



# Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Takviyeli Alüminyum Esaslı Kompozit Malzemelerde Mekanik Alaşımlama Süresinin Korozyon Davranışına Etkilerinin İncelenmesi

## The Investigation of Effects of Mechanical Alloying Duration on Corrosion Behavior of Aluminum Composites Reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Hasan Karabulut<sup>1</sup> , Kubilay Karacif<sup>2\*</sup> , Ramazan Çıtak<sup>3</sup> 

<sup>1</sup>Karabük Üniversitesi, TOBB Teknik Bilimler MYO, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, 78050 Karabük, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Hitit Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 19030 Çorum, TÜRKİYE

<sup>3</sup>Gazi Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, 06500 Ankara, TÜRKİYE

*Başvuru/Received:* 02/01/2019

*Kabul/Accepted:* 15/05/2019

*Son Versiyon/Final Version:* 30/06/2019

### Öz

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerde mekanik alaşımlama süresinin tuzlu ortamdaki korozyon davranışına etkileri incelenmiştir. Numunelerin toz metalurjisi yöntemi ile üretiminde, takviye malzemesi olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ve ana malzeme olan alüminyum tozları karışımına 1 saat karıştırma veya 2, 4, 6, 10 saat mekanik alaşımlama işlemleri uygulanmıştır. Presleme ve sinterleme işlemleri sonrasında elde edilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit numunelere tuzlu ortamında (%3,5 NaCl) potansiyodinamik yöntem ile elektrokimyasal korozyon testleri uygulanmıştır. Çalışma sonucunda, mekanik alaşımlama süresinin artması ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin korozyon dayanımının azaldığı belirlenmiştir.

### Anahtar Kelimeler

*“Mekanik Alaşımlama, Korozyon, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”*

### Abstract

In the study, the effects of mechanical alloying duration on corrosion behavior of powder metal aluminum composites reinforced with alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) were investigated in saltwater medium. For composite materials production, reinforcement Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> powders and base metal aluminum powders were applied one hours mixing or mechanical alloying for 2, 4, 6 and 10 hours. After pressing and sintering treatment of composite powders, electrochemical corrosion tests were applied in saltwater solution (3.5 wt. % NaCl) by potentiodynamic methods. According to corrosion test results, corrosion resistance of composite materials was decreased with increasing of mechanical alloying duration.

### Key Words

*“Mechanical Alloying, Corrosion, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>”*

## 1. Giriş

Kullanım alanı giderek artan alüminyum ve alüminyum alaşımları, hafiflik, yüksek iletkenlik, yüksek korozyon direnci gibi avantajlı özellikler yanında, düşük dayanım, düşük sertlik, düşük aşınma dayanımı gibi dezavantajlı özelliklere sahiptir. Alüminyum alaşımlarının zayıf olan bu mekanik özelliklerini geliştirmek için alüminyum matrise makro boyutta dayanımı yüksek takviye elemanları değişik üretim yöntemleri ile ilave edilerek çok üstün özelliklere sahip alüminyum esaslı kompozit malzemeler üretilmektedir. Alümina ( $Al_2O_3$ ), silisyumkarbür (SiC), borkarbür ( $B_4C$ ), silisyumoksit ( $SiO_2$ ), titanyumoksit ( $TiO_2$ ), manganoksit ( $MnO_2$ ), tungstenkarbür (WC), alüminyumnitür (AlN) ve titanyumkarbür (TiC) gibi dayanımı yüksek takviye malzemeleri, alüminyum esaslı kompozit üretiminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu takviye malzemeleri içerisinde silisyumkarbür ve alümina, kararlılık, inertlik ve yüksek sıcaklık dayanımı gibi üstün özellikleri nedeni ile tercih edilmektedir. Gelişen özellikler ile birlikte alüminyum esaslı kompozitlerin kullanım alanları giderek artmaktadır. Ulaşım, havacılık, deniz taşıtları, otomotiv ve maden endüstrisi bu malzemelerin başlıca kullanım alanlarıdır (Ghanaraja vd., 2015, Ghanaraja vd., 2017, Alaneme & Olubambi, 2013, Riahi & Alpas, 2001, Jun vd., 2004, Saraswathi vd., 2006, Qiao vd., 2015, Katkar vd., 2011, Han vd., 2013). Alüminyum esaslı kompozit malzeme üretiminde genellikle karıştırma döküm, spreyci döküm, toz metalurjisi, dövme döküm, infiltrasyon, sıcak haddeleme ve sıcak ekstrüzyon gibi üretim yöntemleri kullanılmaktadır. Kompozit malzemenin istenilen özelliklere sahip olabilmesi için en uygun üretim yöntemi seçilmelidir. Aksi durumda, ana malzeme içerisinde takviye malzemesinin homojen olmayan dağılımı, porozite oluşumu, ana malzeme ve takviye arasında yetersiz ıslatabilirlik gibi hatalar oluşabilmektedir (Shanbhag vd., 2014, De Salazar vd., 1999, Chandrashekar vd., 2018).

