

## Effect of Al-5Ti-1B Grain Refiner Added to Al7075 Alloy on Aging, Microstructure, Hardness and Corrosive Properties

Mete Berke YAMAN<sup>1</sup>  Engin KOCAMAN<sup>2,\*</sup>  Barış AVAR<sup>1</sup> 

<sup>1</sup>Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Metallurgical and Materials Engineering, 67100, Merkez/ZONGULDAK

<sup>2</sup>Zonguldak Bulent Ecevit University, Faculty of Engineering, Department of Aerospace Engineering, 67100, Merkez/ZOBGULDAK

### Graphical/Tabular Abstract

#### Article Info:

Research article  
Received: 22.08.2022  
Revision: 5.10.2022  
Accepted: 24.10.2022

#### Highlights

- Effect of grain refiner on Al7075
- Effect of Al5Ti1B on precipitation hardening
- Corrosion behavior of Al7075 alloy with Al5Ti1B added

#### Keywords

Aluminum 7075 alloy  
Al-5Ti-1B grain refiner  
Precipitation hardening  
Hardness  
Corrosion

In this study, the effect of Al5Ti1B grain refiner in different ratios added to Al7075 on precipitation hardening, microstructural properties, hardness and corrosion resistance of the alloy was investigated.

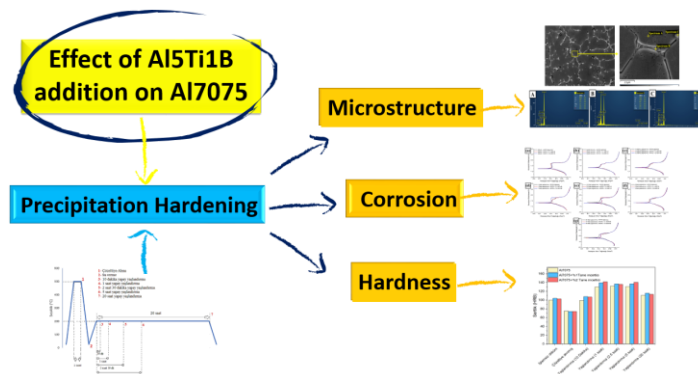


Figure A. Flow charts of experiments

**Purpose:** Thanks to the grain refiner master alloys added to the cast aluminum alloys in molten form, the alloy becomes finer grain structure and the castability, mechanical properties and chemical properties of the alloy can be improved. In this study, grain refiner master alloy, which is mostly added to cast aluminum alloys, was added to Al7075, a wrought aluminum alloy, and its effect on the microstructure, heat treatment and corrosion behavior of the alloy was investigated.

**Theory and Methods:** Al5Ti1B grain refiner at the rate of 0%, 1% and 2% by weight was added to the Al7075 alloy melted in the electric resistance furnace and poured into the metal mold. Cast samples were taken into solution at 500 °C and aged for 10 min., 1 hour, 2.5 hr., 5 hr. and 20 hr. Afterwards, the samples characterized using an optical microscope, SEM, EDS and XRD. The hardness of the samples was measured using a 62.5 kg load and 2.5 mm steel ball in Brinell hardness mode. Corrosion tests were performed in 0.5 M NaCl solution at a potential range of -1 to 1 V and a scanning rate of 1 mV/sec.

**Results:** The findings obtained as a result of the study show that; It has been found that grain refinement is very effective on Al7075, which is a wrought aluminum alloy. Grain refinement process caused changes in the properties of both the casting condition and precipitation hardening condition of the alloy.

**Conclusion:** Addition the grain refiner to the Al7075 alloy, it was determined that the intermetallic structures in the microstructure of the alloy became thinner and more homogeneously distributed in the structure. In addition, it is understood that the microstructure, which exhibits a dendritic solidification, turns into a equiaxial grain structure and the grain size decreases with the addition of grain refiner. It was observed that the addition of grain refiner increased the hardness value for both casting and precipitation hardening condition of the alloy. It has been observed that the addition of grain refiner affects the corrosion resistance of the alloy positively for low aging times but negatively for increasing aging times.



## Effect of Al-5Ti-1B Grain Refiner Added to Al7075 Alloy on Aging, Microstructure, Hardness and Corrosive Properties

Mete Berke YAMAN<sup>1</sup> Engin KOCAMAN<sup>2,\*</sup> Barış AVAR<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez/ZONGULDAK

<sup>2</sup>Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, 67100, Merkez/ZONGULDAK

### Abstract

In this study, precipitation hardening heat treatment was applied at 200 °C for 10 minutes, 1 hour, 2.5 hours, 5 hours, and 20 hours by adding 1% and 2% by weight Al-5Ti-1B grain refiner to Al7075 alloy, which is a critical material, especially in the aviation industry. Microstructural analyses, hardness, and corrosion tests of all alloys with and without adding grain refiner were carried out. From the obtained results, it was determined that the grain refiner added to the alloy reduced the grain size of the alloy by ~24%. In addition, the hardness values of the alloys with the addition of grain refiner increased by ~4.5% after casting and up to ~9.5% after precipitation hardening. In general, the corrosion potentials of the grain refiner added alloys were more positive than the Al7075 alloy. Similarly, the corrosion current density values of the alloys with a grain refiner added were lower than the Al7075 alloy.

### Makale Bilgisi

Araştırma makalesi  
Başvuru: 22.08.2022  
Düzeltilme: 5.10.2022  
Kabul: 24.10.2022

### Keywords

Aluminum 7075 alloy  
Al-5Ti-1B grain refiner  
Precipitation hardening  
Hardness  
Corrosion

### Anahtar Kelimeler

Alüminyum 7075 alaşımı  
Al-5Ti-1B tane inceltici  
Çökeltme sertleşmesi  
Sertlik  
Korozyon

### Al7075 Alaşımına İlave Edilen Al-5Ti-1B Tane İncelticinin Yaşlanma, Mikroyapı, Sertlik ve Korozif Özelliklerine Üzerindeki Etkisi

### Öz

Bu çalışmada, özellikle havacılık endüstrisi için kritik bir malzeme olan Al7075 alaşımına ağırlıkça %1 ve %2 oranında Al-5Ti-1B tane inceltici ilave edilerek 200 °C'de 10 dakika, 1 saat, 2,5 saat, 5 saat ve 20 saat süre ile çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi uygulanmıştır. Tane inceltici ilave edilen ve edilmeyen tüm alaşımların mikroyapısal analizleri ile sertlik ve korozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlardan alaşıma ilave edilen tane incelticinin alaşımın tane boyutunu ~%24 oranında azalttığı tespit edilmiştir. Bununla birlikte, tane inceltici ilave edilen alaşımların sertlik değerleri, döküm sonrası ~%4.5, çökeltme sertleşmesi sonrası ~%9.5'e kadar artış göstermiştir. Genel olarak tane inceltici ilave edilen alaşımların korozyon potansiyelleri, Al7075 alaşımına göre daha pozitif çıkmıştır. Benzer şekilde tane inceltici ilave edilen alaşımların korozyon akım yoğunluğu değerleri, Al7075 alaşımına göre daha düşük olarak ölçülmüştür.

