

## Alüminyum-Silisyum Alaşımlarının Mikroyapısal ve Mekanik Özelliklerinin T6 Isıl İşlemi ile İyileştirilmesi

Fahri VATANSEVER\*<sup>1</sup>, Alpay Tamer ERTÜRK<sup>2</sup>, Sedat KARABAY<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, 41380,

<sup>1</sup>(ORCID: 0000-0002-7582-2274)

<sup>2</sup>(ORCID: 0000-0002-2901-5703)

<sup>3</sup>(ORCID: 0000-0002-3258-0957)

(Alınış / Received: 17.01.2018, Kabul / Accepted: 12.03.2018  
Online Yayınlanma / Published Online: 15.09.2018)

**Anahtar Kelimeler**  
Alüminyum  
Alaşımları,  
Isıl İşlem,  
Mekanik  
Özellikler,  
Mikroyapı

**Özet:** Bu çalışmada T6 ısıl işleminin ötektik altı bir alüminyum alaşımı olan AlSi10Mg alaşımının mikroyapısal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla söz konusu alaşıma ısıl işlem uygulanmaksızın ve T6 ısıl işlemi uygulanarak elde edilen numunelerin mikroyapıları optik ve taramalı elektron mikroskopları ile incelenmiş, ayrıca sertlik ile çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre T6 ısıl işlemi alüminyum matris fazı içerisindeki iğnemsî şeklindeki silisyum fazını küresele yakın, çok köşeli tanelere çevirerek alaşımın dendritik mikroyapısını değiştirmektedir. Bu duruma ek olarak sertlik ve çekme dayanımı değerlerinde sırasıyla %39,16 ve %40,77 oranında artış meydana gelmiştir.

## Improving Microstructural and Mechanical Properties of Aluminum-Silicon Alloys Using T6 Heat Treatment

**Keywords**  
Aluminum Alloys,  
Heat Treatment,  
Mechanical  
Properties,  
Microstructure

**Abstract:** In this study the effect of T6 heat treatment on the microstructural and mechanical properties of hypoeutectic AlSi10Mg aluminum alloy was investigated. For this purpose, microstructures of untreated and T6 heat treated alloy were characterized by optical and scanning electron microscopes. Also, hardness and tensile tests were carried out. According to the obtained results acicular eutectic silicon phase in the matrix transformed into near globular-polygonal grains by the effect of T6 heat treatment and the dendritic microstructure of the alloy altered. In addition that the hardness and tensile strength values increased by 39,16% and 40,77% respectively.

\*Sorumlu yazar: fahrivatansever@gmail.com

## 1. Giriş

Alüminyum ve alaşımları yoğunluğunun diğer metallere oranla düşük olması, mekanik ve fiziksel özellikleri, ekonomik oluşu, korozyon dayanımı, çeşitli üretim yöntemleri ile üretilebilmesi, ısı ve elektrik iletkenliği gibi özellikleri ile çelikten sonra gelen en önemli ikinci endüstriyel metal olmakla birlikte ulaşım, inşaat, ambalaj, elektrik endüstrisi ve diğer birçok sektörde yaygın olarak kullanılan bir malzemedir [1,2].

Gezegennemizde fosil yakıtların giderek tükendiği ve bu yakıtların artıklarının çevremize verdiği zararlar bilinmektedir. Bu sebeple devletler ve çeşitli uluslararası örgütler yakıt tüketimi ve emisyonları azaltıcı önlemleri devreye almaktadırlar. Yakıt tüketiminin doğrudan taşıt ağırlığına bağlı olduğu ulaşım sektörü bu açıdan incelendiğinde, taşıtların ağırlıklarının azaltılması amacıyla çeliğin yerine yoğunluğu çeliğin yoğunluğunun yaklaşık üçte biri olan alüminyum ve alaşımlarının taşıtlardaki kullanım alanının giderek arttığı görülmektedir. Öyle ki bugün alüminyum ve alaşımlarından imal edilmiş motor blokları, pompa ve dişli kutusu gövdeleri, silindir başlıkları, pistonlar ile sac parçalar otomotiv sektöründe yaygın olarak kullanılmaktadırlar.

