

## Stronsiyum ve stronsiyum-magnezyum katkılarının ötektiküstü Al-17Si alaşımının içyapı ve mekanik özelliklerine etkisi

### Effect of strontium and strontium-magnesium additions on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-17Si alloy

Ali Paşa HEKİMOĞLU<sup>1\*</sup>, Gizem AYATA<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Rize, Türkiye.  
ali.hekimoglu@erdogan.edu.tr, gizemayata61@gmail.com

Geliş Tarihi/Received: 12.06.2018, Kabul Tarihi/Accepted: 22.08.2018  
\* Yazışılan yazar/Corresponding author

doi: 10.5505/pajes.2018.46343  
Araştırma Makalesi/Research Article

#### Öz

Al-17Si, Al-17Si-0,1Sr ve Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımları kokil kalıba döküm yöntemi ile üretilmiştir. Alaşımların yapısal ve mekanik özellikleri üretilen alaşım külçelerinden talaşlı imalat yöntemiyle hazırlanan numuneler üzerinde yapılan incelemeler ile belirlenmiştir. İçyapı incelemeleri standart metalografik yöntemler ile hazırlanan ancak dağlama yapılmayan numuneler üzerinde gerçekleştirilmiştir. İncelenen alaşımların sertlik değerleri Brinell sertlik ölçüm yöntemi, mekanik özellikleri ise universal bir çekme deneyi makinesinde yapılan testler yardımıyla belirlenmiştir. İkili Al-17Si alaşımının içyapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritleri, primer silisyum, ötektik Al-Si ve  $\beta$  fazlarından oluştuğu, üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımının içyapısının ise ikili Al-17Si alaşımındaki fazlara ek olarak  $Al_3Si_2Sr_2$  fazını içerdiği görülmüştür. Üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımına %0,6 oranında yapılan magnezyum katkısının ise bu alaşımın içyapısında  $Mg_2Si$  fazının oluşmasına yol açtığı gözlemlenmiştir. Al-17Si alaşımının sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri sırasıyla 57 BSD, 93,7 MPa, 127,6 MPa ve %2,4, olarak ölçülmüştür. Bu değerler Al-17Si-0,1Sr alaşımında 55 BSD, 95,2 MPa, 137,9 MPa ve %2,9, Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımında ise sırasıyla 70 BSD, 123,2 MPa, 141,1 MPa ve %1,1 olarak ölçülmüştür. Stronsiyum katkısının ikili Al-17Si alaşımının sertliğini çok az da olsa düşürdüğü, akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerlerini ise iyileştirdiği görülmüştür. Magnezyum katkısının ise üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımının akma ve çekme mukavemetini önemli ölçüde artırdığı ancak, kopma uzamasını azalttığı belirlenmiştir. Stronsiyum ve stronsiyum-magnezyum katkılarının Al-17Si alaşımının mekanik özelliklerine etkisi alaşımların yapısal özelliklerine dayandırılarak açıklanmıştır.

**Anahtar kelimeler:** Al-17Si esaslı alaşımlar, İçyapı, Mekanik özellikler

#### Abstract

Al-17Si, Al-17Si-0,1Sr and Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alloys were produced by permanent mold casting method. The structural and mechanical properties of the alloys were determined by the investigations carried out on specimens prepared by machining of the produced alloy ingots. The microstructural examinations were carried out on specimens prepared by standard metallographic methods but without etching. Their hardness and mechanical properties were determined by Brinell hardness measurement method and universal tensile tests, respectively. The microstructure of the binary Al-17Si alloy consisted of aluminum-rich  $\alpha$  dendrites, primary silicon, eutectic Al-Si and  $\beta$  phases. Ternary Al-17Si-0,1Sr alloy contained  $Al_3Si_2Sr_2$  phase in addition to phases in the binary Al-17Si alloy. It was observed that the 0,6% magnesium addition to the ternary Al-17Si-0,1Sr alloy cause to form of  $Mg_2Si$  phase in the microstructure of this alloy. The values of the hardness, yield strength, tensile strength and elongation to fracture of Al-17Si alloy were measured as 57 BSD, 93,7 MPa, 127,6 MPa and 2,4%, respectively. These values were measured as 55 BSD, 95,2 MPa, 137,9 MPa and 2,9% in Al-17Si-0,1Sr alloy and 70 BSD, 123,2 MPa, 141,1 MPa and 1,1% in Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alloy. The addition of strontium reduced the hardness of the binary Al-7Si alloy to a lesser degree but improved the yield and tensile strength and elongation to fracture values. Magnesium addition significantly increased the yield and tensile strength of the ternary Al-17Si-0,1Sr alloy but decreased their elongation to fracture. The effects of strontium and strontium-magnesium additions on the mechanical properties of the Al-17Si alloy were discussed in terms of their structural properties.

**Keywords:** Al-17Si based alloys, Microstructure, Mechanical properties

## 1 Giriş

Otomotiv, savunma, uzay ve havacılık sanayilerinde yapılan imalatlarda ürün ağırlıklarının azaltılmasının yanı sıra işgücü ve enerji verimliliğinin (yakıt ekonomisi) artırılması büyük önem taşımaktadır. Bu durum söz konusu sanayi dallarında kullanılmak üzere yeterli mukavemet değerlerine sahip ancak daha hafif malzemelerin geliştirilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Bu ihtiyacı karşılamak için yoğunluğu düşük, özgül mukavemeti, aşınma direnci ve korozyon dayanımı yüksek ve aynı zamanda üretimi ve şekillendirilmesi kolay olan malzemelerin geliştirilmesi üzerine yoğun çalışmalar yapılmaktadır [1],[2]. Yoğunluklarının düşük olmasının yanı sıra döküm ve işlenebilirliklerinin iyi olması nedeniyle alüminyum-silisyum (Al-Si) esaslı alaşımlar üzerinde son yıllarda yoğun araştırma ve geliştirme çalışmaları yapılmıştır [1]-[3]. Bu çalışmalar sonucunda uygun içyapı, sertlik,