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Alüminyum (Al), demir dışı metaller içerisinde en yüksek kullanım oranına sahip ve her geçen gün popülerliğini artıran bir metaldir. Al ve alaşımlarının bu derece fazla kullanılmasının başlıca nedenleri yoğunluğunun düşük olması, spesifik mukavemet değerinin yüksek olması, yüksek süneklilik ve iyi termal iletkenliğe sahip olması şeklinde sıralanabilir [1]. Ayrıca Al ve alaşımlarının yüzeylerinde oluşan kararlı alüminyum oksit (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) tabakası bu metali birçok korozif ortama karşı dirençli hale getirmektedir [2]. Bu özellikler Al alaşımlarını otomotiv sanayi, havacılık ve uzay araçları, gemi-inşa sektörü ve savunma sanayi gibi alanlarda sıklıkla tercih edilir hale getirmiştir [3–5]. Al ve alaşımlarının sahip olduğu diğer bir önemli özellik ise sertlik ve mukavemetlerinin çökeltme sertleşmesi veya yaşlandırma olarak bilinen bir ısıl işlem ile artırılabilir olmasıdır. Al alaşımlarının içerisine ilave edilen Cu, Zn, Mg ve Si gibi elementler, ana fazda

oluşturdukları intermetalik yapılar ile bu alaşıma çökelme sertleşmesi işlemi uygulanabilir hale getirirler. Dövme alüminyum alaşımları içerisinde ısıl işlem uygulanabilen seriler 2XXX, 6XXX ve 7XXX serisi alaşımlardır [6]. Bu alaşımlar içerisinde ise 7XXX serisi sağladığı sertlik ve mukavemet değerleri bakımından diğerlerine nazaran daha iyi sonuçlar vermesi sayesinde özellikle havacılık ve uzay sanayi için vazgeçilmez malzemelerden biri haline gelmiştir. Bununla birlikte, Al alaşımları içerisinde sahip olduğu üstün mekanik özellikler nedeniyle Al7075 alaşımı önemli bir yere sahiptir. Ana alaşım elementleri Zn, Mg ve Cu olan Al7075 alaşımının mikroyapısında bu elementlerin oluşturduğu  $MgZn_2$ ,  $Al_2Mg_3Zn_3$ ,  $Al_2CuMg$ ,  $Al_2Cu$ ,  $Al_3Fe_4$  ve  $Mg_2Si$  intermetalik fazlar bulunmaktadır [7,8].

Günümüzde alüminyum alaşımlarının mekanik özellikleri alaşım elementi ilavesi [9,10], ısıl işlem [11] gibi çeşitli yöntemler ile geliştirilebilirken bu yöntemlere alternatif olarak tane inceltici ilavesi [12] ile alaşımın özelliklerinin geliştirilebildiği bilinmektedir. Özellikle döküm Al alaşımlarında sıklıkla karşımıza çıkan tane inceltme uygulamaları sayesinde döküm alaşımın mukavemeti, sertliği ve korozyon özelliklerinde iyileşmeler görülebilmektedir [13,14]. Al alaşımlarında tane inceltme olarak bilinen bu işlem eriyik içerisine çubuk veya tabletler şeklinde önceden alaşımlanmış master alaşımın ilave edilmesi esasına dayanmaktadır [15]. İlave edilen bu master alaşım, nihai mikroyapıda tane boyutunu küçülmesine ve mekanik özelliklerin artmasına yarayan bir prosestir [16,17]. Ayrıca tane inceltme sayesinde döküm Al alaşımlarının sıcak yırtılma direnci ve kalıp içerisinde eriyik metalin besleme kabiliyeti artmakta ve porozite riski azalmaktadır [18]. Dolayısıyla tane inceltme işlemiyle alaşımın dökülebilirlik özellikleri geliştirilebilmektedir. Master alaşım ilavesi ile tane inceltme mekanizması henüz tamamen açıklamamakla birlikte genel yaklaşım eriyik içerisine ilave edilen tane inceltici master alaşımın oluşturduğu bileşiklerin eriyik Al içerisinde heterojen çekirdeklenme merkezleri oluşturarak alaşımın daha ince taneli olmasını sağlamaktadır [19]. Günümüzde ticari olarak en çok tercih edilen Al-Ti-B sistemine ait master alaşımlar, ergimiş Al içerisine ilave edilmesi sonucu eriyikte  $TiAl_3$  ve  $AlB_2$  gibi çözünen ve yarı çözünen ya da  $TiB_2$  gibi çözünmeyen intermetalik bileşikler oluşturmakta ve katılma esnasında bu intermetalik fazlar heterojen çekirdeklenme merkezi olarak davranarak mikroyapının daha ince taneli katılmasına katkı sağlamaktadır. Bununla birlikte, literatürde alaşım içerisine ilave edilen tane incelticinin alaşımın ısıl işlem özellikleri üzerindeki etkisini inceleyen çalışma sayısı oldukça sınırlıdır. Bu nedenle, bu çalışmada Al7075 alaşımına Al-5Ti-1B tane inceltici ilave edilerek alaşımın çökelme sertleşmesi ısıl işlemi üzerindeki etkisi mikroyapısal, sertlik ve korozyon özelliklerinin değerlendirilmesi için incelenmiştir.

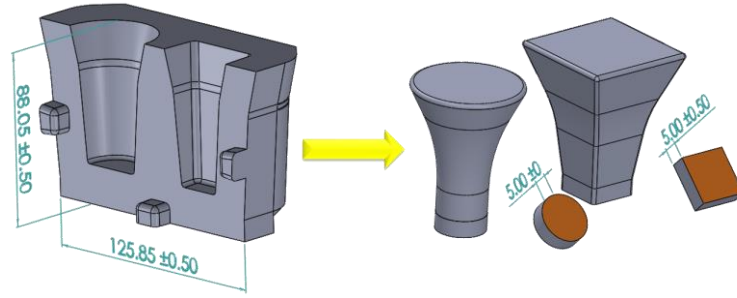
## 2. MATERYAL VE METOTLAR (MATERIALS AND METHODS)

Metal Reyonu firmasından temin edilen ve Tablo 1’de kimyasal bileşimi verilen Al7075 alaşımı 2 kg kapasiteli SiC potalara uygun ağırlıkta tartılarak Protherm marka Pt600 model kamara tipi fırında ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir. 760 °C’de ergitilen Al7075 alaşımı içerisine ağırlıkça %0, %1 ve %2 olmak üzere Al5Ti1B tane inceltici master alaşımı ilave edilmiştir.

**Tablo 1.** Al7075 alaşımının spektral analiz sonucu

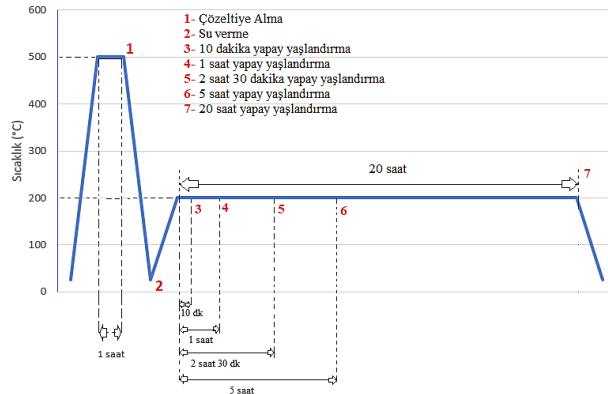
Element	Zn	Mg	Cu	Fe	Si	Cr	Ti	Al
ağ.%	5.09	2.20	1.68	0.23	0.17	0.1	0.09	Kalan

Ergitme işlemi sonrasında 15 dakika fırında bekletilen alaşım, yaklaşık 720-725 °C’de Şekil 1’de şematik görünümü verilen 250 °C’de ön ısıtılmış kokil kalıp içerisine dökülmüştür. Döküm öncesi ergiyik metale azot gazı kullanılarak 5 dakika süre ile gaz giderme işlemi yapılmıştır. Döküm işlemi sonrasında Şekil 1’de görülen döküm numuneler tabandan 5 mm mesafe bırakılarak kesilmiş ve numunelere 470 °C’de 10 saat homojenizasyon işlemi uygulanmıştır. Homojenize edilen numuneler, Şekil 2’deki ısıl prosedüre göre önce 500 °C’de 1 saat bekletilmiş, sonrasında buzlu suda su verme işlemi yapılarak çözeltiye alma işlemi gerçekleştirilmiştir. Çözeltiye alınan numuneler 200 °C’de 10 dakika, 1 saat, 2.5 saat, 5 saat ve 20 saat olmak üzere 5 farklı yaşlandırma süresi ile yapay yaşlandırma işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra numunelerin yüzeyleri sırasıyla 240, 600, 1200 ve 2500 grid SiC zımpara kağıdıyla zımparalanmış ve sırasıyla, 6 µm ve 1 µm elmas parlatma solüsyonları kullanılarak parlatılmıştır. Parlatılan numuneler Keller’s çözeltisi (95 ml saf su, 1,5 ml HCl, 2,5 ml HNO<sub>3</sub> ve 1 ml HF) kullanılarak 15 saniye süre ile dağlanmıştır.