Alüminyumun, alüminyum alaşımlarının ve alüminyum esaslı kompozitlerin korozyon davranışında metal yüzeyinde oluşan pasif oksit filmi önemli rol oynamaktadır. Sürekli ve metal yüzeyine iyi yapışmış, gözeneksiz, sıkı, ince pasif oksit filmi, atmosferik ortamda korozyona karşı oldukça yüksek dayanım sağlamaktadır. Fakat gerek alüminyum alaşımlarında gerekse takviye malzeme ile güçlendirilmiş alüminyum esaslı kompozitlerde, özellikle de endüstriyel atmosferde ve deniz atmosferinde bulunan saldırgan tuzlar, koruyucu oksit filminin özelliklerini bozmaktadır. Bu şartlarda  $SO_2$  içeren gazlar ve Cl<sup>-</sup> iyonları oksit filminin özelliğini kaybetmesinde etkili olmaktadır. Konu ile ilgili az sayıda çalışmada, takviye malzemesi nedeniyle oksit filminin süreksizliği, metal ana malzeme ile takviye ara yüzey reaksiyonları ve intermetalik bileşiklerin oluşumu, kalıntı gerilmeler, seramik partiküller etrafındaki yüksek dislokasyon yoğunluğu sonucunda kompozit malzemenin korozyona karşı hassasiyetinin arttığı bildirilmektedir. Bu şartlarda alüminyum esaslı kompozit malzemelerde bölgesel korozyon, çukur korozyonu ve metal ana malzeme fazı ile seramik partikül sınırlarında seçimli korozyon oluşmaktadır (Dobrzanski vd., 2005, Durai vd., 2008, Zhu & Hihara, 2010, Shimizu vd., 1995, Toptan vd., 2013, Han vd., 2013, Frenkel, 1998).

$Al_2O_3$  takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin korozyon davranışları ile az sayıda çalışma bulunmaktadır. Alaneme ve Olubambi,  $Al_2O_3$  takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin tuzlu ortamda korozyon davranışını inceledikleri çalışmada, malzemeye katılan pirinç kabuğu külünün takviye ile ana malzeme ara yüzeyinde birikmesi nedeniyle korozyon hızını artırdığını bildirmişlerdir (Alaneme & Olubambi., 2013). Hu ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada, ısıtma işlemi yapılan alüminborat takviyeli alüminyum kompozitin tuzlu ortamda korozyon potansiyelinin çözeltiye alma ısıtma işlemi ile negatif yönde değiştiği görülmüştür. Buna da çözelti ısıtma işlemindeki ara yüzey reaksiyonları neden olmaktadır (Hu vd., 2004). Dobrzanski ve arkadaşları, toz metalurjisi yöntemi ile üretilen  $Al_2O_3$  partikül takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde  $Al_2O_3$  oranı %15 olduğunda kompozitin korozyon hızının arttığını, daha düşük oranlarda  $Al_2O_3$  ilavesinin korozyon özelliklerinde etkili olmadığını bildirmişlerdir (Dobrzanski vd., 2005). Durai ve arkadaşları,  $Al_2O_3$  takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde ana malzemeye az oranlarda mangan ilavesinin korozyon hızını yavaşlattığını belirlemişlerdir (Durai vd., 2008). Deniz suyu ve endüstriyel atmosferde bu tür kompozitin korozyon davranışının incelendiği başka bir çalışmada (Shanbhag vd., 2014), her iki ortamda da kompozitteki  $Al_2O_3$  oranının artması ile korozyon hızının arttığı, deniz suyu ortamında korozyonun daha hızlı olduğu, deniz suyu ortamında çukur korozyonunun, endüstriyel ortamda ise taneler arası korozyonun etkin olduğu belirlenmiştir. Loto ve Babalola yaptıkları çalışmada, nano boyutta %5-10 oranında  $Al_2O_3$  içeren alüminyum kompozitlerde korozyon davranışını incelemişler ve düşük partikül boyutunda korozyon hızının daha yavaş olduğunu görmüşlerdir (Loto & Babalola, 2018). Zhu ve Hihara,  $Al_2O_3$  sürekli fiber ile güçlendirilmiş metal matrisli kompozitlerde korozyon dayanımının, takviye içermeyen alüminyum matris malzemesine göre daha düşük olduğunu, korozyonun fiber ile matris ara yüzeyinde başladığını bildirmişlerdir (Zhu & Hihara, 2010). De Salazar ve arkadaşları, malzemeye uygulanan ısıtma işlemlerin  $Al_2O_3$  takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde korozyon davranışını etkilediklerini belirtmişlerdir (De Salazar vd., 1999). Saxena ve arkadaşlarının çalışmasında bu tür kompozitlerde, mikro çukur ve krater oluşumunun devamında oksit filminin kırılması sonucu korozyonun ilerlediği ve korozyon eğiliminin arttığı görülmüştür (Saxena vd., 1993).

Toz metalurjisi ile kompozit malzeme üretiminde karıştırma veya mekanik alaşımlama işlemi, ana malzeme tozları ile takviye malzemesi tozlarının homojen olarak birbirine karışması ve uygun toz boyutu elde etmek için yapılmaktadır. Mekanik alaşımlama süresi, tozların özelliklerini etkilemekte, bunun sonucunda presleme ve sinterleme işlemleri sonrası elde edilen kompozit malzemenin yapısal özelliklerinin değişimine bağlı olarak malzemenin özellikleri değişmektedir. Mekanik alaşımlama süresinin optimum süreden az veya fazla olması malzeme yapısında ve malzeme özelliklerinde olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır (Suryanarayana, 2001).