mukavemet ve süneklik kombinasyonuna sahip olan pek çok Al-Si esaslı alaşım geliştirilmiş ve bunlardan bazılarının kimyasal bileşimleri hali hazırda standartlaştırılmıştır [3]. Bu alaşımların yapısal ve mekanik özellikleri başta silisyum oranı olmak üzere içerdikleri diğer alaşım elementlerine göre de önemli farklılıklar göstermektedir. Söz konusu alaşımlar ikili Al-Si faz diyagramına [4] göre ötektik bileşim [5] oranından (%12,6Si) daha az oranda silisyum içeriyorsa ötektik altı [6], daha çok miktarda silisyum içeriyorsa ötektik üstü [7] bileşim esaslı alaşım olarak sınıflandırılmıştır. Ötektik altı bileşime sahip olan Al-Si alaşımları daha iyi süneklik ve mukavemet özellikleri sergilerken, ötektik üstü bileşimdeki bir başka deyişle daha yüksek silisyum içeren Al-Si alaşımlarının daha yüksek sertlik ve daha az sünekliğe sahip oldukları bilinmektedir [3]. Bununla birlikte söz konusu alaşımların mekanik özelliklerinin, silisyum oranının yanı sıra ötektik silisyum fazının morfolojisine de önemli ölçüde bağlı olduğu

ortaya koyulmuştur [8],[9]. Şöyle ki, ötektik silisyum fazı ince taneli ve nispeten küresel hale getirilmiş, bir başka deyişle modifiye edilmiş olan Al-Si alaşımlarının modifiye edilmemiş uzun iğne şekilli ötektik silisyum fazı içerene göre daha üstün süneklik ve mukavemet değerleri sergilediği görülmüştür [10],[11].

Son yıllarda Al-Si alaşımları üzerine yapılan araştırma ve geliştirme çalışmaları yapısal özellikleri [8] ile birlikte sertlik, mukavemet ve süneklik değerlerinin farklı alaşım ve/veya modifikasyon elementleri kullanılarak daha da geliştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır, [12],[13]. Bu çalışmalarda özellikle bakır [14], nikel [15], çinko [16], vanadyum [17], demir [12], [15] ve zirkonyum [18],[19] gibi alaşım elementlerinin Al-Si alaşımlarının sertlik ve mukavemetlerini artırdığı görülmüştür. Ancak, yoğunlukları alüminyum ve silisyumun yoğunluğundan çok fazla olan bu alaşım elementleri Al-Si alaşımlarında yoğunluk artışına sebep olmakta ve dolayısıyla özgül mukavemetlerini olumsuz etkilemektedir. Bu problemler, araştırmacıları özgül mukavemetlerini etkilemeden, dökümlerinde çekirdeklenmeyi artırma [9],[20] veya tane küçültme [21],[22], dendirit kol mesafesini azaltma [23],[24], ötektik silisyum parçacıklarının şeklini ve dağılımlarını değiştirme [8],[25] veya katı çözünürlük [26],[27] sergileyen elementler kullanma yoluyla Al-Si esaslı alaşımların yapısal veya mekanik özelliklerini iyileştirme yönünde çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Bu çalışmalardan elde edilen bulgularda stronsiyumun (Sr) ötektik silisyum parçacıklarını modifiye ederek, magnezyumun (Mg) ise katı çözünürlük sergileyerek ötektik altı ve yakın ötektik bileşim esaslı Al-Si alaşımlarının hem yapısal hem de sertlik ve mekanik özelliklerini iyileştirdiği görülmüştür [12],[22],[24], [25],[28],[29]. Diğer taraftan, Sr ve Mg katkılarının belli oranları aşması durumunda söz konusu Al-Si alaşımlarının içyapısında sırasıyla Al<sub>4</sub>Sr ve Mg<sub>2</sub>Si gibi bileşiklerin oluşmasına yol açtığı ve genellikle dendiritler arası bölgelerde oluşan bu fazların bazı durumlarda yapıda çatlak oluşumunu ve ilerlemesini kolaylaştırdığı için mukavemeti düşürdüğü ortaya konulmuştur [21]. Al-Si esaslı alaşımların özelliklerine Sr ve Mg katkılarının [30] etkilerinin incelendiği bir çalışmada Al<sub>4</sub>Sr fazının %0,1 ve daha yüksek Sr, Mg<sub>2</sub>Si fazının ise %0,6 ve daha yüksek Mg katkılarından sonra oluştuğu görülmüştür. Literatürde, Al-Si alaşımlarının içyapı ve mekanik özelliklerine yukarıda belirtilen oranlarda veya bu oranlara yakın değerlerdeki Sr ve Mg katkılarının etkisinin incelendiği çalışmalar ötektik altı veya ötektik bileşime yakın alaşımlarla sınırlı kalmıştır [2],[12],[24],[27]-[29]. Bir başka deyişle, söz konusu oranlardaki Sr ve Mg katkılarının ötektik üstü Al-Si alaşımlarının yapısal ve mekanik özelliklerine etkilerinin incelendiği bir çalışma bulunmamaktadır. Özellikle motor silindir bloğu, piston, karbüratör gövdesi ve çeşitli bağlantı elamanlarının imalatında kullanılan [1],[2] ötektik üstü Al-Si esaslı alaşımlar için literatürde bu tür bir çalışma yapılmaması eksiklik olarak görülmektedir. Bu nedenle bu çalışmada, ikili Al-Si alaşımları içerisinde en yüksek akma mukavemetine sahip olduğu bilinen [30] ötektik üstü Al-17Si alaşımı seçilip, bu alaşıma %0,1Sr ve %0,1Sr+0,6Mg katkısı yapılmıştır. Böylece, hem sadece ötektik modifikasyonunun hem de ötektik modifikasyonu ve katı çözünürlük mekanizmalarının aynı anda oluşması durumunda, ötektik üstü alaşımların yapısal ve mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimi araştırıp, üretilecek çoklu Al-17Si esaslı alaşımlar için üçlü veya dörtlü yeni bir baz alaşım geliştirilmesi amaçlanmıştır.