**Şekil 1.** Kokil kalıp ve numunelerin çıkarıldığı noktaların şematik görünümü

Numunelerin mikroyapı görüntüleri Lecia 1750M metal mikroskobu kullanılarak alınmıştır. Optik mikroskop görüntüleri üzerinden ImageJ programı ile lineer-intercept metodu kullanılarak tane boyutu ölçümü gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey morfolojisi ve elementel dağılımı, Hitachi SU5000 taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve Oxford X-MaxN 80 model enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi (EDS) ile karakterize edilmiştir. Numuneler, çift taraflı karbon bant kullanılarak Al levha üzerine yapıştırılarak incelenmiştir. Numunelerin X-ışınları analizi (XRD) Panalytical Empyrean cihazı kullanılarak yapılmıştır. XRD analizleri, 15-90 derecelik  $2\theta$  aralığında ve  $3^\circ/\text{dk}$  tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Sertlik ölçümleri, Bulut Makina Digirock-RB sertlik ölçüm cihazı kullanılarak Brinell sertlik ölçüm modunda 2,5 mm çapında çelik bilya ve 62,5 kg'lık bir yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Elektrokimyasal korozyon testleri, Gamry Interface 1010-E Potentiostat ile  $25^\circ\text{C}$ 'de, 0.5 M NaCl çözeltisi içerisinde, -1 V ile 1 V tarama aralığında ve 1 mV/s tarama hızında gerçekleştirilmiştir. Referans elektrot olarak doymuş kalomel (SCE) elektrot ve karşıt elektrot olarak grafit kullanılmıştır.

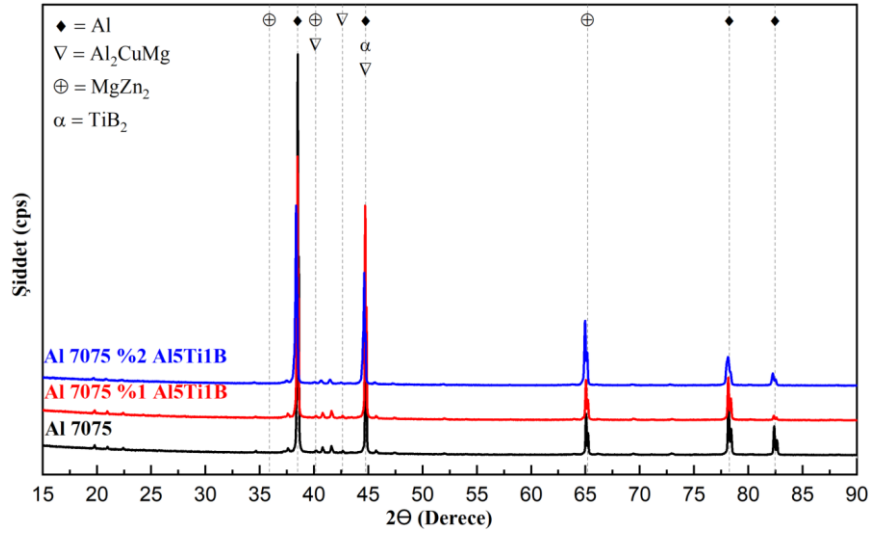


**Şekil 2.** Numunelere uygulanan ısıl işlem prosedürü

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA (RESULTS AND DISCUSSION)

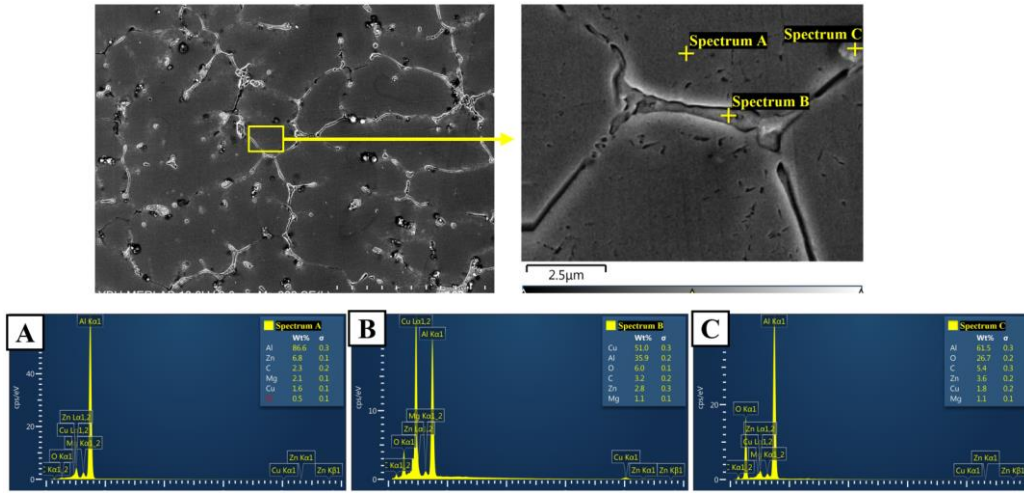
#### 3.1. Mikroyapısal İncelemeler

Şekil 3'teki döküm numunelere ait XRD grafikleri incelendiğinde, numunelerde  $\alpha$ -Al ve çeşitli intermetalik fazlara ait piklerin bulunduğu anlaşılmaktadır. Tane inceltici ilave edilmeden dökülen Al7075 alaşımına ait XRD analizinde yapıda  $\alpha$ -Al ile birlikte  $\text{Al}_2\text{CuMg}$  ve  $\text{MgZn}_2$  gibi intermetalik fazlara ait piklerin bulunduğu tespit edilmiştir. Alaşım içerisine ilave edilen Al-5Ti-1B tane inceltici ile mikroyapıda  $\text{TiAl}_3$ ,  $\text{AlB}_2$  intermetalik yapıları tespit edilmezken  $\text{TiB}_2$  fazına ait zayıf pikler belirlenmiştir. XRD analizi, Al7075 alaşımının ve bu alaşıma ilave edilen Al5Ti1B tane inceltici sonucu oluşan genel mikroyapı özelliklerinin birbiri ile uyumlu olduğu görülmektedir.



Şekil 3. Döküm işlemi sonrasındaki alaşımların XRD sonuçları

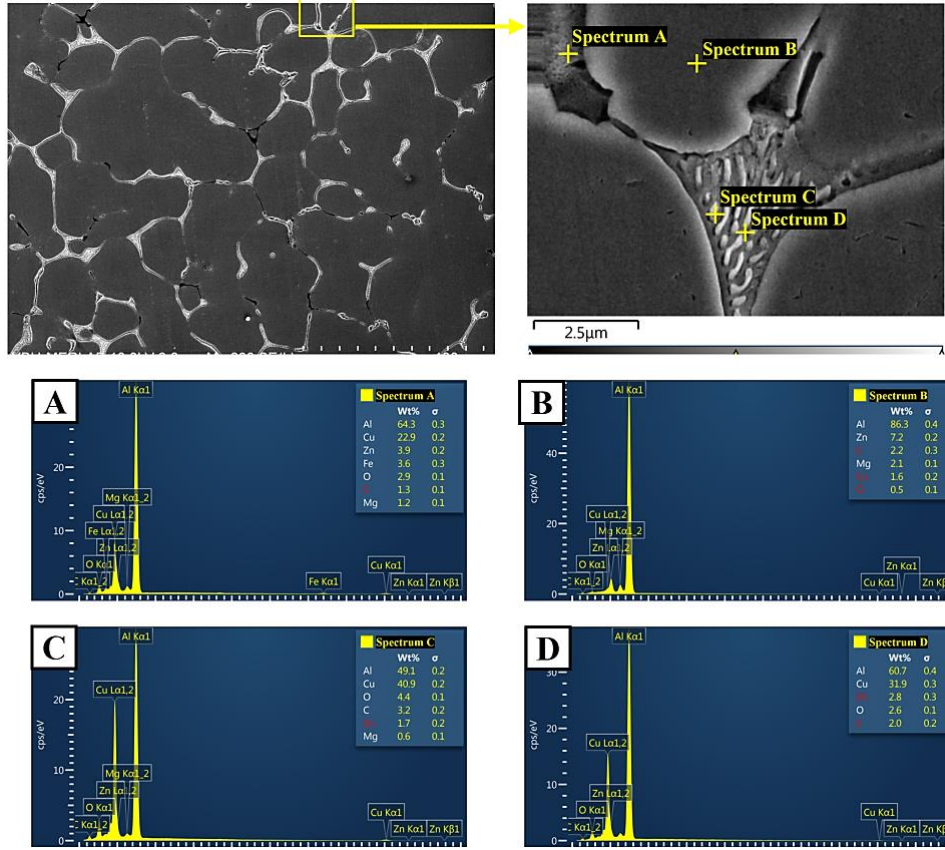
Şekil 4'te Al7075 alaşımına ait SEM görüntüleri ve yüzeyin farklı bölgelerinden alınan noktasal EDS spektrumları verilmiştir. Ana alaşım elementleri Zn, Mg ve Cu olan Al7075 alaşımının döküm mikroyapısına ait SEM görüntüsünde tane sınırları boyunca çeşitli fazların yer aldığı görülmektedir. Şekil 3'te verilen XRD analizinde tespit edilen fazlardan  $Al_2CuMg$  ve  $MgZn_2$  fazlarına benzer olarak bu bölgelerde Zn, Cu, Mg içeren aluminid fazların olduğu anlaşılmaktadır. Al-Fe-Si içeren alaşımların genel mikroyapısında yer alan demir ve silisyum içeren fazların ise çin yazısı şeklinde katılaştığı benzer çalışmalarda bildirilmiştir [20]. Şekil 4'te verilen EDS spektrumlarında eser miktarda bu fazların varlığı görülmektedir.



