al-alaşımlarının uygun bileşimlerini belirlemek için kullanılabilmesi belirtilmiştir. Harcanan zamanı ve deneme testlerinin sayısını azaltabilen bu yöntemin araştırmacılara rehberlik sağlayacak nitelikte olduğu savunulmuştur. Diğer bir yandan, mevcut HTC yaklaşımının, 6016 alüminyum alaşımlarının katılaşma modellemesi ile sınırlı olmadığı, birçok türde yüksek verimli termodinamik ve kinetik hesaplamalar için potansiyele sahip olduğu ve genişletilebileceği ileri sürülmüştür (Zhang ve diğ., 2019). Liu ve arkadaşları 2020 yılında yapmış oldukları bir çalışmada, yüksek basınçlı döküm yöntemiyle üretilmiş A383 alaşımında, Fe bakımından zengin intermetaliklerin bileşimini, kristal yapısını ve morfolojisini incelemiştirler. İki farklı tipteki demir bakımından zengin intermetaliklerin olası oluşum mekanizmalarını deneysel gözlemlere ve ThermoCalc

simülasyonlarına dayalı olarak tartışmışlardır. A383 alaşımlarında, poligonal morfolojiye sahip çamurumsu (sludge) ve çin alfabesi şekilli α -Fe olmak üzere iki tür demir içerikli intermetalik varlığı tespit edilmiştir. Elektron geri saçılım difraksiyonu (EBSD) analizleri, çamurumsu ve α -Fe'nin aynı temel kübik kristal yapıya ve boşluk grubuna sahip olduğunu ortaya çıkarmıştır. Kantitatif enerji dağılımlı x-ışını spektroskopisinin çamurumsu intermetalik α -Fe'den daha fazla Mn ve Cr içerdiğini göstermiştir. Soğutma hızının, Al alaşımlarının mikroyapısındaki çamurumsu Fe intermetalik varlığının dağılımını etkilediği ve daha yüksek soğutma hızlarına sahip dökümlerde daha küçük intermetalik partiküllerinin oluştuğu görülmüştür. Sonuç olarak, çamurumsu ve α -Fe'nin nominal olarak aynı fazda olduğu, ancak katılma sırasında farklı sıcaklıklarda oluştuğu tespit edilmiştir. Fe konsantrasyonunun ağırlıkça %0,5'ten veya Mn konsantrasyonu %0,3'ten yüksek olduğunda, çamurumsu intermetalik poligonal bir morfolojiye sahip birincil bir faz olarak oluşacağı kanıtlanmıştır. Aksi takdirde, Çin alfabesi görünümüne sahip ikincil bir faz olarak α -Fe'nin oluştuğu görülmüştür (Liu ve diğ., 2020). Bir başka makalede, Al-Si-Cu-Mg (A319) alüminyum döküm alaşımının homojenizasyonu sırasında ikincil dendrit kolları arasındaki mesafe ve işlem sıcaklığının, ikincil faz çözünmesi ve çözünen fazın mikroyapıda yeniden dağılımı üzerindeki etkileri araştırılmıştır. Çözünme kinetiğini tahmin etmek için sonlu farklar tekniği kullanılarak ara yüzeyin hareketsiz olduğu düşünülen sabit bir ara yüz modelleme ve partikül-matris ara yüzeyinin hareket ettiği hareketli bir sınır modelleme olmak üzere iki farklı yaklaşım geliştirilmiştir. Ayrıca, termodinamik analiz, faz diyagramı ve farklı fazların kararlılığının yanı sıra, matristeki partikül-matris ara yüzeyindeki denge konsantrasyonlarının analizini gerçekleştirmek için ThermoCalc hesaplamalı malzeme mühendisliği yazılımı kullanılmıştır. İki modelin sanal verileri, mikroyapısal karakterizasyon ile elde edilen deneysel verilerle karşılaştırılmıştır. Geliştirilen modeller ile tek veya çok bileşenli küresel bir parçacığın tek boyutta çözünme sürecinin tanımlanabildiği tespit edilmiştir. Durağan ara yüz yaklaşımı, ikincil fazın daha yüksek hacim fraksiyonlarında çözünme davranışının tahmin edilmesinde makul sonuçlar sağlasa dahi, daha düşük hacim fraksiyonlarında, sonuçların deneysel ölçümlerden saptığı gözlemlenmiştir. Diğer yandan, hareketli sınır yaklaşımı ile ikincil fazın nihai çözünme süresinin tahmin edebildiği görülmüştür (Sadeghi ve diğ., 2017).