**Tablo 1.** Metalik elementlerin yoğunlukları [3]

Element	Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	Alüminyuma göre yoğunluk (%)
Lityum	Li	0,53
Magnezyum	Mg	1,74
Alüminyum	Al	2,70
Titanyum	Ti	4,51
Çinko	Zn	7,13
Kalay	Sn	7,28
Demir	Fe	7,87
Bakır	Cu	8,93
Gümüş	Ag	10,53
Kurşun	Pb	11,34
Altın	Au	19,28
Osmiyum	Os	22,58

Alüminyum-silisyum alaşımları ötektik altı, ötektik ve ötektik üstü alaşımlar olmak üzere sınıflandırılabilirler. Ötektik altı alaşımlar ötektik bileşimden az silisyum içeren alaşımlardır. Bu alaşımlar genellikle %5-10 arasında silisyum içerirler. Yüksek dayanım ve süneklik gerektiren uygulamalarda kullanılırlar. Ötektik alüminyum-silisyum alaşımları %10-13 arasında silisyum içeriğine sahip olmakla birlikte yapıları başlıca Al-Si ötektik fazından oluşur. Dar katılma aralığı, iyi düzeyde akıcılık ve yüksek döküm kabiliyeti bu alaşımların öne çıkan özellikleri olmakla beraber bu alaşımlar iyi aşınma dayanımı ve süneklik özelliklerine sahiptirler. %15-20 oranında silisyum içeren ötektik üstü alaşımlar yapılarında Al-Si ötektik fazı içerisine gömülü şekilde birincil silisyum fazı bulundurmaktadırlar. Bu alaşımlar üstün aşınma dayanımı özelliği sergilemekle birlikte motor pistonları gibi aşınmaya karşı yüksek direnç gerektiren uygulamalarda kullanılırlar [4].

Metallere uygulanan ısıl işlemler içyapıyı, buna bağlı olarak mekanik özelliklerin geliştirilmesini amaçlayan ısıtma ve soğutma işlemlerinden ibarettir. Alüminyum alaşımlarına uygulanan ısıl işlemler F, O, H, W, T gibi harfler ile kısıtlanmaktadır. Bu kısaltmalarda F üretildiği gibi, O tavllanmış, H şekil değiştirme sertleşmesi uygulanmış, W çözelti ısıl işlemi uygulanmış anlamına gelmektedir. Söz konusu çalışmada uygulanan ısıl işlemin kısaltması olan T harfi alaşımın çözeltiye alınıp sonrasında yaşlandırıldığını belirtmektedir. T harfinin sonuna eklenen 1-10 arasındaki sayılar farklı ısıl işlem adımlarını simgelemekte olup, T6 ısıl işlemi çözeltiye alma, su verme ve yapay olarak yaşlandırma adımlarından oluşmaktadır. Çözeltiye alma işlem adımı alaşımın

mekanik özelliklerini olumlu yönde etkileyen Cu ve Mg gibi elementlerin çözünürlüğünün yüksek olduğu katılaşma (solidüs) sıcaklığı üzerindeki bir sıcaklığa alaşımın ısıtılarak bu sıcaklıkta bir süre beklenilmesi suretiyle söz konusu alaşım elementlerinin katı hal çözünürlüklerinin artırılmasını amaçlayan bir işlemdir. Çözeltiliye alma adımından sonra gelen su verme işlemi adımları ile alaşım aniden soğutulmuş olarak içerisinde çözünmüş olan elementlerin çökmesi engellenerek düşük sıcaklıkta aşırı doymuş bir yapı elde edilir. T6 ısıl işleminin son aşamasını oluşturan yaşlandırma işlemi, dayanım artışı sağlayan elementlerin yapıda kararlı çöktürmeler oluşturarak dayanımın artmasını sağlamaktadır. Bu süreç T6 ısıl işleminde bir fırın içerisinde belirli bir sıcaklıkta gerçekleştirildiği için yapay yaşlandırma olarak adlandırılırken, diğer ısıl işlemler için bu süreç oda sıcaklığında gerçekleştirilebilmektedir. Bu durumda süreç doğal yaşlandırma olarak adlandırılır [5].