Şekil 4. Döküm işlemi sonrası Al7075 alaşımına ait SEM-EDS analiz sonucu

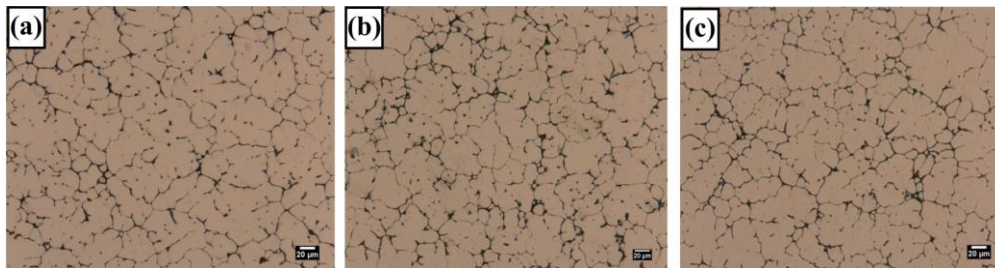
Şekil 5'te Al7075 alaşımına ağırlıkça %2 Al-5Ti-B tane inceltici ilave edildikten sonra alınan SEM görüntüleri ve EDS spektrumları verilmiştir. Bu sonuç, Şekil 4'teki alaşımın SEM görüntüsü ile karşılaştırıldığında daha homojen ve stabil bir mikroyapının meydana geldiği anlaşılmaktadır. Bununla birlikte tane inceltici ilave edilmeyen numunenin mikroyapısında yer alan tane sınırı fazlarının parçalanarak ötektik benzeri bir yapıda katılaştığı görülmektedir. Tane sınırında oluşan bu fazların bir önceki mikroyapıya benzer olarak Al7075 alaşımının ana alaşım elementleri olan Zn, Cu ve Mg'nin Al ile yaptığı intermetalik fazlardır. Literatürde çeşitli alaşımlar üzerine yapılan çalışmalarda Al alaşımları içerisinde ilave edilen tane incelticinin intermetalik fazlar üzerinde etkili olduğu, bu fazları morfolojik olarak etkilediği ve bazı alaşımlar için ötektik katılaşmayı teşvik ettiği belirtilmiştir [21,22].





Şekil 5. %2 Al-5Ti-B tane inceltici ilave edilen Al7075 alaşımına ait SEM-EDS analiz sonucu

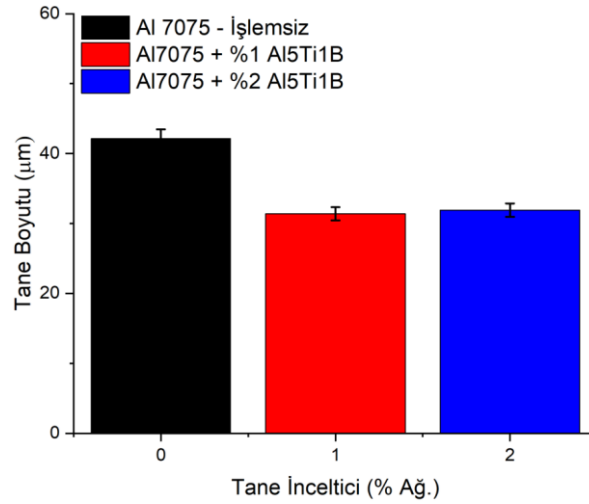
Şekil 6'da Al7075 alaşımı ve bu alaşıma ağırlıkça %1 ve %2 oranında Al5Ti1B tane inceltici ilave edilerek kokil kalıba gerçekleştirilen döküm sonrası elde edilen numunelere ait optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Şekil 6(a)'da verilen Al7075 alaşımının döküm mikroyapısının dentritik bir katılaşma sergilediği ve genel olarak kaba dentritik bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Bu alaşıma ağırlıkça %1 oranında Al-5Ti-1B tane inceltici ilave edilmesi ile mikroyapının dentritik bir yapıdan eş eksenliye geçiş oluşturduğu ve tanelerin nispeten daha köşeli bir hal aldığı söylenebilir. Alaşıma ilave edilen tane inceltici miktarının ağırlıkça %2 oranına artırılması ile birlikte %1 oranında tane inceltici ilave edilen numuneye benzer bir mikroyapı oluştuğu gözlenmektedir. Al5Ti1B master alaşımın tane inceltme mekanizması üzerine çeşitli teoriler bulunmakla birlikte en kabul gören teori çekirdeklenme teorisidir. Tane inceltici ilavesi sonrası eriyik Al içerisinde  $TiAl_3$ ,  $AlB_2$  ve  $TiB_2$  gibi çözünebilir veya çözünemeyen intermetalik yapılar oluşmaktadır [23]. Bu intermetalik yapılar eriyik içerisinde heterojen çekirdeklenme merkezi oluşturmakta ve yapının daha ince taneli olmasını sağlamaktadır.



Şekil 6. (a) Al7075 alaşımına ait, (b) %1 ve (c) %2 tane inceltici ilave edilmiş alaşımlara ait optik mikroskop görüntüleri

Şekil 7'de lineer intercept metodu kullanılarak ölçülen tane boyutlarına ait sonuçlar incelendiğinde Al7075 alaşımına ilave edilen Al-5Ti-1B tane inceltici ile tane boyutunun azaldığı anlaşılmaktadır. Gerçekleştirilen ölçüm sonucu tane inceltici ilave edilmeyen döküm numunesinin tane boyutu  $\sim 42 \mu m$  olarak ölçülmüştür. Al7075 alüminyum alaşımına %1 (ağ.) tane inceltici ilave edilmesi ile tane boyutu yaklaşık  $\sim 24$  azalarak

~31  $\mu\text{m}$  seviyesine düşmüştür. İlave edilen tane inceltici miktarının %2 (ağ.) çıkarılması ile referans numuneye göre tane boyutu ~%23 oranında azalarak ~32  $\mu\text{m}$  seviyesine düşmüştür. Al-5Ti-1B master alaşımın Al7075 alaşımının tane boyutunu azaltmada etkili olduğu görülmektedir. Al7075 alaşımına farklı oranlarda Al-5Ti-1B ilave eden Li ve arkadaşları [24] alaşıma ilave edilen tane inceltici miktarının ağırlıkça %0.1 oranında tane boyutunda önemli bir azalmaya neden olduğunu fakat, tane inceltici miktarının artırılması ile tane boyutunda önemli bir azalma olmadığını rapor etmiştir. Benzer şekilde, İzçankurtaran ve arkadaşları [25] yaptıkları çalışmada 6082 alaşımına ilave ettikleri farklı oranlardaki Al-5Ti-1B tane incelticinin alaşımın ısı işlem sonrası tane boyutundaki değişimi ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Çalışma sonunda tane inceltici ilavesinin alaşımın tane boyutunu azaltmada etkili olduğu belirtilmiştir. Bununla birlikte, ilave edilen tane inceltici miktarının belirli bir seviyenin üzerine çıkması ile tane boyutunda azalma olmadığı çeşitli çalışmalarda rapor edilmiştir [26,27]. Bu durum, artan tane inceltici ilavesinin alaşımda tane inceltme için heterojen çekirdeklenme merkezi olarak davranmak yerine kümelenmesi veya çözünerek katı eriyik fazlar oluşturması şeklinde açıklanabilir. Dolayısıyla bu çalışmada ağırlıkça %2 tane boyutu ilavesinin alaşımın tane boyutunu azaltmak için etkili sınırın dışında kaldığı söylenebilir.