## 2 Deneysel çalışma

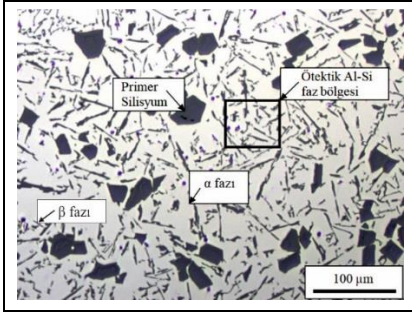
Bu çalışma kapsamında ötektik üstü bileşime sahip üç adet Al-Si alaşımı üretilmiştir. Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri Tablo 1'de verilmiş olup, bu alaşımların silisyum, stronsiyum ve magnezyum oranlarının belirlenmesinde "Alüminyum ve alüminyum alaşımları-Dökümler-Kimyasal Bileşim ve Mekanik Özellikler" isimli uluslararası EN 1706 Standardı ile birlikte yapılan bir ön çalışmada [30] elde edilen mekanik deney bulguları göz önüne alınmıştır. Söz konusu alaşımların üretimi için ağırlıkça uygun kimyasal bileşimi verecek oranlarda yüksek saflık derecesine sahip (%99,9) alüminyum, metalik silisyum, magnezyum ve Al-15Sr alaşımı orta frekanslı bir indüksiyonlu ergitme ocağında ergitilerek karıştırılmıştır. Sıvı durumdaki alaşımlar kimyasal bileşimlerine göre belirlenen uygun döküm sıcaklıklarında (650-750 °C), oda sıcaklığında tutulan konik şekilli ve  $\phi 60 \times \phi 110 \times 260$  boyutlarındaki SAE 8620 çeliğinden üretilmiş olan bir kokil kalıba dökülerek katılaştırılmıştır. İyapı incelemeleri için üretilen alaşımlara ait külçelerden talaşlı imalat yöntemiyle alınan numuneler standart metalografik yöntemler ile hazırlanmıştır. Parlatılmış durumdaki metalografi numuneleri yüzeylerine herhangi bir dağlama işlemi yapılmadan önce ışık mikroskobunda daha sonra da taramalı elektron mikroskobunda (SEM) incelenmiş ve içyapılarını gösteren uygun fotoğraflar (mikrograf) çekilmiştir. Alaşımların içyapısını oluşturan fazların belirlenmesinde X-ışını kırınımı (XRD) desenlerinden faydalanılmıştır. Söz konusu XRD çalışmaları yassı numuneler üzerinde 3°/dk.'lık tarama hızında ve dalga boyu 1,54059 Å olan Cu-K $\alpha$  radyasyon kaynağı kullanılarak 10°-100° tarama aralığında gerçekleştirilmiştir. Alaşımların içyapısında bulunan fazların kimyasal bileşimini belirlemek amacıyla enerji dispersif spektroskopi (EDS) yöntemi kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri Brinell sertlik ölçüm yöntemi ile 62,5 kgf yük altında ve 2,5 mm çapında bilye kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşımın sertliği en az onbeş ölçümün ortalaması alınarak belirlenmiştir. Çekme deneylerinde üretilen alaşım külçelerinden talaşlı imalat yöntemiyle  $\phi 8 \times 40$  ölçü boyutlarında hazırlanan numuneler kullanılmıştır. Bu deneyler 10<sup>-3</sup> s<sup>-1</sup>'lik ortalama deformasyon hızında gerçekleştirilmiştir. Her bir alaşım için en az 6 adet çekme deneyi yapılmış ve elde edilen sonuçların ortalaması alınarak alaşımların akma ve çekme dayanımı ile kopma uzaması değerleri belirlenmiştir. Üretilen alaşımların sertlik ölçümlerinden ve çekme deneylerinden elde edilen veriler aynı zamanda Microsoft Excel programında T-testi kullanılarak istatistiksel açıdan 0,95 güven düzeyinde analiz edilmiş ve ölçülen değerler arasındaki anlamlılık p değerleri ile raporlanmıştır. Üretilen alaşımların kırılma karakteristikleri çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzeyleri üzerinde yapılan SEM incelemeleri ile belirlenmiştir.

Tablo 1: Üretilen alaşımların nominal kimyasal bileşimleri.

Alaşım	Ağırlıkça Element Oranı (%)				
		Si	Sr	Mg	Al
Al-17Si	(Alaşım 1)	17	-	-	Kalan
Al-17Si-0,1Sr	(Alaşım 2)	17	0,1	-	Kalan
Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg	(Alaşım 3)	17	0,1	0,6	Kalan

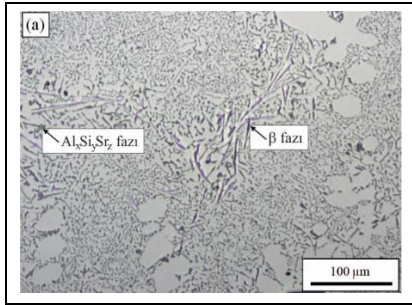
### 3 Bulgular ve irdeleme

İkili Al-17Si alaşımasının içyapısının alüminyumca zengin  $\alpha$  fazı, primer silisyum, ötektik Al-Si ve  $\beta$ (Al-Si-Fe) fazlarından oluştuğu görülmüştür, (Şekil 1). Söz konusu alaşımda bu fazların oluşumu ötektik üstü bileşim durumunda Al-Si alaşımlarında meydana gelen katılma koşullarına dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki, Al-Si faz diyagramına göre, ötektik üstü bileşime sahip Al-17Si alaşımasının katılma sırasında önce katılma sıcaklığı daha yüksek olan silisyum parçacıkları katılır. Soğuma devam ettikçe silisyum fazının katılma devam edeceğinden sıvı metalin içerisindeki silisyum oranı sürekli azalır. Sıvı metalin bileşimi ötektik bileşime ulaşıncaya kadar bu katılma davranışı devam eder. Ötektik bileşime (%87,4 Al ve 12,6 Si) ulaşıldığında ise katılma sabit bir sıcaklık ve kimyasal bileşimde gerçekleşerek ötektik faz oluşur. Yapıda primer silisyum ve ötektik fazın haricinde görülen alüminyumca zengin ötektik dışı  $\alpha$  fazı ise denge dışı soğuma şartları nedeniyle oluşmuş olabilir.  $\beta$  fazı ise safsızlık elementi olan demirin alüminyum ve silisyum ile reaksiyona girmesiyle oluştuğu bilinmektedir.

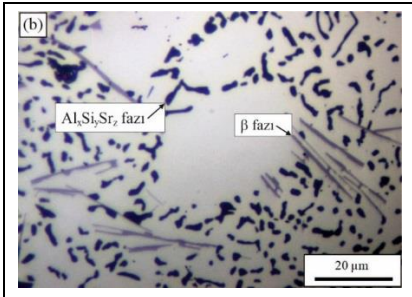


Şekil 1: Al-17Si alaşımasının içyapısını gösteren fotoğraf.

İkili Al-17Si alaşımına %0,1 oranında stronsiyum katılmasıyla elde edilen üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımında ikili alaşımda belirlenen fazlara ilave olarak  $Al_xSi_ySr_z$  fazının oluştuğu gözlenmiştir (Şekil 2).



(a): Düşük büyütme.