Möller ve arkadaşları 2008 [6] yılında yaptıkları çalışmada yarı-katı döküm yöntemiyle üretilen A356 döküm parçalara farklı koşullarda T6 ısıl işlemi uygulayarak elde edilen numunelerin mikro yapılarını ve sertliklerini değerlendirmişlerdir. Bu amaçla numuneleri 540 °C'de 30 dakikadan 6 saate kadar farklı sürelerde çözeltiliye alarak suda soğutmuşlardır. Daha sonra 20 saat doğal yaşlandırmış ve ardından 160, 180 ve 190 °C'de yapay olarak yaşlandırmışlardır. Ayrıca doğal yaşlandırma etkisinin incelenmesi için bu süre 0'dan 240 saate kadar değiştirilmiştir. Sonuçlar 6 saat çözeltiliye alınarak elde edilen numunelerin mikro yapılarındaki ötektik silisyum fazının 30 dakika çözeltiliye alma işlemine oranla çok daha kaba olduğunu göstermektedir. Ayrıca yaşlandırma sıcaklığı arttıkça

maksimum sertlik değerine daha kısa sürede ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Pio 2011 [7] yılında T6 ısıl işleminin döküm A356 alüminyum alaşımının mekanik özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen bir çalışma yapmıştır. Bu amaçla indüksiyon fırınında 720 °C sıcaklıkta grafit pota içerisinde ergitilen alaşımı bir kalıba dökerek katılaştırmış, sırasıyla 540°C'de 6 saat süresince çözeltiliye almış, su vererek soğutmuş ve 160 °C'de 6 saat süresince yapay olarak yaşlandırmıştır. Bu çalışma kapsamında elde edilen sonuçlara göre T6 ısıl işlemi A356 alaşımının sertliğini %106, çekme dayanımını %106, sünekliğini %214 ve yorulma dayanımını %23 oranında arttırmıştır. Ayrıca düzensiz şekilde mikro yapıda bulunan ötektik silisyum fazı T6 ısıl işleminin etkisiyle küreselleşmiş silisyum tanelerine dönüşmüştür.

Shi ve arkadaşları 2015 [8] yılında A356 alüminyum alaşımına farklı oranlarda Gd (Gadolinyum) ilavesinin ve T6 ısıl işleminin alaşımın mikro yapısal ve mekanik özelliklerini nasıl değiştirdiğini inceleyen bir çalışma yapmışlardır. Bu amaçla sırasıyla ağırlıkça %0,1 - 0,2 - 0,3 ve 0,4 Gd ilavesi yapılan alaşıma T6 ısıl işlemi uygulanarak alaşımın mikroyapısını incelemişlerdir. Elde ettikleri sonuçlara göre T6 ısıl işlemi tüm deney koşulları için iğnemsiz şekildeki silisyum fazını ince silisyum parçacıklarına dönüştürerek matrise homojen bir şekilde dağıtmakla beraber sertlik, çekme dayanımı ve kopma uzaması gibi mekanik özelliklerde iyileşme sağlamıştır.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada ötektik altı bir alüminyum-silisyum alaşımı olan AlSi10Mg alaşımı kullanılmıştır. Bu alaşıma yakın bileşime sahip alaşımlar farklı standartlarda

A360, 360.0, EN AC43000, L-2560, Etial-171 şeklinde adlandırılmaktadır. Ana alaşım elementi olarak içerisinde %9-10,5 oranında silisyum bulunduran bu alaşım otomotiv ve havacılık endüstrisinde özellikle ince cidar ve karmaşık geometriye sahip parçaların üretilmesinde kullanılmaktadır. AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi ve özellikleri sırasıyla Tablo 2 ve 3'de verilmiştir.