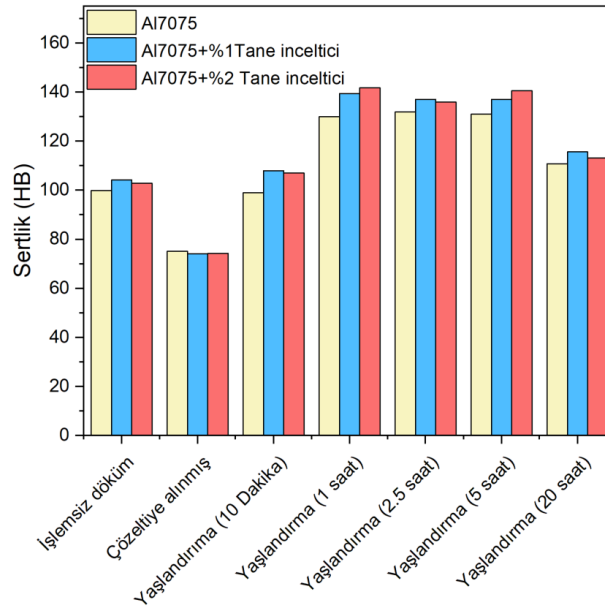


**Şekil 7.** Tane boyutunun tane inceltici miktarına bağlı değişimi

### 3.2. Sertlik Testi

Şekil 8’de verilen grafikte Al7075 alaşımına ilave edilen Al-5Ti-1B tane incelticinin döküm hali, çözeltiye alınmış durumu ve çökeltme sertleşmesi işlemine tabi tutulmuş durumlarının sertlik sonuçları görülmektedir. Al7075 alaşımına ait sertlik değeri ~100 HB iken bu alaşıma ilave edilen ağırlıkça %1 oranında tane inceltici ile alaşımın sertliğinin ~%5 arttığı tespit edilmiştir. İlave edilen tane inceltici miktarının ağırlıkça %2’ye çıkarılması ile sertlik değerinin başlangıç duruma daha az arttığı görülmektedir. Şekil 7’deki grafikte Al7075 alaşımına ilave edilen tane inceltici ile alaşımın tane boyutunda bir azalma meydana geldiği görülmektedir. Fakat artan tane inceltici ilavesi ile tane boyutunda azalma olmadığı ve ağırlıkça %1 oranında tane inceltici içeren alaşıma benzer bir değerde kaldığı anlaşılmaktadır. Tane inceltme işlemi sonucu hem tane boyutu azalmakta hem de ilave edilen tane incelticinin katı eriyik veya intermetalik fazlar oluşturma ihtimali artarak alaşımın sertliğini artırabileceği benzer çalışmalarda rapor edilmiştir [28,29]. Bununla birlikte tane inceltici ilavesi sonucu sertliğin artmasına neden olan ana mekanizma, düşük tane boyutunun dislokasyon hareketini engelleyerek alaşımı daha sert ve mukavemetli hale getirmesidir [8]. Tane inceltici ilave edilen ve ilave edilmeyen alaşımların çözeltiye alma işlemi sonrası sertliklerinde bir azalma meydana geldiği ve sertlik değerlerinin ~70 HB seviyesine düştüğü görülmektedir. Çözeltiye alma işlemi sonrası çökelti fazları matris içerisinde çözünerek sertliğin azalmasına neden olduğu bilinmektedir [30]. Bununla birlikte çözeltiye alınan numunelerde tane inceltici ilavesinin sertliğe olan etkisi görülmemiştir. Alaşımın 10 dakika süre ile yaşlandırılması sonucu Al7075 alaşımın döküm halinin sertliğinde bir değişiklik gözlenmemişken, ağırlıkça %1 ve %2 oranında tane inceltici ilave edilen numunenin sertliğinde bir artış olduğu anlaşılmaktadır. Yaşlandırma süresinin 1 saate çıkarılması ile sertlik

değerinin artarak Al7075 alaşımının döküm haline göre ~%30 oranında artış gösterdiği görülmektedir. Yine aynı yaşlandırma süresi için tane inceltici ilave edilen numunelerin sertlik değeri başlangıç duruma göre daha yüksek çıkmaktadır. Yaşlandırma süresinin 2.5 ve 5 saat olduğu numunelerde sertlik değerinde 1 saat süre ile yaşlandırılan numuneye göre önemli bir değişim gözlemlenmezken, bu numunelerde de tane inceltici ilavesinin yaşlandırma sonrası alaşımın sertliğini kısmen artırdığı tespit edilmiştir. Çözeltiyeye alma işlemi sonucu aşırı doymuş hale getirilen Al7075 alaşımının yapay olarak yaşlandırılması ile GP zonları adı verilen çökelti partikülleri çeşitli kademelerden geçerek büyümektedir. Bu esnada alt taneleri oluşturan bu partiküller tane inceltme işlemine benzer şekilde dislokasyon hareketini engellemekte ve Orawan ve Hall-Patch teorilerine belirtildiği üzere sertliğin artmasına neden olmaktadır [31–33]. Yaşlandırma süresinin 20 saate çıkarılması ile alaşımın sertliğinde bir azalma meydana geldiği ve 110 HB sertlik değerine kadar düştüğü gözlemlenmiştir. Yani Al7075 alaşımının 20 saat süre ile 200 °C’de gerçekleştirilen çökeltme sertleşmesi ısıl işlemi için aşırı yaşlanma bölgesine geçildiği söylenebilir. Tane inceltici ilavesinin aşırı yaşlanma bölgesinde sertliğe olan etkisi ise eser miktarda bir sertlik artışı olarak görülmüştür.



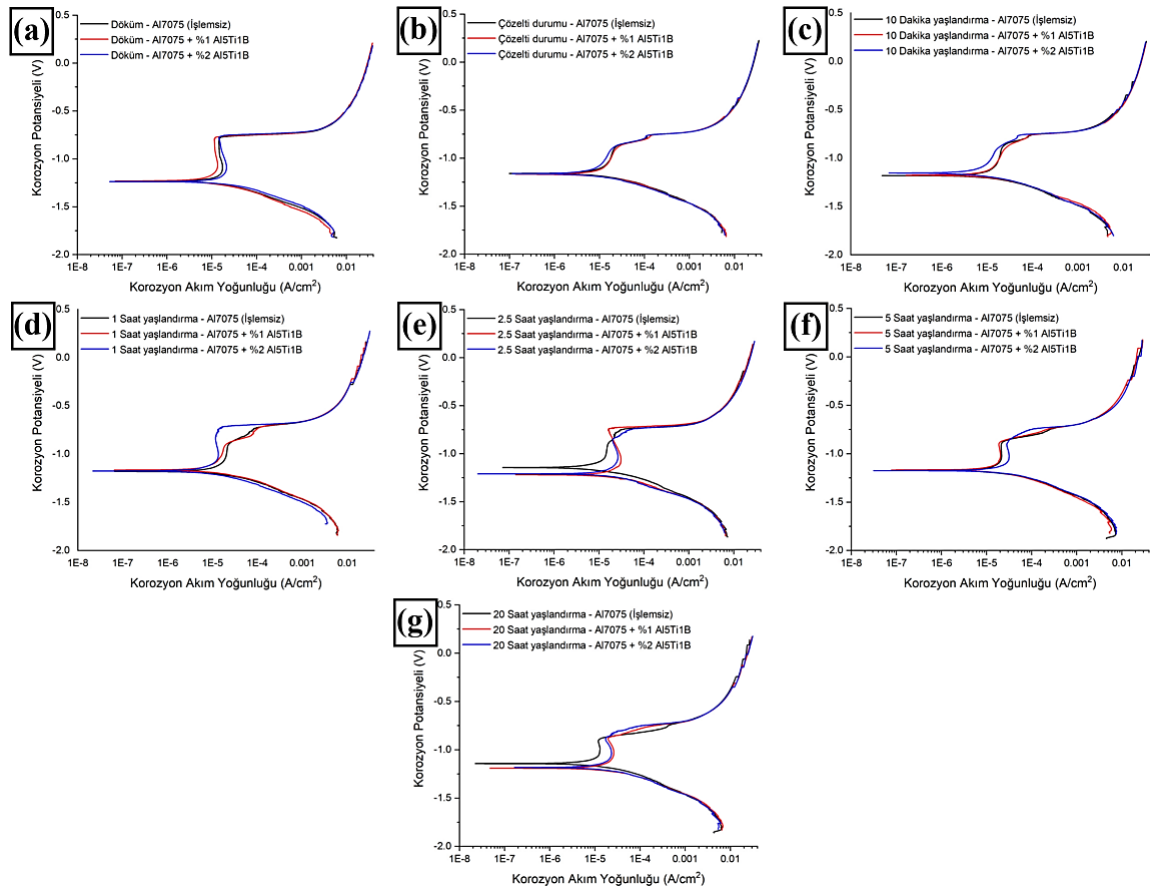
Şekil 8. Sertliğin tane inceltme ve çökeltme sertleşmesine bağlı değişimi