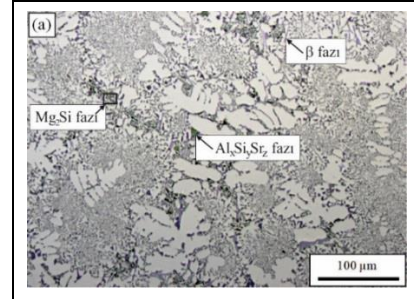


(b): Yüksek büyütme fotoğrafı.

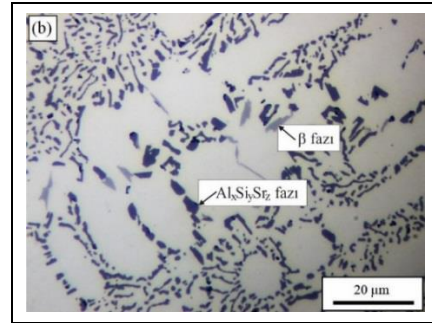
Şekil 2: Al-17Si-0.1Sr alaşımasının içyapısını gösteren.

Ayrıca, üçlü alaşımdaki primer silisyum parçacıklarının daha küçük, ötektik silisyum parçacıklarının ikili alaşımdakilere göre hem daha küçük hem de nispeten küresel şekilli olduğu görülmüştür, (Şekil 2). Bu yapısal değişimlerin yanı sıra,  $\alpha$  fazının ikili alaşımdakine göre daha belirgin bir dendirit formu sergilediği de gözlenmiştir, (Şekil 2). Üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımındaki primer ve ötektik silisyum parçacıklarının morfolojisinde ikili alaşımlardakilere kıyasla gözlenen küçülme ve küreselleşme stronsiyum katkısının döküm sonrası soğuma koşullarında neden olduğu değişime dayandırılarak açıklanmaktadır. Şöyle ki; literatürde [24],[25], stronsiyum ilavesinin ötektik reaksiyon süresince açığa çıkan ısının artmasına ve bu nedenle ikili alaşıma göre ötektik dönüşüm sıcaklığının düşmesine, ötektik noktanın sağa yani daha yüksek silisyum oranına doğru kaymasına ve dolayısıyla çekirdeklenmenin daha düşük sıcaklıkta başlamasına neden olduğu ifade edilmektedir. Çekirdek büyüme sıcaklığındaki düşmenin Al-Si ötektik çekirdeklerinin etrafındaki katılma engellemenin, bir başka deyişle çekirdek büyümesini azaltması nedeniyle ötektik silisyum parçacıklarının daha ince taneli kalmasına neden olduğu ileri sürülmektedir [31],[32]. Stronsiyum ilavesi ile özellikle silisyumca zengin fazların morfolojisinin değişmesi stronsiyumun daha ziyade silisyum parçacıkları içinde çözüldüğünün de bir göstergesi olabilir.

Al-17Si-0,1Sr alaşımına %0,6 oranındaki magnezyum katkısının  $Mg_2Si$  fazının oluşmasına neden olduğu gözlenmiştir, (Şekil 3). Magnezyum katkısının ayrıca  $\beta$  fazının ince uzun yapısının nispeten daha kısa ve kalın bir form almasına ve primer silisyum parçacıklarının ötektik faz ile dendiritler arasında kalan bölgelerde belirgin bir şekilde kümeleşmesine neden olduğu görülmüştür, (Şekil 3). Magnezyumun bu etkisi ise soğuma şartlarını değiştirmesinden kaynaklanmış olabilir.



(a): Düşük büyütme,

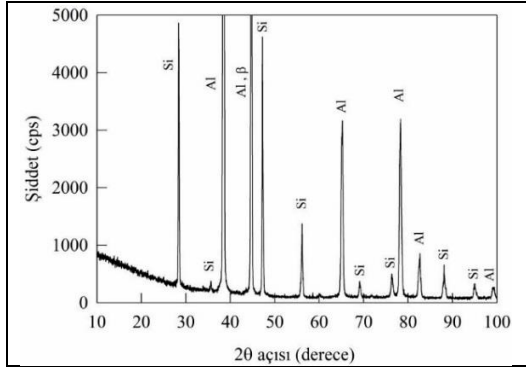


(b): Yüksek büyütme fotoğrafı.

Şekil 3: Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımasının içyapısını gösteren.

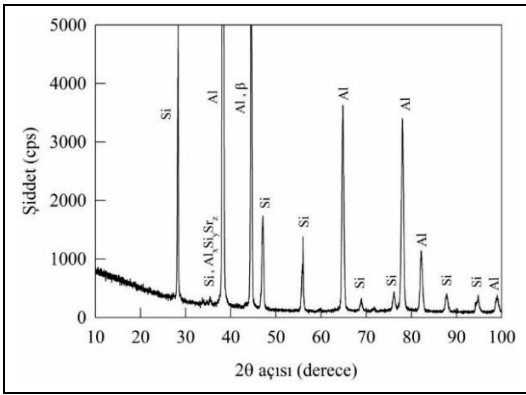
Al-17Si alaşımında alüminyum piklerinin yaklaşık olarak 39°, 45°, 65°, 78°, 83° ve 99°lerde, silisyum piklerinin 28°, 37°, 47°, 56°, 69°, 77°, 88° ve 95°lerde,  $\beta$  fazına ait pikine ise yaklaşık olarak 44°de oluştuğu görülmektedir, (Şekil 4).





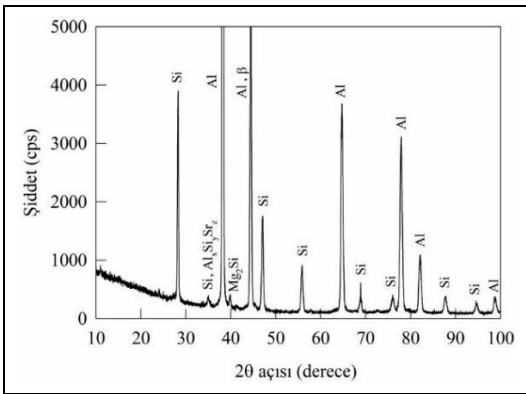
Şekil 4: Al-17Si alaşımına ait X-ışını kırınım deseni.

Al-17Si-0,1Sr alaşımlarında Al-17Si alaşımından farklı olarak yaklaşık 37°de  $Al_xSi_ySr_z$  fazının oluştuğu ve ayrıca silisyuma ait piklerin şiddetlerinde azalma olduğu gözlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 5: Al-17Si-0,1Sr alaşımına ait X-ışını kırınım deseni.