2.3. Küresel Alüminyum Döküm Sektöründe Türkiye'nin Yeri

Ülkemiz alüminyum ile 1950'li yıllarda tanışmış ve sektörel uygulamalar, bina doğramaları, mutfak eşyaları ve elektrik enerjisi naklinde kullanılan iletkenlerin yapımı ile başlamıştır. Gelişmiş ülkeler ile kıyaslandığında, Türkiye'de daha kısa bir uygulama geçmişine sahip alüminyuma olan talep, özellikle dayanıklı tüketim mallarının üretimi ve otomotiv sanayindeki ilerlemeler ile artmıştır. Bugün, ülkemizde alüminyum sektörü sürekli büyümekte ve gelişmektedir. Alüminyum ürünlerin Asya, Avrupa ve Afrika pazarlarına ihracı ise, gün geçtikçe artmaktadır (Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği). İstanbul Demir ve Demir Dışı Metaller İhracatçılar Birliği (İDDMİB)'nin hazırladığı "Türkiye Alüminyum Sektörü" raporuna göre, 2015 yılında ülkemizde ihraç edilen alüminyum ürün gruplarına ait dağılım grafiği Şekil 7'deki gibidir. Bu grafikteki değerlere göre ihracat yapılan ülkeler bazında değerlendirme yapıldığında, en yüksek ihracatın yapıldığı ülke 390 milyon ABD doları ile Almanya olarak karşımıza çıkmaktadır. Almanya'yı hemen ardından 124 milyon ABD doları ile Irak ve 116 milyon ABD doları ile Birleşik Krallık takip etmektedir. Alüminyum döküm ürünlerin ihracatına bakıldığında, 118,80 ABD doları ile tabloda önemli bir yer tutmaktadır. 2015 yılında toplamda 2,3 milyar ABD doları ihracat rakamlarına ulaşan alüminyum endüstrisinde, 2023 yılında 8 milyar ABD dolarına ulaşılması hedeflenmektedir (IMMDİB, 2015).



Şekil 7:

2015 yılında ülkemizde ihraç edilen alüminyum ürün gruplarına ait dağılım grafiği

Ülkemiz, özellikle döküm sektöründeki üretimi, Avrupa ülkelerini takip etmektedir. Fakat, Türkiye Alüminyum Sanayiciler Derneği'nin (TALSAD) raporuna göre, ülkemizdeki işleyen dökümhanelerin verimlilikleri ve çalışan sayısı başına üretim miktarı çok düşüktür. Buna karşın, yüksek işçilik, vergiler ve enerji maliyeti, alüminyum dökümde ülkemizin diğerleriyle rekabet edebilirliğini düşürmektedir. Ülkemizde daha çok kısa serili olarak adlandırılan ve Avrupa'da üretilmesi istenmeyen ürünlerin üretimleri gerçekleştirilmektedir. Bu açıdan bakıldığında, alüminyum dökümde enerji ve işçiliğin önemi daha da vurgulanmaktadır. Yeni alarım, ürün ve proses geliştirme yetenekleri ve maliyetlerinin optimizasyonu, ülkemizin rekabet gücünü artıracak önemli hususlardır. Bu kapsamda, Türk döküm sanayisi, Ar-Ge desteğine ve Üniversite-Sanayi-TÜBİTAK iş birliğine çok ihtiyaç duymaktadır (TALSAD, 2019). Ülkemizin gerçeklerine uygun, endüstriyi yönlendirici ve heveslendirici, küresel rekabet gücü yüksek, kalıcı politikaların geliştirilmesi ve uygulamaya alınması da alüminyum sektörü için elzemdir.