$Al_2O_3$  takviyeli alüminyum esaslı kompozitlerde yapılan çalışmalar daha çok bu kompozitlerin üretimi ve mekanik özellikleri üzerine yoğunlaşmış olup, korozyon davranışı ile ilgili az sayıda araştırma bulunmaktadır. Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen, üretim esnasında karıştırma veya farklı mekanik alaşımlama süreleri uygulanmış, %10  $Al_2O_3$  takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin %3,5'lük tuzlu su ortamındaki korozyon özellikleri incelenmiştir.

## 2. Deneysel Çalışmalar

### 2.1. Malzeme ve Metot

Bu çalışmada toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme kullanılmıştır. Alüminyum tozları %99,7 saflıkta ve yaklaşık 70 µm boyutunda, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ise yaklaşık 15 µm boyutundadır. Numuneler hazırlanırken, alüminyum tozları ve ağırlıkça %10 oranında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları turbula cihazında bilyesiz olarak 1 saat karıştırma (KR) veya atritör cihazında bilyeli olarak 2, 4, 6 ve 10 saat mekanik alaşımlama (MA) işlemlerine tabi tutulmuş, sonrasında 700 MPa gerilme altında presleme ve 600 °C sıcaklıkta argon atmosferinde sinterleme işlemi yapılarak blok numuneler elde edilmiştir. Toz metalurjisi üretim parametreleri Tablo 1’de verilmektedir.

**Tablo 1.** Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme numunelerin üretim parametreleri

Malzeme Bileşimi	Karıştırma Alaşımlama Süreleri	Presleme Basıncı	Sinterleme Sıcaklığı ve Ortamı
Al + %10 Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1, 2, 4, 6, 10 saat	700 MPa	600 °C Argon

Üretilen blok numunelerin deneysel yoğunlukları, Arşimet prensibine göre çalışan ve üzerinde 0,0001 gram hassasiyetli yoğunluk kiti bulunan elektronik bir terazi kullanılarak belirlenmiştir. Numunelerin teorik yoğunlukları ise aşağıda verilen karışım kuralına (1) göre hesaplanmıştır.

$$\text{Teorik Yoğunluk} = (\text{Ana Malzeme Yoğunluğu} \times 0,90) + (\text{Takviye Malzemesi Yoğunluğu} \times 0,10) \quad (1)$$

Toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin gözenek oranları, aşağıda verilen eşitlik (2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$\% \text{ Gözenek} = \frac{\text{Teorik Yoğunluk} - \text{Deneysel Yoğunluk}}{\text{Teorik Yoğunluk}} \times 100 \quad (2)$$

Kompozit numunelerin korozyon testlerinde cam malzemeden yapılmış, üç boyunlu korozyon hücresi kullanılmıştır. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı malzemeden çalışma elektrotu (anot) hazırlanırken, numunenin 1 cm<sup>2</sup> yüzeyi açıkta kalacak şekilde diğer yüzeyler epoksi reçine ile kaplanmış, numunenin potansiyostat/galvanostat cihazı ile bağlantısını sağlayacak iletken tel de kalıplama öncesi numuneye eklenmiştir. Karşı elektrot (katot) olarak platin levha, referans elektrot olarak standart kalomel elektrot kullanılmıştır. Korozyon testleri, %3,5 NaCl içeren tuzlu su ortamında yapılmıştır. Korozyon çalışmalarında tüm ölçümler öncesinde numune yüzeyi 1200 numaralı zımpara ile temizlenmiştir. Çalışmalarda öncelikle numunelerin genel korozyon davranışını görmek için -2000 mV ile -300 mV arasında 50 mV/s hızda potansiyel taraması yapılarak akım yoğunluğundaki değişim izlenmiş ve polarizasyon eğrileri elde edilmiştir. Sonrasında Tafel polarizasyon eğrilerini elde etmek için -1400 mV ile -600 mV arasında ikinci tarama yapılmıştır. Elde edilen Tafel polarizasyon eğrilerinden kompozit numunelerin korozyon potansiyelleri, korozyon akımları ve korozyon hızları belirlenmiştir.

### 2.2. Deneysel Sonuçlar ve Tartışma

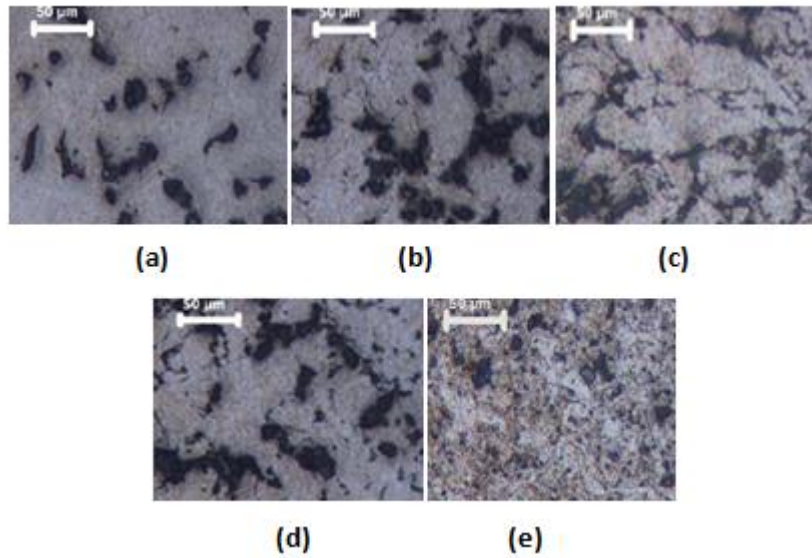
#### 2.2.1. Yoğunluk, Gözenek ve Mikroyapı