**Tablo 2.** AlSi10Mg alaşımının kimyasal bileşimi [9]

Element	Kimyasal bileşim (%ağırlıkça)
Silisyum (Si)	9,0-10,5
Demir (Fe)	0,60
Bakır (Cu)	0,10
Mangan (Mn)	0,30-0,50
Magnezyum (Mg)	0,25-0,40
Nikel (Ni)	0,10
Çinko (Zn)	0,10
Kalay (Sn)	0,05
Diğer	0,20

**Tablo 3.** AlSi10Mg alaşımının özellikleri [9]

Yoğunluk (g/cm <sup>3</sup> )	2,68
Ergime Sıcaklığı (°C)	555-590
Çekme Dayanımı (MPa)	176
Çekme Dayanımı-T6 (Mpa)	245
Elastisite modülü (Gpa)	74,5
Uzama (%)	3
Sertlik (HB)	70
Isıl iletkenlik (W/cmK) (25 °C'de)	1,39-1,60

T6 ısıl işlemi uygulanabilmesi amacıyla öncelikle külçe halindeki alaşım grafit pota içerisine sığacak şekilde kesilmiş ve elektrik fırını içerisindeki grafit potada 700 °C'de ergitilmiştir. Eriyik haldeki alaşımın sıcaklığı K tipi bir termokupl vasıtasıyla kontrol edildikten sonra kalıp boşluğunun tamamen dolması amacıyla bir başka elektrik fırınında 300 °C'ye ısıtılmış olan kokil kalıba dökülmüştür. Kalıp içerisinde katılaşma ve soğuma gerçekleştikten sonra döküm halindeki parça kesilerek eşit ölçülere sahip numuneler elde edilmiştir. Bu

numunelerin bir kısmına T6 ısıl işlemi uygulanarak, bir kısmına ise T6 ısıl işlemi uygulanmaksızın mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler gerçekleştirilmiştir. T6 ısıl işlemi için alaşım öncelikle sıcaklık artışı saatte 50 °C olacak şekilde 530 °C'ye ısıtılmış ve bu sıcaklıkta 6 saat süresince bekletilmiştir. Daha sonra alaşım su verilerek soğutulmuş ve 160 °C'de 12 saat süresince yaşlandırılmıştır. Söz konusu alaşımın T6 ısıl işlemi için önerilen süreler ve sıcaklıklar Tablo 4'de verilmiştir.

Isıl işlem uygulaması gerçekleştirilmeden ve T6 ısıl işlemi uygulanarak elde edilen numuneler metalografik inceleme için soğuk kalıplama ekipmanları kullanılarak kalıplandıktan sonra 300'den 2400 gride kadar farklı silisyum karbür zımparalar ile parlatılmıştır. Son parlatma işlemleri sırasıyla 6 ve 1 µm elmas süspansiyon ile 0,06 collodial silica süspansiyon kullanılarak gerçekleştirildikten sonra Keller çözeltisi ile dağlanarak mikro yapısal incelemeye hazır hale getirilmiştir. Mikro yapısal incelemelerin gerçekleştirilmesinde Leica marka optik mikroskop ve Clemex marka kamera kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri bakalite alınan numuneler üzerinden gerçekleştirilmiş olup, ölçümler  $\phi$ 2,5 mm uç ve 62,5 kgf yük kullanılarak Wolpert marka sertlik ölçüm cihazında Brinell sertliği cinsinden gerçekleştirilmiştir. Çekme numunelerinin hazırlanmasında ve çekme testlerinin gerçekleştirilmesinde ASTM B557M-10 standardı esas alınarak testler Dartec marka çekme test cihazında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ve çekme deneyleri üçer numune üzerinden gerçekleştirilmiş olup sonuçların değerlendirilmesinde elde edilen verilerin ortalaması kullanılmıştır.