TMMOB Metalurji Mühendisleri Odasının 2019 yılı Alüminyum Raporu'nda, Türkiye alüminyum döküm sanayinde üretim kapasitesi 55 bin ton/yıl olarak belirtilmiştir. Bu üretim kapasitesinin artırılması, ülkemizin öncelikli hedefleri arasında yer almaktadır. Öte yandan, sanayileşmenin beraberinde getirdiği kaçınılmaz çevre problemlerinin doğal yaşam üzerindeki olumsuz etkileri tehlikeli ve göz ardı edilemeyecek boyutlara ulaşmıştır. Ekolojik dengenin ve Dünyamızın sahip olduğu enerji kaynaklarının korunmasına yönelik en etkin endüstriyel yöntem, hafif ve geri dönüşümlü malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasıdır. Alüminyum alaşımları, çevre dostu ve neredeyse %100 oranında geri dönüşümü olan bir metal olarak, endüstrinin ve doğanın bu ihtiyacını karşılayabilmektedir. Bu bağlamda gerek yaşam kalitesi gerekse enerji tasarrufu açısından tüketilen alüminyumun oranı yükselmektedir. Bir diğer açıdan, demirle olan rekabetinde, alüminyum alaşımları paslanmaması nedeniyle endüstrinin mihenk taşı olma yolunda hızla ilerlemektedir. Yine TMMOB Metalurji Mühendisleri Odasının 2019 yılı Alüminyum Raporu'nda, yakın gelecekte, ithalatın artması ve dünya piyasalarında yaşanan ve yaşanacak olumsuzluklardan, ülkemizdeki alüminyum endüstrisinin de etkilenmesinin kaçınılmazlığı ve bu etkiyi en aza indirmek için, en az ülkemizin büyüme hızı oranında, ülkemizde tek birincil alüminyum üretimi yapan Seydişehir Alüminyum Tesislerinin mevcut kapasitesinin artırılması gerektiği de vurgulanmıştır.

3. SONUÇLAR

Alüminyum döküm alaşımlarının mikroyapısal, mekanik ve ısıl işlem özelliklerinin geliştirilmesi, alaşım elementlerinin etkilerinin teorik, deneysel ve simülasyon çalışmaları ile aydınlatılması, tane inceltme ve modifikasyon süreçlerinde master alaşımlar ve mekanizmalar temelinde yenilikçi çalışmaların gerçekleştirilmesine yönelik endüstriyel uygulama ve akademik araştırma çalışmaları alüminyum döküm endüstrisine bugüne kadar yön vermiştir. Özellikle son yıllarda gerek alaşım geliştirme gerekse döküm sürecinde hesaplamalı malzeme mühendisliği tekniği ve döküm simülasyonlarından yararlanılarak gerçekleştirilen çalışmaların artışı, konuya bir başka boyut kazandırmıştır. Bilgisayar destekli çalışmaların sayısının ve kalitesinin artışı, alüminyum döküm alaşımlarına dair sanal bilgi deposunun oluşturulması ve uygulamalarda kullanılması için son derece önemlidir. Bu tip çalışmalar, hali hazırda ticari olarak kullanılan hesaplamalı malzeme mühendisliği ve döküm simülasyonu programlarına veri sağlamakta ve böylelikle yazılımların gerçek verilerle uyumu geliştirilmektedir.

Hafifliği, enerji verimliliği, gelişmiş termal ve elektriksel özellikleri, görselliği ve daha birçok karakteristik yönü ile pek çok endüstriyel alanda çelik malzemelerin yerini alacak olan alüminyum döküm alaşımları ve üretim süreci geliştirilmeye son derece açık bir konudur. Bu derleme makale çalışması, konuyla ilgili çalışan endüstriyel sektöre ve akademisyenlere verimli bir kaynak niteliği taşımaktadır.

ÇIKAR ÇATIŞMASI

Bu çalışmanın yazarları olarak, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylarız.

YAZAR KATKISI

Tuğçe YAĞCI ve Adem KORKMAZ çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri toplama, analiz ve yorumlama, makale taslağının oluşturulması, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi ile son onay ve tam sorumluluk, Ümit CÖCEN ve Osman ÇULHA, çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi ve yönetimi, veri analizi ve yorumlama, fikrinsel içeriğin eleştirel incelemesi ile son onay ve tam sorumluluk kısımlarına katkı sağlamışlardır.