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme numunelerinin 1 saat karıştırma ve farklı mekanik alaşımlama sürelerine göre sinterleme sonrası yoğunluk ve gözenek durumları Tablo 2’de verilmektedir. Tabloya göre en iyi yoğunluk değeri 1 saat toz karıştırma ile elde edilen numunede görülmektedir. Bu numunede %97,17 yoğunluk elde edilmiştir. En az gözenek de %2,8 ile bu numunededir. En yüksek yoğunluk ve en düşük gözenek miktarının takviye ve ana malzeme tozlarının 1 saat karıştırılması ile üretilen numunede elde edilmesinde, karıştırma süresinin kısa olması ve turbula cihazında bilyesiz karıştırma yapılması nedeniyle tozlarda fazla deformasyon sertleşmesi olmaması ve bunun sonucunda presleme esnasında sıkıştırılabilirlik özelliğinin iyi olmasının etkili olduğu düşünülmektedir. Mekanik alaşımlama süresi arttıkça kompozit malzemenin yoğunluğu azalmakta, gözenek oranı artmaktadır. En yüksek süre olan 10 saat mekanik alaşımlama yapılan toz karışımı ile elde edilen kompozit numunenin %92,58 yoğunluk ve %7,4 gözenek oranına sahip olduğu görülmektedir. Mekanik alaşımlama süresi arttıkça toz karışımına uygulanan deformasyon miktarı artmakta, bunun sonucunda toz karışımında oluşan deformasyon sertleşmesi de artmaktadır. Toz karışımının sertliğinin artması ise tozların preslenmesi esnasında sıkıştırılabilirlik özelliğini zayıflatmaktadır. Diğer 2, 4 ve 6 saat mekanik alaşımlama sürelerinde ise kompozit malzemelerin yoğunluk ve gözenek oranları orta seviyelerde olmuştur.

**Tablo 2.** %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzeme numunelerin yoğunluk ve gözenek değerleri

Karıştırma Mekanik Alaşım Süresi	Sinterleme Sonrası Yoğunluk		Gözenek (%)
	(gr/cm <sup>3</sup> )	(%)	
1 saat KR	2,75	97,17	2,8
2 saat MA	2,72	96,11	3,8
4 saat MA	2,70	95,40	4,6
6 saat MA	2,70	95,40	4,6
10 saat MA	2,62	92,58	7,4