### 3.3. Korozyon Dayanımı

Şekil 9’da korozyon testi sonucu elde edilen Tafel eğrileri görülmektedir. Tafel eğrilerine göre Al7075 alaşımına 200 °C’de farklı sürelerde gerçekleştirilen çökeltme sertleşmesinin Tafel eğrilerinde eser miktarda bir değişime neden olduğu anlaşılmaktadır. Grafiklerde alaşımlara uygulanan ısıl işlem sonucu korozyon potansiyellerinde pozitif yönde bir kayma olduğu yani alaşımı daha soy hale getirdiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte kinetik açıdan korozyon davranışının değerlendirilmesinde önemli bir veri olan akım yoğunluğu değerlerinin genel olarak ısıl işlem süresinin 1, 2.5 ve 5 saat olduğu yani yaşlanmanın tepe noktalarında artarak alaşımı korozyona karşı daha dirençsiz hale getirdiği gözlenmektedir (Tablo 2). Literatürde çökeltme sertleşmesinin alaşımların korozyon direncini negatif yönde etkilediği belirtilmiştir [34]. Yine çökeltme sertleşmesi uygulanan Al7075 alaşımının çukurcuk korozyonu, taneler arası korozyon ve pullanma (exfoliation) korozyonuna karşı hassas hale geldiği bilinmektedir [35,36]. Özellikle bölgesel olarak görülen bu korozyonlar intermetalik fazlar ve matris arasında oluşan galvanik çift neticesinde oluşmaktadır. Al7075 alaşımı içerisinde Fe ve Cu içeren intermetalikler matrise göre katodik bir davranış sergiler ve matrisin çözünmesine katkı sağlarken Zn ve Mg açısından zengin intermetalikler matrise göre anodik bir davranış sergileyerek tercihli olarak çözünürler [35,37]. Örneğin, Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında görülen ve bir tane sınırı fazı olan η (MgZn<sub>2</sub>) matris içerisinde anot olarak davranarak korozif çözelti içerisinde tercihli olarak saldırıya uğrar. Ancak bu alaşımlara ilave edilen Cu elementinin Zn ve Mg



elementlerine göre elektrokimyasal potansiyellerinin daha yüksek olması sebebiyle tane sınırı fazlarını daha soy tarafa kaydırır. Tane sınırlarında yer alan bakırın sürekli olarak çözünmesi bu fazlardaki anodik çözünmeyi artırır ve taneler arası korozyon hassasiyeti artar. Bu sebeple Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarında yaşlanmanın tepe noktasında taneler arası korozyon hassasiyeti daha fazladır [38–40]. Al-Zn-Mg-Cu alaşımlarının klorür ve benzer çözeltiler içerisindeki tane sınırı boyunca oluşan korozyonunun azaltılması alaşımların ısıl işlem parametrelerine önemli seviyede bağlıdır ve parametrelerin optimize edilmesi ile korozyon hassasiyeti azaltılabilir [38]. Öte yandan alaşımların döküm durumuna 20 saat süre ile uygulanan ısıl işleminin yani aşırı yaşlanma bölgesinde gerçekleştirilen çökelme sertleşmesinin korozyon direncini alaşımların döküm durumuna göre artırdığı görülmektedir. Literatürde aşırı yaşlanma ısıl işleminin alaşımların korozyon direncini artırdığı rapor edilmiştir [41]. Bu bakımdan korozyon test sonuçlarının Al 7075 alaşımlarının döküm hali için literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.



**Şekil 9.** Potansiyodinamik polarizasyon testi sonucu elde edilen Tafel eğrileri; (a) Döküm işlemi sonrası elde edilen numunler, (b) Çözeltiye alınmış numuneler, (c) 10 dakika, (d) 1 saat, (e) 2.5 saat, (f) 5 saat, (g) 20 saat süre ile ısıl işlem görmüş numuneler

Şekil 9’da verilen Tafel eğrilerinde tane inceltici ilave edilen numunelerin korozyon potansiyellerinin alaşımların döküm işlemi sonrasındaki durumlarına çok yakın olduğu görülmektedir. Yine bu numunelere uygulanan ısıl işlem sonrası ölçülen korozyon potansiyellerinin alaşımların döküm hali ile benzer olduğu görülmektedir. Bununla birlikte akım yoğunluğu değerlerinin doğrusal bir davranış sergilemediği görülmektedir. Fakat genel olarak çözeltiye alınmış, 10 dakika ve 1 saat süre ile yaşlandırılan numunelerde alaşıma ilave edilen tane incelticinin korozyon direncini artırdığı fakat ısıl işlem süresinin artması ile korozyon direncinin alaşımların döküm hali lehine bir davranış sergilediği görülmektedir. Literatürde genel olarak daha ince tane yapısına sahip metallerin daha kaba taneli durumuna göre korozyon direncinin daha yüksek olduğu rapor edilmektedir [42,43]. Öyle ki Ralston ve arkadaşları [44] tarafından yapılan çalışmada

Hall-Patch eşitliğine benzer bir eşitlik türetilerek korozyon direncinin azalan tane boyutu ile arttığı rapor edilmiştir. Öte yandan bunun aksini ifade eden çalışmalarda mevcuttur. Fakat tane inceltme işleminin eriyik içerisinde ilave edilen Al-5Ti-1B gibi bir master alaşım ile gerçekleştirildiği proseslerde korozyon direnci değişkenlik göstermektedir. Bunun sebebi tane inceltici ilavesi ile eser miktarda da olsa alaşımın kimyasal kompozisyonunun değişmesidir. Örneğin Mahdy ve Sadawy yaptıkları çalışmada Al6061 alaşımına ilave edilen tane incelticinin alaşımın korozyon direncini artırdığı fakat ilave miktarının belli bir seviyenin üzerine çıkarılması ile korozyon direncini azaltacak yönde hareket ettiğini belirtmişlerdir [45]. Alaşım içerisinde eser miktarda bile olsa ilave edilen tane inceltici alaşım içerisinde yeni intermetalikliklerin oluşumunu teşvik etmektedir. Literatürde Al7075 mikroyapısı içerisinde oluşan intermetaliklikler ile matris faz arasında oluşan güçlü potansiyel farkın korozyon üzerinde etkili olduğu, intermetaliklikler üzerinde başlayan korozyon sonucu bölgesel olarak matris fazda çözümlerin görülebileceği ve devamında tanelerarası korozyon ve pullanmanın meydana gelebileceği belirtilmiştir [46]. Bu sebeple düşük yaşlanma sürelerinde tane boyutunun alaşımın korozyonu üzerinde etkili olduğu fakat ilerleyen yaşlanma sürelerinde alaşım içerisinde ilave edilen tane incelticinin çökelti fazları içerisinde çözünerek fazların korozyon davranışını etkileyebileceği söylenebilir.