Dörtlü Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımında ise Al-17Si-0,1Sr alaşımında görülen fazların yanı sıra yaklaşık olarak 40°de  $Mg_2Si$  fazının oluştuğu görülmüştür (Şekil 6).



Şekil 6: Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımına ait X-ışını kırınım deseni.

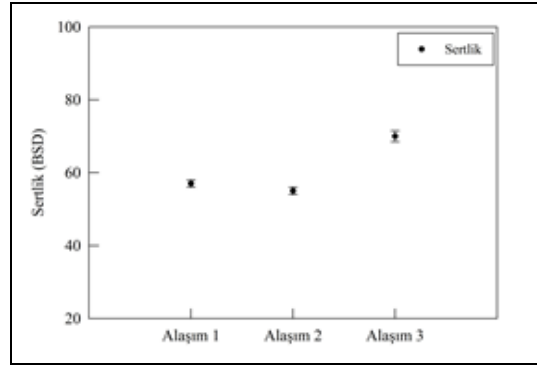
Üçlü ve dörtlü alaşımlardaki silisyum piklerinin şiddetlerinde bir azalma gözlenmiştir, (Şekil 5 ve 6). Bu azalma ötektik silisyum fazının parçalanıp daha ince taneli bir yapıya dönüşmesinden kaynaklanmış olabilir. Ayrıca, Şekil 5 ve 6'da verilen difraksiyon desenleri, stronsiyumun ve magnezyumun üçlü ve dörtlü alaşımlarda sırasıyla  $Al_xSi_ySr_z$  ve  $Mg_2Si$  fazlarının oluşmasına neden olduğunu doğrulamaktadır.

Üretilen alaşımların sertlik değerleri Şekil 7, akma dayanımları Şekil 8, çekme dayanımları Şekil 9 ve kopma uzaması değerleri Şekil 10'daki grafiklerde verilmektedir. Bu veriler üzerinde

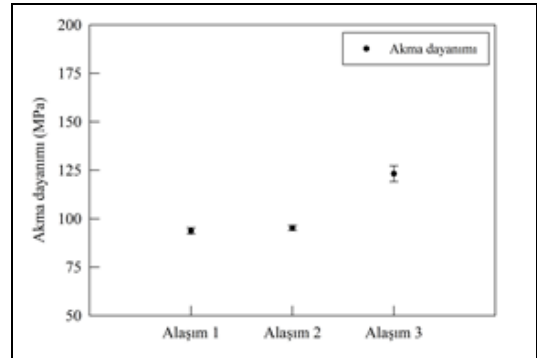
yapılan ikili T-testlerinden elde edilen p değerleri ise Tablo 2'de verilmektedir. Söz konusu p değerlerinin tamamı 0,05 değerinden oldukça düşük çıkmıştır. Bu durum alaşımların sertlik, akma dayanımı, çekme dayanımı ve kopma uzaması değerleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark olduğunu göstermektedir.

Tablo 2: Üretilen alaşımlar arasında yapılan T-testlerinden elde edilen p değerleri.

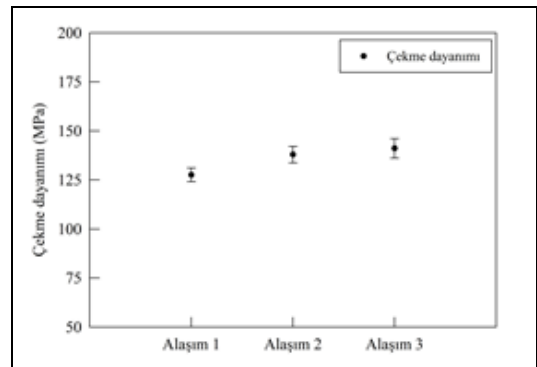
Özellik	p değeri		
	Alaşım 1- Alaşım 2	Alaşım 1- Alaşım 3	Alaşım 2- Alaşım 3
Sertlik	$8,1 \times 10^{-7}$	$3,1 \times 10^{-6}$	$1,5 \times 10^{-6}$
Akma dayanımı	$3,6 \times 10^{-2}$	$1,6 \times 10^{-6}$	$1,1 \times 10^{-7}$
Çekme dayanımı	$4,3 \times 10^{-5}$	$3,4 \times 10^{-6}$	$2,5 \times 10^{-3}$
Kopma uzaması	$4,4 \times 10^{-2}$	$5,5 \times 10^{-4}$	$1,03 \times 10^{-6}$



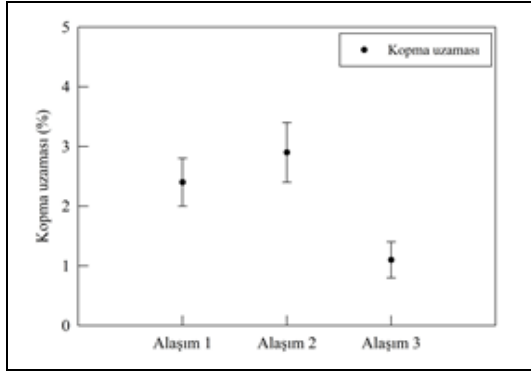
Şekil 7: Üretilen alaşımların sertlik değerleri.



Şekil 8: Üretilen alaşımların akma dayanımı değerleri.



Şekil 9: Üretilen alaşımların çekme dayanımı değerleri.



Şekil 10: Üretilen alaşımların kopma uzaması değerleri.

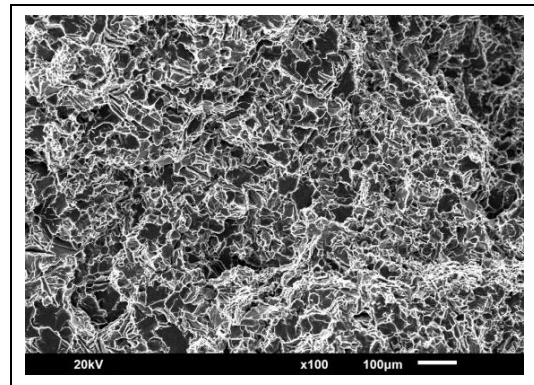
Üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımının sertliğinin (55 BSD) Al-17Si alaşımına (57 BSD) göre az da olsa düşük olduğu görülmüştür, ( $p < 0,05$ ), (Şekil 7). Stronsiyum ilave edilmesi ile ikili alaşımın sertlik değerinde meydana gelen azalma, stronsiyum katkısı ile ötektik noktanın daha yüksek silisyum oranlarına kayması ve bunun sonucunda da Al-17Si alaşımındaki ötektik faz oranının artmasından, bir başka deyişle daha sert olan primer silisyum fazının içyapıdaki oranının azalmasından kaynaklanmış olabilir. Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımının sertliği 70 BSD olarak ölçülmüştür. Bu dördü alaşımının Al-17Si-0,1Sr alaşımına göre daha yüksek sertlik sergilemesi ( $p < 0,05$ ) ise magnezyumun yapıdaki alüminyumca zengin fazlar içerisinde çözünmesi nedeniyle oluşan katı çözelti sertleşmesinden kaynaklanmış olabilir.