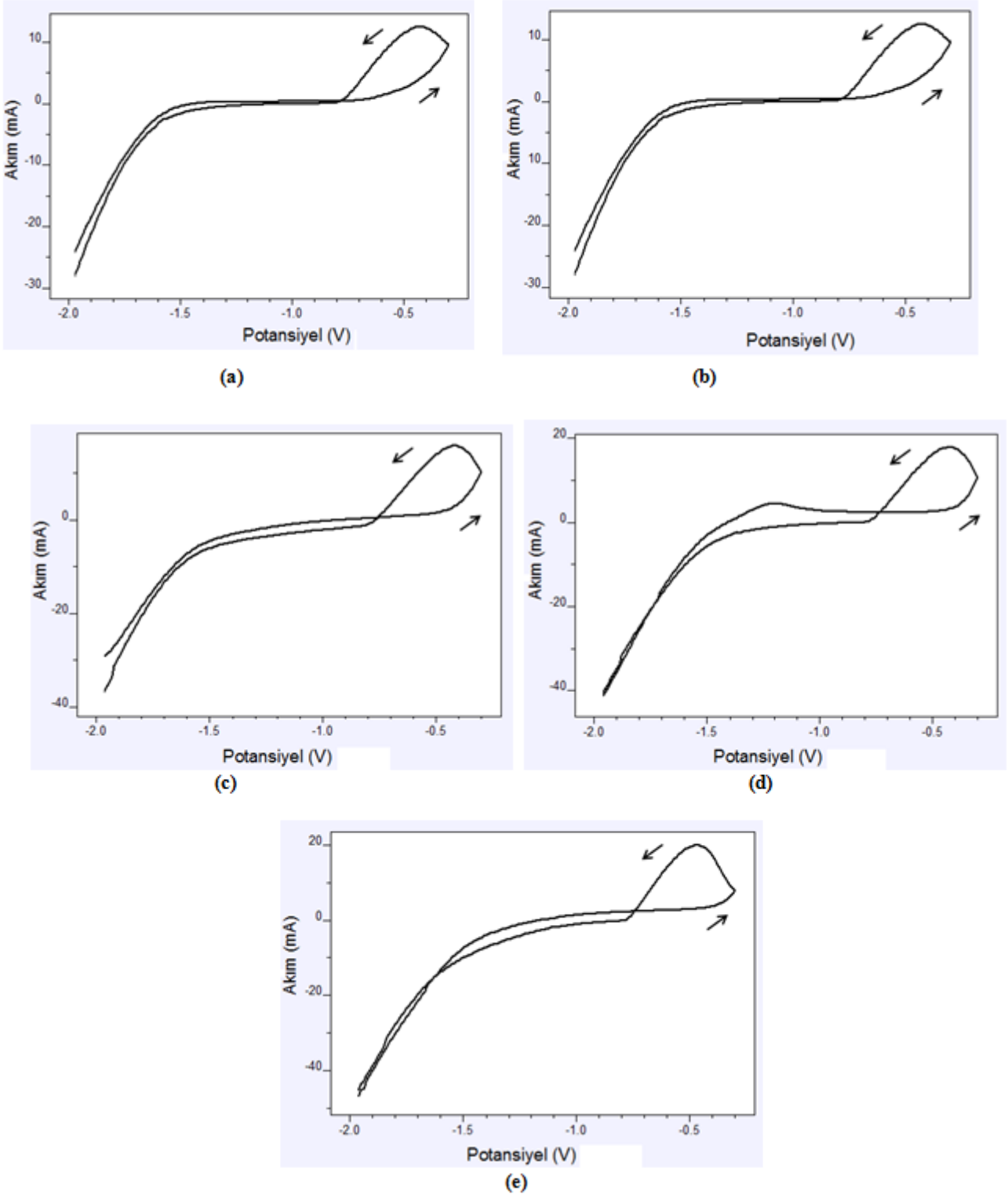
Toz metalurjisi yöntemi ile 1 saat karıştırma veya farklı sürelerde mekanik aşım uygulanarak üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit numunelerin mikroyapı görüntüleri Şekil 1'de verilmektedir. Mikroyapı görüntülerinde takviye malzemesinin ana malzeme içerisinde homojen dağıldığı, aşım süresinin artması ile birlikte yapının daha da homojen olduğu görülmektedir. Takviye elemanları 10 saat dışındaki aşım sürelerinde, tane sınırı ve tane sınırı yakınlarında bulunmaktadır. Özellikle 10 saat mekanik aşım uygulanan kompozit numunede parçacıklar daha küçük boyutlu ve her tarafta daha homojen dağılımıdır. Karabulut ve Çıtak yapmış oldukları çalışmada, 10 saat mekanik aşım yapılmış numunelerde mikro yapıda görülen karartıların SEM ve EDS analizleri sonucunda, kompozitin yapısında herhangi bir reaksiyon ürünü faz oluşmadığını belirlemişlerdir (Karabulut & Çıtak, 2011). Aynı araştırmacıların yapmış oldukları başka çalışmalarda, mekanik aşım ile üretilmiş kompozitlerin mekanik aşım yapılmamış kompozitlere göre daha sert olduğu, çapraz kırılma dayanımlarının da çok daha yüksek olduğu bildirilmiştir (Karabulut & Çıtak, 2011, Karabulut vd., 2013).



**Şekil 1.** (a) 1 saat karıştırma, (b) 2 saat, (c) 4 saat, (d) 6 saat, (e) 10 saat mekanik aşım ile üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin mikroyapıları