**Tablo 2.** Tafel eğrilerinden elde edilen korozyon parametreleri

Numune Grubu	Isıl İşlem Durumu	E <sub>kor</sub> (mV)	I <sub>kor</sub> (µA/cm <sup>2</sup> )	β <sub>a</sub> (mV)	β <sub>c</sub> (mV)	K <sub>r</sub> (mpy)
Döküm Hali	Al7075 (Döküm hali)	-1235	12.616	844.4	132.3	7.451
	Al7075 + %1 Al5Ti1B	-1229	8.592	662.6	118.9	5.074
	Al7075 + %2 Al5Ti1B	-1240	11.144	679.1	98.7	6.581
Çözelti	Al7075	-1160	10.639	431.9	105.6	6.283
	Al7075 + %1 Al5Ti1B	-1168	11.881	538.4	106.5	7.017
	Al7075 + %2 Al5Ti1B	-1163	8.248	495.6	101.6	4.871
10 Dakika Süre İle Yaşlandırma	Al7075	-1183	14.925	890.5	126.7	8.815
	Al7075 + %1 Al5Ti1B	-1178	13.086	649.8	113.7	2.282
	Al7075 + %2 Al5Ti1B	-1152	8.733	571.9	122.2	5.157
30 Dakika Süre İle Yaşlandırma	Al7075	-1183	13.884	556.1	109.8	8.2
	Al7075 + %1 Al5Ti1B	-1163	11.768	636.9	111.4	6.968
	Al7075 + %2 Al5Ti1B	-1178	10.294	637.1	125.8	6.079
1 Saat Süre İle Yaşlandırma	Al7075	1137	11.526	586.3	123.7	6.807
	Al7075 + %1 Al5Ti1B	1219	23.24	525.2	117.4	13.73
	Al7075 + %2 Al5Ti1B	-1209	22.463	871.7	151.2	13.267
5 Saat Süre İle Yaşlandırma	Al7075	-1170	16.736	497.6	103.6	9.889
	Al7075 + %1 Al5Ti1B	-1168	16.235	585.3	106.8	9.588
	Al7075 + %2 Al5Ti1B	-1173	26.377	627.1	129.1	15.578
20 Saat Süre İle Yaşlandırma	Al7075	-1142	10.431	521.7	103	6.16
	Al7075 + %1 Al5Ti1B	-1193	19.694	539.3	113.2	11.631
	Al7075 + %2 Al5Ti1B	-1183	19.562	664.9	122.5	11.553

#### 4. SONUÇ (CONCLUSION)

Bu çalışmada Al7075 alaşımına ilave edilen Al-5Ti-1B tane incelticinin yaşlanma üzerindeki etkisi mikroyapısal, sertlik testi ve korozyon testi gerçekleştirilerek incelenmiştir. Çalışma sonucu elde edilen bulgular şu şekilde özetlenebilir;

- 1) Al7075 alaşımına ilave edilen tane inceltici ile alaşımın mikroyapısında yer alan intermetaliklik fazların incelendiği ve mikroyapının daha homojen bir hal aldığı tespit edilmiştir. İlave edilen tane inceltici ile dentritik bir katılaşma sergileyen başlangıç mikroyapısının tane inceltici ilavesi ile eş eksenli bir yapıya dönüştüğü gözlemlenmiştir.

- 2) Alaşıma ilave edilen ağırlıkça %1 oranında tane inceltici ile tane boyutunda %24 oranında bir tane incilmesi olduğu tespit edilmiştir. Fakat artan tane inceltici ilavesi ile tane boyutunda meydana gelen azalma değişmemiş ve sabit kalmıştır.
- 3) Al7075 alaşımına 200 °C’de uygulanan çökeltme sertleşmesi sonucu ölçülen sertlik değerlerine göre 1 ve 5 saat aralığının yaşlanmanın tepe noktası olduğu söylenebilir. Alaşıma ilave edilen Al-5Ti-1B tane inceltici ile alaşımın hem döküm halinin hem de çökeltme sertleşmesi uygulanan durumunun sertlik değerlerinin arttığı tespit edilmiştir.
- 4) Gerçekleştirilen korozyon testi sonucu ısıl işlemin alaşımın korozyon direncini olumsuz yönde etkilediği söylenebilir. Bununla birlikte tane inceltici ilavesinin korozyon direnci düşük yaşlandırma süreleri için pozitif yönde etkilerken, yaşlanma sürelerinin artması ile korozyon direncini olumsuz yönde etkilediği görülmüştür.

### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENTS)

Bu çalışmada, Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi BAP 2021-73338635-01 nolu ve BAP 2022-73338635-01 nolu projeleri ile desteklenmiştir.

### KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1] T. Dursun, C. Soutis, Recent developments in advanced aircraft aluminium alloys, *Mater. Des.* 56 (2014) 862–871. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.12.002>.
- [2] M.C. Reboul, B. Baroux, Metallurgical aspects of corrosion resistance of aluminium alloys, *Mater. Corros.* 62 (2011) 215–233. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/maco.201005650>.
- [3] J. HIRSCH, Recent development in aluminium for automotive applications, *Trans. Nonferrous Met. Soc. China.* 24 (2014) 1995–2002. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63305-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63305-7).
- [4] P. Rambabu, N. Eswara Prasad, V. V Kutumbarao, R.J.H. Wanhill, Aluminium Alloys for Aerospace Applications BT - Aerospace Materials and Material Technologies : Volume 1: Aerospace Materials, in: N.E. Prasad, R.J.H. Wanhill (Eds.), Springer Singapore, Singapore, 2017: pp. 29–52. [https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-2134-3_2).
- [5] M.A. Wahid, A.N. Siddiquee, Z.A. Khan, Aluminum alloys in marine construction: characteristics, application, and problems from a fabrication viewpoint, *Mar. Syst. Ocean Technol.* 15 (2020) 70–80. <https://doi.org/10.1007/s40868-019-00069-w>.
- [6] D.S. MacKenzie, Metallurgy of Heat Treatable Aluminum Alloys, *Heat Treat. Nonferrous Alloy.* 4E (2016) 0. <https://doi.org/10.31399/asm.hb.v04e.a0006287>.
- [7] L. Hua, X. Hu, X. Han, Microstructure evolution of annealed 7075 aluminum alloy and its influence on room-temperature plasticity, *Mater. Des.* 196 (2020) 109192. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109192>.
- [8] A.D. Isadare, B. Aremo, M.O. Adeoye, O.J. Olawale, M.D. Shittu, Effect of heat treatment on some mechanical properties of 7075 aluminium alloy, *Mater. Res.* 16 (2013) 190–194. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392012005000167>.
- [9] M.N. Efvina Efvana, H.J. Kong, C.K. Kok, Review: Effect of Alloying Element on Al-Si Alloys, *Adv. Mater. Res.* 845 (2014) 355–359. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.845.355>.
- [10] H.C. Fang, H. Chao, K.H. Chen, Effect of Zr, Er and Cr additions on microstructures and properties of Al–Zn–Mg–Cu alloys, *Mater. Sci. Eng. A.* 610 (2014) 10–16. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.05.021>.
- [11] K. Chen, H. Liu, Z. Zhang, S. Li, R.I. Todd, The improvement of constituent dissolution and mechanical properties of 7055 aluminum alloy by stepped heat treatments, *J. Mater. Process.*