İkili Al-17Si alaşımının akma dayanımı 93,7 MPa, çekme dayanımı 127,6 MPa ölçülmüştür. Söz konusu dayanım değerleri Al-17Si-0,1Sr alaşımında sırasıyla 95,2 ve 137,9 MPa, Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımında ise 123,2 ve 141,1 MPa olarak ölçülmüştür (Şekil 8 ve 9). Stronsiyum ve stronsiyum-magnezyum katkılarının Al-17Si alaşımının akma ve çekme dayanımı değerlerini önemli ölçüde artırdığı görülmektedir ( $p < 0,05$ ) (Şekil 8 ve 9). Al-17Si alaşımının akma ve çekme dayanımı değerlerinde bu katkıların yol açtığı artış içyapıda neden oldukları değişime dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki Al-Si alaşımında mukavemet değerlerinin özellikle alüminyum dendritlerinin ve ötektik fazın yapıdaki durumuna ve dağılımına bağlı olduğu bilinmektedir [24]. Stronsiyum katkısı ile dendritik büyümenin artıp ötektik noktanın sağa doğru kayması sonucunda primer silisyum oranının azalması da alaşımların akma ve çekme mukavemetini önemli ölçüde etkilemiş olabilir. Ayrıca hem yapıda yeni bir fazın ( $Al_3Si_2Sr_2$ ) çökmesi (ikincil faz çökmesi) nedeniyle dislokasyon hareketlerinin zorlaşması hem de primer ve ötektik silisyum parçacıklarının incilmesi nedeniyle mikro çatlakların oluşum ve ilerlemesinin zorlaşması mukavemet değerlerinde meydana gelen artışın bir diğer sebebi olabilir. Al-17Si-0,1Sr alaşımına magnezyum katılmasıyla elde edilen dördü alaşımlarda görülen mukavemet artışı ise  $Mg_2Si$  fazının çökmesinden kaynaklanmış olabilir.

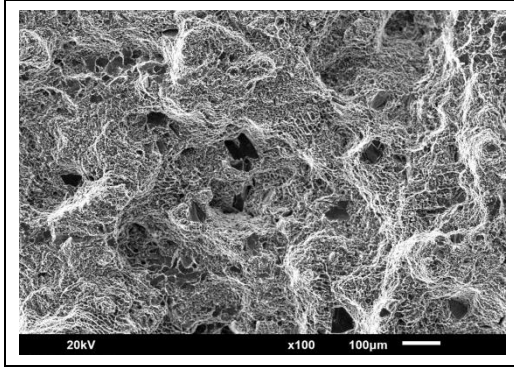
Al-17Si, Al-17Si-0,1Sr ve Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımlarının kopma uzamaları sırasıyla % 2,4, 2,9 ve 1,1 ölçülmüştür (Şekil 10). Stronsiyum katkısının alaşımların kopma uzamasını artırdığı, magnezyum katkısının ise kopma uzamasını azalttığı anlaşılmaktadır ( $p < 0,05$ ), (Şekil 10). Stronsiyum ilavesi ile kopma uzaması değerlerinde meydana gelen artış silisyuma göre daha sünek olan alüminyumca zengin  $\alpha$  fazının (dendritlerinin) ve ötektik fazın yapıdaki oranının artmasından kaynaklanmış olabilir. Ayrıca primer ve ötektik silisyum fazlarının incilmesi de kopma uzamasının artmasına

katkı yapmış olabilir. Magnezyum katkısı nedeniyle Al-17Si-0,1Sr alaşımının kopma uzaması değerlerinde meydana gelen azalma ise  $Al_3Si_2Sr_2$  fazının kalınlaşmasından, primer silisyum tanelerinin dendritler arası bölgelerde kümelenerek çatlak ilerlemesini kolaylaştırmasından ve magnezyumun kafes yapısının özelliğinden kaynaklanmış olabilir. Zira [33],[34], dendritler arası bölgelerde nispeten sert ve gevrek fazların yer alması [33] ve/veya bunların kümelenmesinin çatlak ilerlemesini kolaylaştırdığı [34],[35] bilinmektedir. Ayrıca magnezyum elementinin sahip olduğu sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısında dislokasyonların c kafes parametresi yerine c+a kafes parametresi yönünde daha düşük enerji ile daha kolay kaydığı ve bununda sünekliği olumsuz etkilediği ileri sürülmektedir [36].