KAYNAKLAR

1. Askeland, D. R., Fulay, P. P. ve Wright, W. J. (1990) *The Science and Engineering of Materials*, Second Edition, Chapman & Hall, İstanbul.
2. Apelian, D., Sigworth, G. K. ve Whaler, K. R. (1984) Assessment of grain refinement and modification of Al-Si foundry alloys by thermal analysis, *American Foundry Society*, 92, 297-307. doi:10.1016/j.jallcom.2009.11.122.
3. Assadiki, A., Esin, V. A., Bruno, M. ve Martinez, R. (2018) Stabilizing effect of alloying elements on metastable phases in cast aluminum alloys by CALPHAD calculations, *Computational Materials Science*, 145, 1–7. doi:10.1016/j.commatsci.2017.12.056.
4. Brough, D. ve Jouhara, H. (2020) The aluminium industry: A review on state-of-the-art technologies, environmental impacts and possibilities for waste heat recovery, *International Journal of Thermofluids*, 1(2), 1-39. doi:10.1016/j.ijft.2019.100007.
5. Bolzoni, L., Nowak, M. ve Hari Babu, N. (2015a) Grain refinement of Al-Si alloys by Nb-B inoculation. Part II: Application to commercial alloys, *Materials & Design (1980-2015)*, 66, 376–383. doi:10.1016/j.matdes.2014.08.067.

6. Bolzoni, L. Nowak, M. ve Hari Babu, N. (2015b) Grain refining potency of Nb–B inoculation on Al–12Si–0.6Fe–0.5Mn alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 623, 79–82. doi:10.1016/j.jallcom.2014.10.069.
7. Bolzoni, L. ve Hari Babu, N. (2019) Towards industrial Al-Nb-B master alloys for grain refining Al-Si alloys, *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 5631-5638. doi:10.1016/j.jmrt.2019.09.031.
8. Brůna, M., Bolibruchová, D. ve Pastirčák, R. (2017) Numerical Simulation of Porosity for Al Based Alloys, *Procedia Engineering*, 177, 488–495. doi:10.1016/j.proeng.2017.02.250.
9. Campbell, J. (1991) *Castings*, Butterworth-Heinemann, United Kingdom.
10. Campbell, J. (2003). *Castings: The New Metallurgy Of Cast Metals*, Butterworth Heinemann, United Kingdom.
11. Backerud, L. (1983) *How Does a Good Grain Refiner Work*, Light Metal Age, 6–12.
12. Cui, X. L., Wu, Y. Y. ve Liu, X. F. (2014) Preparation of a novel Al-3B-5Sr master alloy and its modification and refinement performance on A356 alloy, *Journal of Alloys and Compounds*, 615, 906-911. doi:10.1016/j.jallcom.2014.06.205.
13. Chen, Z., Kang, H., Fan, G., Li, J., Lu, Y., Jie, J. ve Wang, T. (2016) Grain refinement of hypoeutectic Al-Si alloys with B, *Acta Materialia*, 120, 168–178. doi:10.1016/j.actamat.2016.08.045.
14. Choi, I. K., Cho, S. H., Kim, S. J., Jo, Y. S. ve Kim, S.H. (2018) Improved Corrosion Resistance of 5XXX Aluminum Alloy by Homogenization Heat Treatment, *Coatings*, 8(1), 39. doi:10.3390/coatings8010039.
15. Casari, D., Ludwig, T. H., Merlin, M., Arnberg, L. ve Garagnani, G. L. (2014) The effect of Ni and V trace elements on the mechanical properties of A356 aluminium foundry alloy in as-cast and T6 heat treated conditions, *Materials Science and Engineering A*, 610, 414–426. doi:10.1016/j.msea.2014.05.059.
16. Demirci, M.K. (2011) Dünya Alüminyum Ticaretinde Türkiye'nin Yeri, 5. Alüminyum Sempozyumu, İstanbul.
17. Dwight, J. (2002) *Aluminium Design and Construction*, Taylor & Francis e-Library, New York, 320.
18. Do Lee, C. (2013) Effect of T6 heat treatment on the defect susceptibility of fatigue properties to microporosity variations in a low-pressure die-cast A356 alloy, *Materials Science and Engineering A*, 559, 496–505. doi:10.1016/j.msea.2012.08.131.
19. Eroğlu, G., ve Şahiner, M. (2018) Dünya ve Türkiye’de Alüminyum, Maden Tetkik Arama Genel Müdürlüğü, Fizibilite Etütleri Daire Başkanlığı.
20. Fortini, A., Merlin, M., Fabbri, E., Pirletti, S. ve Garagnani, G. L. (2016) On the influence of Mn and Mg additions on tensile properties, microstructure and quality index of the A356 aluminum foundry alloy, *Procedia Structural Integrity*, 2, 2238-2245. doi:10.1016/j.prostr.2016.06.280.
21. Hwang, J. Y., Doty, H.W. ve Kaufman, M. J. (2008) The effects of Mn additions on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Cu casting alloys, *Materials Science and Engineering A*, 488, 496-504. doi:10.1016/j.msea.2007.12.026.
22. Haskel, T., Verran, G. Q. ve Barbieri, R. (2018) Rotating and bending fatigue behavior of A356 aluminum alloy: effects of strontium addition and T6 heat treatment, *International Journal of Fatigue*, 114, 1-10. doi:10.1016/j.ijfatigue.2018.04.012.