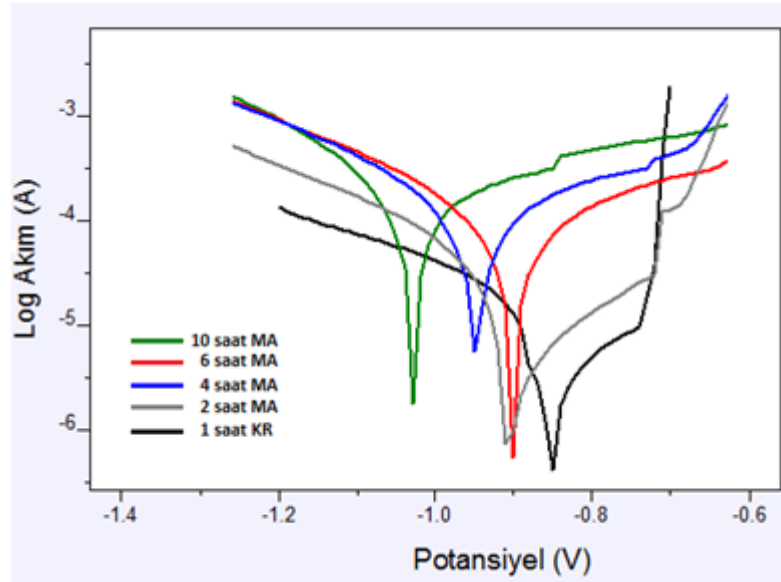
### 2.2.2. Korozyon Davranışı

Potansiyodinamik yöntem ile kompozit numunelere katodik yönden anodik yöne doğru -2000 mV ile -300 mV arasında uygulanan potansiyel taraması esnasında akımda meydana gelen değişimler Şekil 2'de polarizasyon eğrilerinde verilmektedir. Polarizasyon eğrilerinde katodik bölgeden anodik bölgeye gidiş ve tekrar katodik bölgeye dönüş yönleri oklar ile gösterilmiştir. 1 saat karıştırma ve 2 saat mekanik aşım ile üretilen kompozit numunelerde -600 mV potansiyel değerlerine kadar akım düşük seviyelerdedir, yani korozyona karşı alüminyum kompozit malzemenin direnç gösterdiği görülmektedir. Bu numunelerde -600 mV değerinden sonra akım artış göstermekte ve korozyon başlamaktadır. 4, 6 ve 10 saat mekanik aşım ile üretilen kompozit numunelerde ise akım artışı ve korozyon, daha negatif potansiyellerde yani daha erken başlamaktadır. Akım artışının daha negatif potansiyellerde başlaması malzemenin korozyon dayanımının düşük olduğunun göstergesidir. Malzemede akım artışı ne kadar pozitif yöndeki yüksek potansiyellerde başlarsa korozyona karşı direnç o kadar iyidir. Potansiyel taramalarında yüksek potansiyellerde gidiş ve dönüş halkalarının birbirine yakın olması, yani gidiş ve dönüş akım değerlerinin birbirine yakın olması yüzeyde fazla bozunma olmadığını göstermektedir. Bu halkaların geniş olması ise gidiş sırasında akımın dönüşte daha fazla arttığını göstermektedir. Yüksek akım, korozyon şiddetinin bir göstergesidir. Buna göre polarizasyon eğrilerinde 4, 6 ve 10 saat mekanik aşım ile üretilen numunelerde akım şiddetinin ve korozyonun daha fazla olduğu görülmektedir.



**Şekil 2.** (a) 1 saat karıştırma, (b) 2 saat, (c) 4 saat, (d) 6 saat, (e) 10 saat mekanik alaşımlama ile üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum kompozit numunelerin %3,5 NaCl çözeltisinde polarizasyon eğrileri

Karıştırma veya farklı alaşımlama süreleri ile üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit numunelerin Tafel polarizasyon eğrileri Şekil 3'de, Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon potansiyeli, korozyon akımı ve korozyon hızı değerleri Tablo 3'de verilmektedir.



**Şekil 3.** Karıştırma ve farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılan %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin %3,5 NaCl ortamında Tafel polarizasyon eğrileri

**Tablo 3.** Karıştırma ve farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılan %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin %3,5 NaCl ortamında korozyon değerleri

Karıştırma Mekanik Alaşımlama Süresi	Korozyon Potansiyeli (mV)	Korozyon Akımı (A)	Korozyon Hızı (mm/y)
1 saat KR	-855	$2,83 \cdot 10^{-6}$	0,030
2 saat MA	-890	$5,30 \cdot 10^{-6}$	0,057
4 saat MA	-951	$9,60 \cdot 10^{-5}$	1,047
6 saat MA	-911	$9,53 \cdot 10^{-5}$	1,039
10 saat MA	-1026	$16,23 \cdot 10^{-5}$	1,770

Elektrokimyasal korozyon olayında pil hücrelerinde yükseltgenme sonucu oluşan elektronlar anottan katoda doğru hareket ederken, katottan anoda doğru da bir elektrik akımı oluşmaktadır. Korozyon sırasında oluşan akım ne kadar fazla ise malzemede oluşan korozyon ve bunun sonucunda korozyon nedeniyle çözünen madde miktarı da o kadar fazladır. Tafel polarizasyon eğrilerinden elde edilen korozyon akımı değerleri de malzemenin korozyon davranışının ve korozyon hızının belirlenmesinde temel parametrelerden birisidir. Malzemenin korozyon akımının küçük olması korozyon hızının düşük olduğunu, malzemenin korozyon akımının büyük olması da korozyon hızının yüksek olduğunu ifade etmektedir. Buna göre  $2,83 \cdot 10^{-6}$  amper korozyon akımı ve 0,030 mm/y korozyon hızı ile korozyona karşı en iyi dayanımı, takviye malzemesi ve ana malzeme tozlarının 1 saat karıştırılması ile üretilen kompozit numune göstermektedir. 2 saat karıştırma durumunda korozyon akımı  $5,30 \cdot 10^{-6}$  amper ve korozyon hızı 0,057 mm/y olarak görülmektedir. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte kompozit numunelerin korozyon akımları ve korozyon hızları artmakta, korozyon dayanımları azalmaktadır. Özellikle en yüksek alaşımlama süresi olan 10 saat mekanik alaşımlama işlemi ile üretilen numunede en yüksek korozyon akımı olarak  $16,23 \cdot 10^{-5}$  amper ve en yüksek korozyon hızı olarak 1,770 mm/y belirlenmiştir.

Alüminyum alaşımlarının ve alüminyum esaslı kompozit malzemelerin korozyon davranışları ile ilgili çalışmalarda, alüminyum esaslı kompozitlerde korozyon dayanımının saf alüminyuma göre daha zayıf olduğu, kompozit malzemelerde takviye oranının artması ile korozyon dayanımının daha da azaldığı bildirilmektedir. Alüminyum metalinin korozyon dayanımında yüzeyde oluşan pasif alüminyumoksit filmi çok önemlidir ve uygun ortamlarda korozyona karşı dayanımı sağlayan sürekli ve yüzeye iyi yapışan bu pasif oksit filmidir. Alüminyum esaslı kompozitlerde ise farklı elektrokimyasal özelliklere sahip takviye malzemeleri nedeni ile pasif oksit filmin oluşumunda süreklilik bozulmaktadır (Dobrzanski vd., 2005, Durai vd., 2008, Zhu & Hihara, 2010, Shimizu vd., 1995, Toptan vd., 2013, Han vd., 2013, Frenkel, 1998). Bu çalışmada da takviye malzemesi olarak alüminyuma göre çok farklı elektrokimyasal özelliklere sahip olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin yüzeyde oluşan pasif oksit filmin sürekliliğini bozduğu düşünülmektedir. Ayrıca korozyon çalışmalarının yapıldığı tuzlu su ortamı, içerdiği saldırgan özellikteki klorür iyonları nedeni ile pasif filmin sürekliliğini bozan bir diğer etkidir.