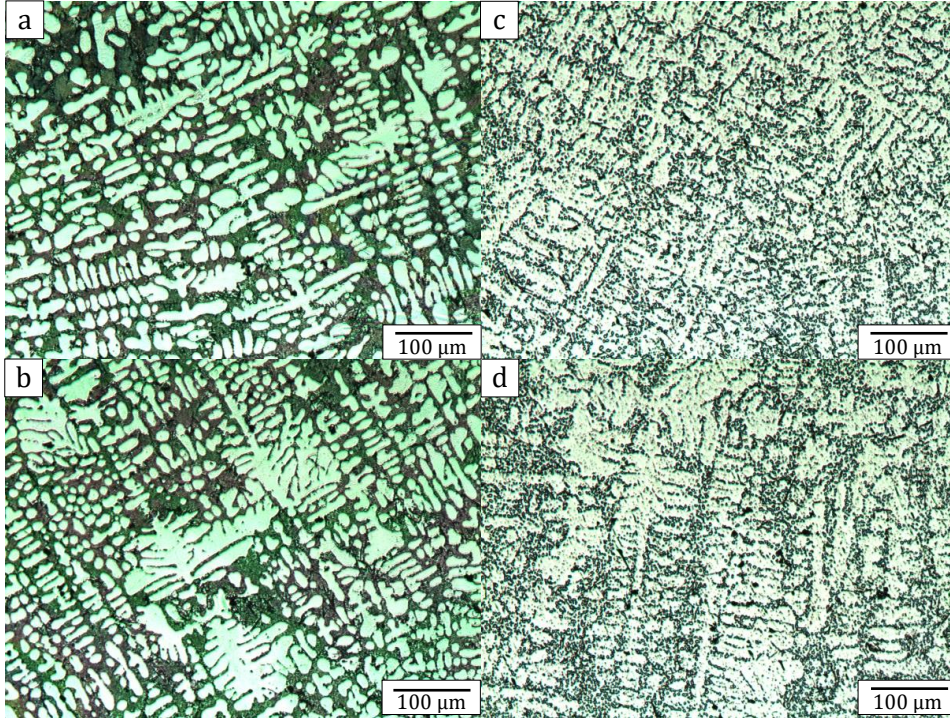
### 3. Bulgular

Şekil 1'de ısıtma işlemi uygulanmaksızın ve T6 ısıtma işlemi uygulanarak elde edilen AlSi10Mg alaşımının mikroyapı görüntüleri verilmiştir. Isıtma işlemi uygulanmaksızın

elde edilen mikroyapı görüntüleri olan Şekil 1(a) ve (b) görüntülerinde kaba  $\alpha$ -Al dendritleri bulunmakta iken, ısıtma işlemi sonucu söz konusu dendritik yapının değiştiği tespit edilmiştir (Şekil 1(c) ve (d)).

**Tablo 4.** T6 ısıtma işlemi için önerilen sıcaklık ve süreler [9]

Çözeltiye alma				Yaşlandırma	
Temper	Sıcaklık (°C)	Süre (sa)	Soğutma	Sıcaklık (°C)	Süre (sa)
T6	530 ± 5	4-8	Suda	160 ± 5	8-16