23. Jiao, X. Y., Liu, C. F., Guo, Z. P., Tong, G. D., Ma, S. L., Bi, Y. ve Xiong, S. M. (2020) The Characterization of Fe-rich Phases in a High-Pressure Die Cast Hypoeutectic Aluminum-Silicon Alloy, *Journal of Materials Science and Technology*, 51, 54-62. doi:10.1016/j.jmst.2020.02.040.
24. <https://www.turkishmetals.org/download/files/downloads/ihracat/raporlar/2015/Kasim.pdf> Erişim Tarihi: 17.02.2021, Konu: *Türkiye Alüminyum Sektörü Raporu*, 2015, İstanbul Demir ve Demir Dışı Metaller İhracatçıları Birliği.
25. Kayalı E.S. ve Ensari C. (1986) *Metallere Plastik Şekil Verme İlke ve Uygulamaları*, İstanbul, İ.T.Ü. Metalurji Bölümü, 90.
26. Kamali, H., Emamy, M. ve Razaghian, A. (2014) The influence of Ti on the microstructure and tensile properties of cast Al-4.5Cu-0.3Mg alloy, *Materials Science and Engineering A*, 590, 161-167. doi: /10.1016/j.msea.2013.10.032.
27. Kabir M. S., Minhaj T. I., Ashrafi E. A. ve Islam M. M. (2014) The influence of ageing time and temperature on the structure and properties of heat treated A201.0 aluminum alloy, *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 3(3), 78-83.
28. Lee, C. (2016) Effect of Ti-B addition on the variation of microporosity and tensile properties of A356 aluminium alloys, *Materials Science and Engineering A*, 668, 152-159. doi:10.1016/j.msea.2016.05.059.
29. Lumley, R. (2011) *Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production, Processing and Applications*, Woodhead Publishing Limited.
30. Li, J., Yang, G., Hage, F. S., Chen, Z., Wang, T., Ramasse, Q. M. ve Schumacher, P. (2017) Heterogeneous nucleation of Al on AlB₂ in Al-7Si alloy, *Materials Characterization*, 128, 7-13. doi:10.1016/j.matchar.2017.03.029.
31. Lee, C. D., So, T. I. ve Shin, K. S. (2014) Effect of geometric array of eutectic silicon particles and microscopic voids on the tensile behaviour of a cast aluminium alloy, *Materials Science and Engineering A*, 599, 28-37. doi:10.1016/j.msea.2014.01.063.
32. Lee, C., Youn, J., Lee, Y. ve Kim, Y. (2016) Defect Susceptibility of Tensile Properties to Microporosity Variation in As-Cast Al-xSi Alloys, *International Journal of Metalcasting*, 11(1), 84-93. doi:10.1007/s40962-016-0107-6.
33. Liu, T., Kärkkäinen, M., Nastac, L., Arvikar, V., Levin, I., ve Brewer, L. N. (2020) Iron-rich intermetallics in high pressure die cast A383 aluminum alloys, *Intermetallics*, 126, 106814. doi:10.1016/j.intermet.2020.106814.
34. Li, S., Huang, Z., Chen, W., Liu, Z. ve Qi, W. (2013) Quench sensitivity of 6351 aluminum alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 23(1), 46-52. doi:10.1016/S1003-6326(13)62427-9.
35. Mazahery, A., Habibnejad-korayem, M. ve Takroui, K. (2019) Performance of europium in microstructural modification of high strength lightweight aluminum components, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(3), 250-254. doi:10.1016/j.ijlmm.2019.01.003.
36. Navaneeth, V. (2009). Developing an effective die cooling technique for casting solidification, *Master of Thesis*, Auckland University of Technology, New Zealand.
37. Rooy, E. L. (1990) *Introduction to Aluminum and Aluminum Alloys*, Zorc, T. B., Henry, S. D., *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special Purpose Materials*, ASM International, Ohio, 1328.