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemelerin toz metalürjisi yöntemi ile üretiminde ana malzeme ve takviye toz karışımına farklı sürelerde uygulanan mekanik alaşımlama işlemi ile kompozit malzemenin korozyon davranışının çok fazla etkilendiği görülmektedir. Toz karışımının 1 saat karıştırılması ile üretilen numunede 0.030 mm/y olan korozyon hızı, toz

karışımına 10 saat mekanik alaşımlama uygulanması durumunda 1.770 mm/y olmaktadır. Korozyon hızındaki bu olumsuz değişim çok ciddi bir artıştır. Aynı takviye oranlarında, farklı mekanik alaşımlama sürelerinde kompozit malzemenin korozyon dayanımındaki bu şiddetli değişimin nedeni malzemenin yapısal durumudur. Bilindiği gibi malzemelerde işlem-yapı-özellik ilişkisi bulunmaktadır. Bu ilişkiye göre malzemelerin üretim esnasında görmüş oldukları işlemlere göre malzeme yapısı oluşmakta, bu farklı yapılar göre de malzeme özellikleri değişmektedir. Buna göre farklı parametreler ile üretilen numunelerde farklı korozyon hızlarının oluşmasını açıklamak için kompozit numunelerin yapısal durumlarına bakmak gerekir. Uygulanan mekanik alaşımlama süresine göre kompozit malzemelerin yapısal özelliklerinden olan yoğunluk ve gözenek durumlarını gösteren Tablo 2 incelendiğinde, uygulanan mekanik alaşımlama süresinin artması ile kompozit malzemede gözenek oranının arttığı görülmektedir. Malzemelerin korozyon davranışlarında gözenek yapısı oldukça etkilidir. Malzemenin hem iç kısımlarında hem de yüzeylerinde bulunan gözenekler, takviye elemanlarının yaptığı gibi hem pasif oksit filmin oluşumunda sürekliliği olumsuz etkilemekte hem de malzemenin korozyon dayanımını zayıflatmaktadır.

Mekanik alaşımlama süresinin diğer bir etkisi de karıştırılan tozların sertlikleri, kırılgenlikleri ve boyutları üzerine olmaktadır. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte karıştırılan tozların deformasyon sertleşmesi etkisi sonucunda sertlikleri ve kırılgenlikleri artmakta, bu nedenle de tozların tane boyutları azalmaktadır. Toz tane boyutlarının küçülmesi ile birlikte kompozit malzemenin tane yapısı da küçülmekte, malzeme yapısındaki toplam tane sınırı alanı da artmaktadır. Malzemelerde tane sınırları yüzeysel hatalar olup, atom dizilişi yönlenme farkı, tane içine göre kimyasal bileşim farklılıkları, bazı bileşiklerin oluşum yerleri gibi etkilere sahiptir. Tane içleri ile tane sınırları arasındaki bu durum, korozyon esnasında bir potansiyel farkı oluşturarak korozyon hızını artırmakta ve korozyon dayanımını zayıflatmaktadır. Buna göre mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte, belirtilen etkilerin sonucunda toz metalurjisi yöntemi ile üretilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin korozyon hızı artmakta, korozyon dayanımı azalmaktadır.

### 3. Sonuçlar

Takviye ve ana malzeme tozlarına karıştırma veya farklı sürelerde mekanik alaşımlama yapılarak toz metalurjisi yöntemi ile üretilen %10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile güçlendirilmiş alüminyum esaslı kompozitlerin tuzlu ortamda (%3,5 NaCl) korozyon davranışlarının incelendiği bu çalışma sonucunda aşağıda verilen sonuçlara ulaşılmıştır.

1. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozit malzemenin tuzlu ortamdaki polarizasyon eğrilerine göre 1 saat karıştırma ve 2 saat mekanik alaşımlama ile üretilen numuneler, daha yüksek süre mekanik alaşımlama yapılan numunelere göre daha pozitif yöndeki potansiyellere kadar akım kararlılıklarını korumuşlardır.
2. Polarizasyon eğrilerine göre 4, 6 ve 10 saat mekanik alaşımlama ile üretilen numunelerde potansiyel halkaları daha geniş, akım şiddeti daha fazladır. Buna göre bu kompozit numunelerde korozyon daha şiddetlidir.
3. Tafel polarizasyon eğrilerine göre mekanik alaşımlama süresi arttıkça kompozit numunelerin korozyon akımı ve buna bağlı olarak korozyon hızı artmakta, korozyon dayanımı azalmaktadır. En düşük korozyon hızı, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviye ve alüminyum ana malzeme toz karışımına 1 saat karıştırma uygulanan kompozit numunede, en yüksek korozyon hızı ise toz karışımına 10 saat mekanik alaşımlama uygulanan numunede elde edilmiştir.
4. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> takviyeli alüminyum esaslı kompozitin korozyon hızının artıp korozyon dayanımının azalması, mekanik alaşımlama süresinin artması ile birlikte tozların pekleşmesinden dolayı sıkıştırılabilirlik özelliklerinin azalması sonucunda gözenek oranının artmasının etkili olmasına atfedilmektedir.
5. Mekanik alaşımlama süresinin artması ile pekleşme ve kırılgenlik artışı nedeniyle Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları ve alüminyum tozlarının boyutlarının küçülmesi, bunun sonucunda toplam tane sınırı alanı artışının da korozyon hızını artırıcı, korozyon dayanımını azaltıcı yönde etki yaptığı düşünülmektedir.