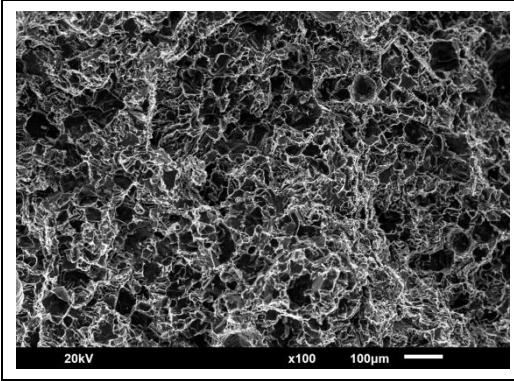
İncelenen alaşımlara ait çekme deneyi numunelerinin kırılma yüzeyleri çukurcuklardan ve klivaj düzlemlerinden oluşmaktadır, (Şekil 11-13). Al-17Si alaşımına yapılan stronsiyum katkısının kırılma yüzeyindeki çukurcuk oranını artırdığı gözlenmiştir, (Şekil 12). Al-17Si-0,1Sr alaşımına yapılan magnezyum katkısının ise bu alaşımının kırılma yüzeyinde oluşan klivaj düzlemlerinin oranının artmasına sebep olduğu görülmüştür, (Şekil 13). Alaşımların kırılma yüzeylerindeki bu gözlemler stronsiyum ve magnezyumun içyapıda neden olduğu değişikliklere dayandırılarak açıklanabilir. Şöyle ki Al-Si esaslı alaşımlarda kırılma mekanizmasının silisyum kristallerinin boyutu ve dağılımı, silisyum kristalleri ile matrisin birbirine bağlanma kuvveti ve silisyum kristallerinin kırılma kolaylığı ile ilişkili olduğu ileri sürülmektedir [37]. Kaba silisyum kristallerinden kaynaklanan kırılma taneler arası hasar karakteristiği göstermekte ve daha büyük boyutlu silisyum kristallerinde incelene göre daha fazla çatlak oluşmaktadır. Bunun nedeni, kuvvet etkisi altında matriste oluşan gerilmelerin kaba silisyum kristallerine daha yüksek oranda transfer edilmesi ve bundan dolayı silisyum kristallerinin dayanım değerlerinin daha kolay aşılması olarak açıklanmaktadır [38],[39]. Silisyum kristallerinde oluşan ve birleşen çatlaklar alüminyum fazı ile bu kristaller arasındaki sınırlar boyunca ilerleyerek alaşımdaki kırılma mekanizmasını tamamlamaktadır [37],[38]. Stronsiyum içeren Al-17Si alaşımına ait numunenin kırılma yüzeyinde ince ve hacimsel oranı nispeten daha fazla olan çukurcukların gözlenmesi stronsiyumun özellikle ötektik silisyum parçacıklarını inceltmesinden kaynaklanmış olabilir. Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımında daha fazla klivaj düzleminin gözlenmesi ise magnezyumun sıkı düzenli hegzagonal kafes yapısının kolay kayma ve düşük süneklik gösterme özelliğinden kaynaklanmış olabilir.



Şekil 11: Al-17Si alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyine ait SEM fotoğrafı.



Şekil 12: Al-17Si-0,1Sr alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyine ait SEM fotoğrafı.



Şekil 13: Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımına ait çekme deneyi numunesinin kırılma yüzeyine ait SEM fotoğrafı.

#### 4 Sonuçlar

İkili Al-17Si alaşımının içyapısı ötektik Al-Si fazı, primer silisyum, alüminyumca zengin  $\alpha$  dendritlerinden ve  $\beta$  fazından oluşmaktadır. Üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımının içyapısı ise ikili Al-17Si alaşımındaki fazlara ilave olarak  $Al_3Si_2Sr_2$  fazından oluşmaktadır. Üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımına %0,6 oranında yapılan magnezyum katkısı ise  $Mg_2Si$  fazının oluşmasına yol açmaktadır. Stronsiyum katkısı ise hem üçlü Al-17Si-0,1Sr hem de dördü Al-17Si-0,1Sr-0,6Mg alaşımında bulunan ötektik silisyum parçacıklarının modifikasyonuna neden olarak bu parçacıkların daha ince taneli ve nispeten küresel forma dönüşmesine yol açmaktadır. İkili Al-17Si alaşımının sertliği 57 BSD, akma dayanımı 93,7 MPa, çekme dayanımı 127,6 MPa ve kopma uzaması %2,4, olarak belirlenmiştir. Ağırlıkça %0,1 oranında yapılan stronsiyum katkısı bu alaşımın sertliğinde %3,5 oranında azalmaya, akma mukavemetinde %1,6, çekme mukavemetinde %8,1 kopma uzamasında ise %20,8 oranında artışa yol açmaktadır. Üçlü Al-17Si-0,1Sr alaşımına %0,6 oranında magnezyum katılması durumunda ise ikili Al-17Si alaşımına göre sertlikte %22,8, akma mukavemetinde %31,5, çekme mukavemetinde ise %10,6 artış, kopma uzamasında %54,2 azalma olmaktadır. Stronsiyum ve magnezyum katkısı sonucunda Al-17Si alaşımının mekanik özelliklerinde meydana gelen değişimler bu katkıların alaşımın içyapısında neden oldukları modifikasyon ve katı çözültü sertleşmesinden kaynaklanmaktadır.

#### 5 Teşekkür

Bu çalışma Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimince desteklenmiştir. (Proje Numarası: FYL-2016-685).

#### 6 Kaynaklar

- [1] Kaufman JG, Rooy EL. *Aluminum Alloy Castings Properties, Processes and Applications*, Materials Park, OH, USA, ASM International, 2004.
- [2] Davis JR. *Alloying: Understanding the Basics*, Materials Park, OH, USA, ASM International, 2001.
- [3] Türk Standardları Enstitüsü. "Alüminyum ve Alüminyum Alaşımları-Dökümler-Kimyasal Bileşim ve Mekanik Özellikler". Ankara, Türkiye, 1706, 2010.
- [4] Okamoto H, Schlesinger ME, Mueller EM. *ASM Handbook Volume 3: Alloy Phase Diagrams*. Materials Park, OH, USA, ASM International, 2016.
- [5] Kaygısız Y, Maraşlı N. "Microstructural, mechanical and electrical characterization of directionally solidified Al-Si-Mg eutectic alloy". *Journal of Alloys and Compounds*, 618, 197-203, 2015.
- [6] Birol Y. "Effect of silicon content in grain refining hypoeutectic Al-Si foundry alloys with boron and titanium additions". *Materials Science and Technology*, 28(4), 385-389, 2012.
- [7] Kotadia HR, Das A. "Modification of solidification microstructure in hypo- and hyper-eutectic Al-Si alloys under high-intensity ultrasonic irradiation". *Journal of Alloys and Compounds*, 620, 1-4, 2015.
- [8] Darlapudi A, McDonald SD, Terzi S, Prasad A, Felberbaum M, StJohn DH. "The influence of ternary alloying elements on the Al-Si eutectic microstructure and the Si morphology". *Journal of Crystal Growth*, 433, 63-73, 2016.
- [9] Chen Z, Wang T, Gao L, Fu H, Li T. "Grain refinement and tensile properties improvement of aluminum foundry alloys by inoculation with Al-B master alloy". *Materials Science and Engineering A*, 553, 32-36, 2012.
- [10] Shi W, Gao B, Tu G, Li S, Hao Y, Yu F. "Effect of neodymium on primary silicon and mechanical properties of hypereutectic Al-15%Si alloy". *Journal of Rare Earths*, 28, 367-370, 2010.
- [11] Birol Y. "Impact of grain size on mechanical properties of AlSi7Mg0.3 alloy". *Materials Science and Engineering A*, 559, 394-400, 2013.
- [12] Huter P, Renhart P, Oberfrank S, Schwab M, Grün F, Stauder B. "High- and low-cycle fatigue influence of silicon, copper, strontium and iron on hypo-eutectic Al-Si-Cu and Al-Si-Mg cast alloys used in cylinder heads". *International Journal of Fatigue*, 82, 588-601, 2016.
- [13] Hwang JY, Doty HW, Kaufman MJ. "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, 2008.
- [14] Alemdağ Y, Beder M. "Dry sliding wear properties of Al-7Si-4Zn-(0-5)Cu alloys". *Journal of the Balkan Tribological Association*, 21, 154-165, 2015.
- [15] Gholizadeh R, Shabestari SG. "Investigation of the effects of Ni, Fe, and Mn on the formation of complex intermetallic compounds in Al-Si-Cu-Mg-Ni alloys". *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*, 42, 3447-3458, 2011.
- [16] Alemdağ Y, Beder M. "Microstructural, mechanical and tribological properties of Al-7Si-(0-5) Zn alloys". *Materials and Design*, 63, 159-167, 2014.
- [17] Meng Y, Cui J, Zhao Z, Zuo Y. "Effect of vanadium on the microstructures and mechanical properties of an Al-Mg-Si-Cu-Cr-Ti alloy of 6XXX series". *Journal of Alloys and Compounds*, 573, 102-111, 2013.