- Technol. 142 (2003) 190–196. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00597-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00597-1).
- [12] M. Çolak, A. İbrahim, Investigation of Wear Properties of Grain Refined and Modified A319 Aluminum Alloy Produced with Sand and Permanent Mold, 7 (2018) 134–137.
- [13] M. Uludağ, Experimental and Statistical Analysis of Effect of Si Modification and Grain Refinement on Tensile Properties of A356 Alloy, J. Polytech. 24 (2021) 1409–1417. <https://doi.org/https://doi.org/10.2339/politeknik.707109>.
- [14] M. Uludağ, M. Kocabaş, D. Dışplnar, R. Çetin, N. Cansever, Effect of Sr and Ti addition on the corrosion behaviour of Al-7Si-0.3Mg alloy, Arch. Foundry Eng. 17 (2017) 125–130. <https://doi.org/10.1515/afe-2017-0063>.
- [15] M. Çolak, R. Kayıkçı, Alüminyum Dökümlerinde Tane İnceltme, SAÜ Fen Bilim. Enstitüsü Derg. 13 (2009) 11–17.
- [16] İ. Arslan, E. Gavgalı, M. Çolak, Kum Kalıba Dökülen Farklı Alüminyum Alaşımlarının Dökümünde Al5Ti1B ve AL10SR İlavesinin Mikroyapı Özelliklere Etkisinin İncelenmesi, Acad. Platf. J. Eng. Sci. 7 (2019) 237–244. <https://doi.org/10.21541/apjes.424920>.
- [17] E. Kocaman, S. Şirin, D. Dispınar, Artificial Neural Network Modeling of Grain Refinement Performance in AlSi10Mg Alloy, Int. J. Met. (2020). <https://doi.org/10.1007/s40962-020-00472-9>.
- [18] R. Kayıkci, M. Colak, S. Sirin, E. Kocaman, N. Akar, Determination of the critical fraction of solid during the solidification of a PM-cast aluminium alloy, Mater. Tehnol. 49 (2015) 797–800. <https://doi.org/10.17222/mit.2014.266>.
- [19] K.T. Kashyap, T. Chandrashekar, Effects and mechanisms of grain refinement in aluminium alloys, Bull. Mater. Sci. 24 (2001) 345–353. <https://doi.org/10.1007/BF02708630>.
- [20] M. Baruah, A. Borah, Processing and precipitation strengthening of 6xxx series aluminium alloys: A review, Int. J. Mater. Sci. 1 (2020) 40–48. <https://doi.org/10.22271/27078221.2020.v1.i1a.10>.
- [21] G. Sha, K. O'Reilly, B. Cantor, R. Hamerton, J. Worth, Effect of Grain Refiner on Intermetallic Phase Formation in Directional Solidification of 6xxx Series Wrought Al Alloys, Mater. Sci. Forum. 331–337 (2000) 253–258. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.331-337.253>.
- [22] A. Lui, P.S. Grant, I.C. Stone, K.A.Q. O'Reilly, The Role of Grain Refiner in the Nucleation of AlFeSi Intermetallic Phases During Solidification of a 6xxx Aluminum Alloy, Metall. Mater. Trans. A. 50 (2019) 5242–5252. <https://doi.org/10.1007/s11661-019-05447-y>.
- [23] G.K. Sigworth, T.A. Kuhn, Grain refinement of aluminum casting alloys, Int. J. Met. 1 (2007) 31–40. <https://doi.org/10.1361/asmhba0005302>.
- [24] T. Li, S.C. Wang, K.H. Zheng, Effect of Al-5Ti-1B grain refiner on microstructure and mechanical properties of 7075 aluminum alloy, Mater. Sci. Forum. 817 (2015) 331–336. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.817.331>.
- [25] D. Izcankurtaran, B. Tunca, G. Karatay, Investigation of the Effect of Grain Refinement on the Mechanical Properties of 6082 Aluminium Alloy, Open J. Appl. Sci. 11 (2021) 699–706. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2021.116051>.
- [26] A.P. Hekimoğlu, Y.E. Turan, İ.İ. İsmailoğlu, M.E. Akyol, Effect of grain refinement with boron on the microstructure and mechanical properties of Al-30Zn alloy Bor ile yapılan tane inceltmenin Al-30Zn alaşımının mikroyapı ve mekanik özelliklerine etkisi Effect of grain refinement with boron on the microstructur, 1 (2019) 523–534. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.416512>.

- [27] M. Easton, D. StJohn, An analysis of the relationship between grain size, solute content, and the potency and number density of nucleant particles, *Metall. Mater. Trans. A.* 36 (2005) 1911–1920. <https://doi.org/10.1007/s11661-005-0054-y>.
- [28] A.B. Pattnaik, S. Das, B.B. Jha, N. Prasanth, Effect of Al–5Ti–1B grain refiner on the microstructure, mechanical properties and acoustic emission characteristics of Al5052 aluminium alloy, *J. Mater. Res. Technol.* 4 (2015) 171–179. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.017>.
- [29] K. Kaneko, T. Hata, T. Tokunaga, Z. Horita, Fabrication and Characterization of Supersaturated Al–Mg Alloys by Severe Plastic Deformation and Their Mechanical Properties, *Mater. Trans.* 50 (2009) 76–81. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MD200813>.
- [30] B.-R. Jin, D.-W. Ha, C.-Y. Jeong, Effect of Solution Treatment on the Hardness and Tensile Properties of Al–Mg–Si Alloys for Automotive Chassis, *Mater. Trans.* 60 (2019) 815–823. <https://doi.org/10.2320/matertrans.M2018368>.
- [31] E. Hornbogen, Hundred years of precipitation hardening, *J. Light Met.* 1 (2001) 127–132. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1471-5317\(01\)00006-2](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1471-5317(01)00006-2).
- [32] X. Xie, J. Shen, L. Cheng, Y. Li, Y. Pu, Effects of nano-particles strengthening activating flux on the microstructures and mechanical properties of TIG welded AZ31 magnesium alloy joints, *Mater. Des.* 81 (2015) 31–38. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.05.024>.
- [33] J. Deng, J. Shen, H. Li, H. Chen, F. Xie, Investigation on microstructure, mechanical properties and corrosion behavior of Sc-contained Al-7075 alloys after solution-Aging treatment, *Mater. Res. Express.* 7 (2020). <https://doi.org/10.1088/2053-1591/abb4fa>.
- [34] S.M. Mohammed, S.M. Mahdi, Corrosion behavior of aluminum alloys 2024 and 6061 in rainwater, *J. Phys. Conf. Ser.* 1973 (2021) 39–48. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1973/1/012085>.
- [35] R.P. Wei, C.-M. Liao, M. Gao, A transmission electron microscopy study of constituent-particle-induced corrosion in 7075-T6 and 2024-T3 aluminum alloys, *Metall. Mater. Trans. A.* 29 (1998) 1153–1160. <https://doi.org/10.1007/s11661-998-0241-8>.
- [36] P.S. Pao, C.R. Feng, S.J. Gill, Corrosion Fatigue Crack Initiation in Aluminum Alloys 7075 and 7050, *Corrosion.* 56 (2000) 1022–1031. <https://doi.org/10.5006/1.3294379>.
- [37] C.M. Liao, R.P. Wei, Galvanic coupling of model alloys to aluminum - a foundation for understanding particle-induced pitting in aluminum alloys, *Electrochim. Acta.* 45 (1999) 881–888. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(99\)00299-6](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(99)00299-6).
- [38] Y. Wang, L. Cao, X. Wu, X. Tong, B. Liao, G. Huang, Z. Wang, Effect of retrogression treatments on microstructure, hardness and corrosion behaviors of aluminum alloy 7085, *J. Alloys Compd.* 814 (2020) 152264. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.152264>.
- [39] X. Peng, Q. Guo, X. Liang, Y. Deng, Y. Gu, G. Xu, Z. Yin, Mechanical properties, corrosion behavior and microstructures of a non-isothermal ageing treated Al-Zn-Mg-Cu alloy, *Mater. Sci. Eng. A.* 688 (2017) 146–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.086>.
- [40] S. Li, H. Dong, L. Shi, P. Li, F. Ye, Corrosion behavior and mechanical properties of Al-Zn-Mg aluminum alloy weld, *Corros. Sci.* 123 (2017) 243–255. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2017.05.007>.
- [41] F. Song, X. Zhang, S. Liu, Q. Tan, D. Li, The effect of quench rate and overageing temper on the corrosion behaviour of AA7050, *Corros. Sci.* 78 (2014) 276–286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.corsci.2013.10.010>.



- [42] K.D. Ralston, N. Birbilis, Effect of grain size on corrosion: A review, *Corrosion*. 66 (2010) 0750051–07500513. <https://doi.org/10.5006/1.3462912>.
- [43] P. Wang, L. Ma, X. Cheng, X. Li, Influence of grain refinement on the corrosion behavior of metallic materials: A review, *Int. J. Miner. Metall. Mater.* 28 (2021) 1112–1126. <https://doi.org/10.1007/s12613-021-2308-0>.
- [44] K.D. Ralston, N. Birbilis, C.H.J. Davies, Revealing the relationship between grain size and corrosion rate of metals, *Scr. Mater.* 63 (2010) 1201–1204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.08.035>.
- [45] M. Sadawy, A. Mahdy, Effect of Grain Refiner Al–5Ti–1B on the Corrosion and Electrochemical Behavior of Al-6061 in 3.5wt. % NaCl Solution, *Metall.* (2013) 397–401.
- [46] F. Andreatta, H. Terryn, J.H.W. de Wit, Corrosion behaviour of different tempers of AA7075 aluminium alloy, *Electrochim. Acta.* 49 (2004) 2851–2862. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.electacta.2004.01.046>.