38. Sjölander, E. ve Seifeddine, S. (2010) The heat treatment of Al–Si–Cu–Mg casting alloys, *The Journal of Materials Processing Technology*, 210(10), 1249–1259. doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.03.020.
39. Shaha, S. K., Czerwinski, F., Kasprzak, W., Friedman, J. ve Chen, D. L. (2015) Microstructure and mechanical properties of Al-Si cast alloy with additions of Zr-Ti-V, *Materials & Design*, 83, 801-812. doi:10.1016/j.matdes.2015.05.057.
40. Sadeghi, I., Wells, M. A. ve Esmaili, S. (2017) Modeling homogenization behavior of Al-Si-Cu-Mg aluminum alloy, *Materials & Design*, 128, 241–249. doi:10.1016/j.matdes.2017.05.006.
41. Shang, B. C., Yin, Z. M., Wang, G., Liu, B. ve Huang, Z. Q. (2011) Investigation of quench sensitivity and transformation kinetics during isothermal treatment in 6082 aluminum alloy, *Materials & Design*, 32(7), 3818–3822. doi:10.1016/j.matdes.2011.03.016.
42. TALSAD, (2020) Dünya ve Türkiye’de Alüminyum 2020 Yılı Raporu, Alüminyum Sektörü Raporu, 2020, Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği.
43. http://talsad.org.tr/wp-content/uploads/2020/11/TALSAD-Dünyada-Alüminyum_1.pdf Erişim Tarihi: 17.02.2021, Konu: *Alüminyum Sektörü Raporu*, 2019, Türkiye Alüminyum Sanayicileri Derneği.
44. https://www.metalurji.org.tr/dergi/dergi137/d137_1445.pdf Erişim Tarihi: 17.02.2021, Konu: *Alüminyum Raporu*, 2019, TMMOB Metalurji Mühendisleri Odası.
45. Yang, C., Li, Y., Dang, B., Lü, H. ve Liu, F. (2015) Effects of cooling rate on solution heat treatment of as-cast A356 alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25(10), 3189–3196. doi:10.1016/S1003-6326(15)63952-8.
46. Yi, W., Gao, J., Tang, Y. ve Zhang, L. (2020) Thermodynamic descriptions of ternary Al–Si–Sr system supported by key experiments, *Calphad*, 68, 101732. doi:10.1016/j.calphad.2019.101732.
47. Zhao, J.W. ve Wu, S.S. (2010). Microstructure and Mechanical Properties of Rheodiecasted A390 Alloy, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 3(0), 754-757.
48. Zhu, M., Jian, Z., Yang, G. ve Zhou, Y. (2012) Effects of T6 heat treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of the modified A356 alloys, *Materials & Design (1980-2015)*, 36, 243–249. doi:10.1016/j.matdes.2011.11.018.
49. Zhu, M., Jian, Z., Yao, L., Liu, C., Yang, G. ve Zhou, Y. (2010). Effect of mischmetal modification treatment on the microstructure, tensile properties, and fracture behavior of Al-7.0%Si-0.3%Mg foundry aluminum alloys, *Journal of Materials Science*, 46(8), 2685–2694. doi:10.1007/s10853-010-5135-7.