- [18] Shaha SK, Czerwinski F, Kasprzak W, Friedman J, Chen, DL. "Microstructure and mechanical properties of Al-Si cast alloy with additions of Zr-V-Ti". *Materials and Design*, 83, 801-812, 2015.
- [19] Shaha SK, Czerwinski F, Kasprzak W, Chen DL. "Work hardening and texture during compression deformation of the Al-Si-Cu-Mg alloy modified with V, Zr and Ti". *Journal of Alloys and Compounds*, 593, 290-299, 2014.
- [20] Chen Z, Kang H, Fan G, Li J, Lu Y, Jie j, Zhang Y, Li T, Jian X, Wang T. "Grain refinement of hypoeutectic Al-Si alloys with B". *Acta Materialia*, 120, 168-178, 2016.
- [21] Alipour M, Azarbarmas M, Heydari F, Houghoughi M, Alidoost M, Emamy M. "The effect of Al-8B grain refiner and heat treatment conditions on the microstructure, mechanical properties and dry sliding wear behavior of an Al-12Zn-3Mg-2.5Cu aluminum alloy". *Materials and Design*, 38, 64-73, 2012.
- [22] Timelli G, Camicia G, Ferraro S. "Effect of grain refinement and cooling rate on the microstructure and mechanical properties of secondary Al-Si-Cu alloys". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23, 611-621, 2014.
- [23] Cai Z, Wang R, Zhang C, Peng C, Xie L, Wang L. "Characterization of rapidly solidified Al-27Si hypereutectic alloy: Effect of solidification condition". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24, 1226-1236, 2015.
- [24] Liao H, Sun Y, Sun G. "Correlation between mechanical properties and amount of dendritic-Al phase in as-cast near-eutectic Al-11.6%Si alloys modified with strontium". *Materials Science and Engineering A*, 335, 62-66, 2002.
- [25] Xu C, Wang F, Mudassar H, Wang C, Hanada S, Xiao W, Ma C. "Effect of Sc and Sr on the eutectic Si morphology and tensile properties of Al-Si-Mg alloy". *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(4), 1605-1613, 2017.
- [26] Sjölander E, Seifeddine S. "Optimisation of solution treatment of Al-Si-Cu alloys". *Materials and Design*, 31, 544-549, 2010.
- [27] Toda H, Nishimura T, Uesugi K, Suzuki Y, Koboyashi M. "Influence of high-temperature solution treatments on mechanical properties of an Al-Si-Cu aluminum alloy". *Acta Materialia*, 58, 2014-2025, 2010.
- [28] Yıldırım M, Özyürek D. "The effects of Mg amount on the microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys". *Materials and Design*, 51, 767-774, 2013.
- [29] Caceres CH, Davidson CJ, Griffiths JR, Wang QG. "The effect of Mg on the microstructure and mechanical behavior of Al-Si-Mg casting alloys". *Metallurgical and Materials Transactions A*, 30A, 2611-2618, 1999.
- [30] Ayata G. Bor, Stronsiyum ve/veya Magnezyum Katkılarının Al-Si Alaşımlarının Yapısal Ve Mekanik Özelliklerine Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize, Türkiye, 2018.
- [31] Nogita K, McDonald SD, Dahle AK. "Effects of boron-strontium interactions on eutectic modification in Al-10 mass %Si alloys". *Materials Transactions*, 44, 692-695, 2013.
- [32] Nogita K, Dahle AK. "Determination of eutectic solidification mode in Sr-modified hypoeutectic Al-Si alloys by EBSD". *Materials Transactions*, 42, 207-214, 2001.
- [33] Savaşkan T, Hekimoğlu AP. "Relationships between mechanical and tribological properties of Zn-15Al-based ternary and quaternary alloys". *International Journal of Materials Research*, 107(7), 646-652, 2016.
- [34] Lebyodkin M, Deschamps A, Brkchet Y. "Influence of second-phase morphology and topology on mechanical and fracture properties of Al-Si alloys". *Materials Science and Engineering A*, 234/236, 481-484, 1997.
- [35] Lados DA, Apelian D. "Relationships between microstructure and fatigue crack propagation paths in Al-Si-Mg cast alloys". *Engineering Fracture Mechanics*, 75, 821-832, 2008.
- [36] Wu Z, Curtin WA. "The origins of high hardening and low ductility in magnesium". *Nature*, 526, 62-75, 2015.
- [37] Zhou J, Duszczek J. "Fracture features of a silicon-dispersed aluminium alloy extruded from rapidly solidified powder". *Journal of Materials Science*, 25, 4541-4548, 1990.
- [38] Li Q, Xia T, Lan Y, Zhao W, Fan L, Li P. "Effect of rare earth cerium addition on the microstructure and tensile properties of hypereutectic Al-20%Si alloy". *Journal of Alloys and Compounds*, 562, 25-32, 2013.
- [39] Xu CL, Wang HY, Yang YF, Jiang QC. "Effect of Al-P-Ti-TiC-Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> modifier on the microstructure and mechanical properties of hypereutectic Al-20 wt.%Si alloy". *Materials Science and Engineering-A*, 452-453, 341-346, 2007.