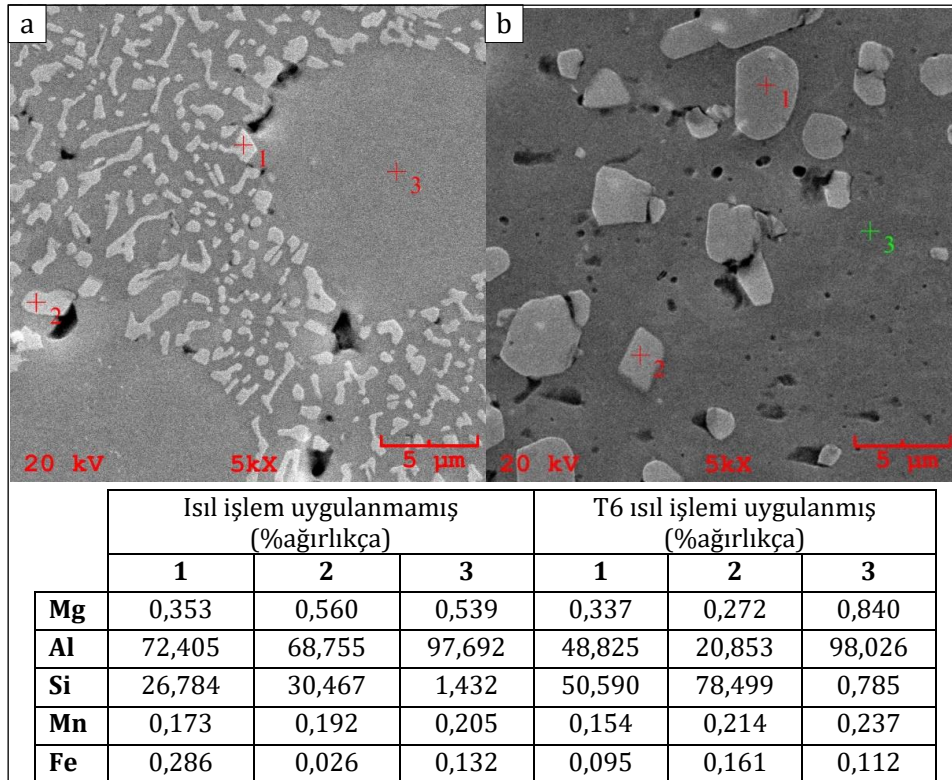
**Şekil 2.** Isıtma işlemi uygulanmaksızın ve T6 ısıtma işlemi uygulanarak elde edilen numunelerin mikroyapı görüntüleri; (a) ve (b) ısıtma işlemi uygulanmamış, (c) ve (d) T6 ısıtma işlemi uygulanmış

Şekil 2'de ısıtma işlemi uygulanmaksızın ve T6 ısıtma işlemi uygulanarak elde edilen AlSi10Mg alaşımının taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri verilmiştir. Görüntüler incelendiğinde T6 ısıtma işleminin iğnemi şeklindeki ötektik silisyum fazının morfolojisini değiştirerek küresel yakın, çok köşeli tanelere dönüştürdüğü gözlemlen-

mektedir. Aynı zamanda ısıtma işlemi uygulanmaksızın elde edilen görüntülerde bulunan ve  $\alpha$ -Al dendritlerinin sınırlarını oluşturan ötektik silisyum yapısının değişmesinden dolayı dendritik yapının morfolojisinin de değiştiği görüntülerden elde edilen bir diğer çıkarımdır. Her iki görüntüde de EDS analizlerinin gerçekleştirildiği noktalar

olan 1, 2 ve 3 numaralı noktaların kimyasal bileşimleri incelendiğinde ötektik fazı temsil eden 1 ve 2 nolu noktalardaki silisyum miktarının T6 ısıtma işlemi ile arttığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda Şekil 2(b)'de verilen görüntüde küresele yakın olarak tabir edebileceğimiz 1 numaralı noktada, çok silisyum miktarının bir miktar azaldığı söylenebilir.

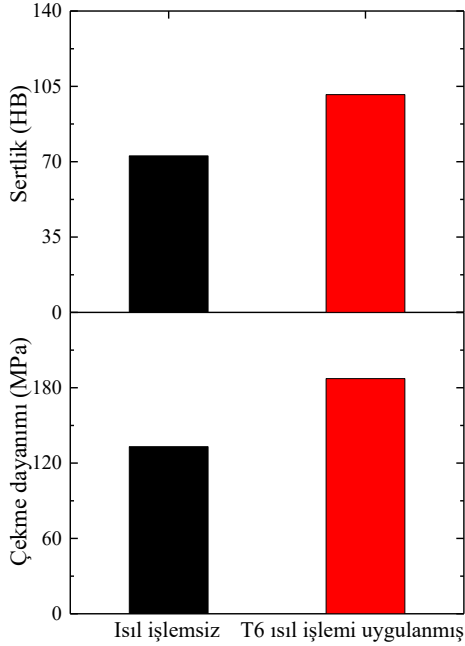
köşeli olarak tabir edebileceğimiz 2 numaralı noktaya göre daha az silisyum bulunduğu, dolayısıyla silisyum miktarındaki artış ile yapının küresele yakın bir morfolojiden daha keskin-çok köşeli bir morfolojiye dönüştüğü söylenebilir. Ayrıca T6 ısıtma işleminin etkisiyle alüminyum matris fazındaki



Şekil 2. Isıl işlem uygulanmaksızın ve T6 ısıtma işlemi uygulanarak elde edilen numunelerin taramalı elektron mikroskobu görüntüleri ve EDS analizleri; (a) ısıtma işlemi uygulanmamış, (b) T6 ısıtma işlemi uygulanmış

Şekil 3'de T6 ısıtma işlemi uygulamasının alaşımın sertlik ve çekme dayanımı değerleri üzerindeki etkisi verilmiştir. Söz konusu grafiğe göre T6 ısıtma işlemi alaşımın sertliğini %39,16 artış ile 72,7 HB'den 101,17 HB'ye ve çekme dayanımını %40,77 artış ile 133,05 MPa'dan 187,3 MPa'a yükseltmiştir. Elde edilen sonuçlarda çekme dayanımı değerlerinin Tablo 3'de verilen değerlere göre bir miktar

düşük çıkmıştır. Bu durumun döküm işlemi esnasında kokil kalıbın 300 °C'ye ısıtılması nedeniyle yavaş soğumanın meydana gelmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir.



**Şekil 3.** T6 ısıl işlem uygulamasının AlSi10Mg alaşımlarının sertlik ve çekme dayanımı üzerindeki etkisi

#### 4. Tartışma ve Sonuç

Bu çalışma kapsamında gerçekleştirilen mikroyapı incelemeleri ve mekanik testler neticesinde T6 ısıl işleminin ötektik altı bir alüminyum-silisyum alaşımı olan AlSi10Mg alaşımının mikro yapısını modifiye ettiği ve buna bağlı olarak mekanik özelliklerde gelişme sağladığı tespit edilmiştir. Optik ve taramalı elektron mikroskobu görüntüleri incelendiğinde mikro yapıdaki modifikasyonun sebebinin  $\alpha$ -Al dendritlerinin sınırlarını oluşturan iğnemiş şeklindeki ötektik silisyum fazının T6 ısıl işleminin etkisiyle küresele yakın, çok köşeli forma dönüştüğü, buna bağlı olarak dendritik yapının değişmesi olduğu belirlenmiştir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar Birimi tarafından 2017/002 proje numarası ile desteklenmiştir.

#### Kaynakça

- [1] 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, 1328s.
- [2] King, J. F., 2001. The Aluminium Industry. Woodhead Publishing Limited, Cambridge, 340s.
- [3] Dwight, J. 2002. Aluminium Design and Construction. Taylor & Francis e-Library, Newyork, 320s.
- [4] Sigworth, G. K., Fundamentals of Solidification in Aluminum Castings. International Journal of Metalcasting, Cilt. 8, s 7-20. DOI: 10.1007/BF03355567
- [5] Mohamed, A. M., Samuel, F. H., 2012. A Review on the Heat Treatment of Al-Si-Cu/Mg Casting Alloys. ss 55-72. Czerwinski, F., Heat Treatment - Conventional and Novel Applications, InTech, 420s. DOI: 10.5772/2798
- [6] Pio, L. Y., 2011. Effect of T6 Heat Treatment on the Mechanical Properties of Gravity Die Cast A356 Aluminium Alloy, Journal of Applied Sciences, Cilt. 11, s. 2048-2052. DOI: 10.3923/jas.2011.2048.2052
- [7] Möller, H., Govender, G., Stumpf, W. E., 2008. The T6 Heat Treatment of Semi-Solid Metal Processed Alloy A356, The Open Materials Science Journal, Cilt. 2, s. 6-10. DOI: 10.2174/1874088X00802010006
- [8] Shi, Z., Wang, Q., Shi, Y., Zhao, G., Zhang, R., 2015. Microstructure and Mechanical Properties of Gd-Modified A356 Aluminum Alloys, Journal of Rare Earths, Cilt. 33, s. 1004-1009. DOI: 10.1016/S1002-0721(14)60518-4
- [9] Geiser, W., 1982. Aluminium Alloys Tables. 7th, Alcan S. A., Zurich.