### Referanslar

- Alaneme, K.K., Olubambi, P.A. (2013). Corrosion and wear behaviour of rice husk ash-alumina reinforced Al-Mg-Si alloy matrix hybrid composites. *Journal of Materials Research Technology*, 2, 188-194. doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.02.005
- Chandrashekar A, Ajaykumar, B.S., Reddappa, H.N. (2018). Mechanical, structural and corrosion behaviour of AlMg4.5/Nano Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 5, 2811-2817. doi.org/10.1016/j.matpr.2018.01.069
- De Salazar, J.M.G., Urena, A., Manzanedo, S. and Barrena, M.I. (1999). Corrosion behavior of AA6061 and AA7005 reinforced with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles in aerated %3.5 chloride solutions: potentiodynamic measurements and microstructure evaluation. *Corrosion Science*, 41, 529-545.
- Dobrzanski, L.A., Włodarczyk, A. and Adamiak, M. (2005). Structure, properties and corrosion resistance of PM composite materials based on EN AW-2124 aluminum alloy reinforced with the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ceramic particles. *Journal of Materials Processing Technology*, 162, 27-32. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.006
- Durai, T.G., Das, K., Das, S. (2008). Corrosion behavior of Al-Zn/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Al-Zn-X/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites synthesized by mechanical-thermal treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 462, 410-415. doi: 10.1016/j.jallcom.2007.08.073

- Frankel, G.S. (1998). Pitting corrosion of metals; a summary of the critical factors. *Journal of Electrochemical Society*, 145, 2186-2198. doi:10.1149/1.1838615
- Ghanaraja, S., Vinuth Kumar, K.L., Raju, H.P., Ravikumar, K.S. (2015). Processing and mechanical properties of hot extruded Al (Mg)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. *Materials Today: Proceedings*, 2, 1291-1300. doi: 10.1016/j.matpr.2015.07.045
- Ghanaraja, S., Vinuth Kumar, K.L., Ravikumar, K.S., Madhusudan, B.M. (2017). Mechanical properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> reinforced cast and hot extruded Al based metal matrix composites. *Materials Today: Proceedings*, 4, 2771-2776. doi.org/10.1016/j.matpr.2017.02.155
- Han, Y.M., Gallant, D. and Chen, X.G. (2013). Galvanic corrosion associated with Al-B<sub>4</sub>C composites/SS304 and Al-B<sub>4</sub>C composites/AA6061 couples in NaCl and H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> solutions. *Electrochimica Acta*, 94, 134-142. doi: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2013.01.115
- Han, Y.M., Gallant, D., Chen, X.G. (2013). Corrosion inhibition of Al-B<sub>4</sub>C metal matrix composites in a NaCl solution by benzotriazole. *Materials Chemistry and Physics*, 139, 187-195. doi: 10.1016/j.matchemphys.2013.01.021
- Hu, J., Chu, W.Y., Fei, W.D. and Zhao, L.C. (2004). Effect of interfacial reaction on corrosion behavior of alumina borate whisker reinforced 6061 Al composite. *Materials Science and Engineering A*, 374, 153-159. doi: 10.1016/j.msea.2004.01.028
- Katkar, V.A., Gunasekaran, G., Rao, A.G. and Koli, P.M. (2011). Effect of the reinforced boron carbide particulate content of AA6061 alloy on formation of the passive film in seawater. *Corrosion Science*, 53, 2700-2712. doi: 10.1016/j.corsci.2011.04.023
- Karabulut, H., Çıtak, R. (2011). Al Matrisli ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Kompozitlerin Farklı Mekanik Aşım Sürelerinde Üretilmesi ve Karakterize Edilmesi. 6. Uluslararası Toz Metalurjisi Konferansı ve Sergisi, Ankara, 727-732.
- Karabulut, H., Çıtak, R. (2011). Al Matrisli ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Parçacık Takviyeli Kompozitler için Üretim Yönteminin Kompozit Özelliklerine Etkisi. 6. International Advanced Technologies Symposium (IATS'11), Elazığ, 503-506.
- Karabulut, H., Çıtak, R., Çinici, H. (2013). Mekanik Aşım Süresinin Al+%10Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Kompozitlerde Eğme Dayanımına Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28, 3, 635-643.
- Loto, R.T., Babalola, P. (2018). Effect of alumina nano-particle size and weight content on the corrosion resistance of AA1070 aluminum in chloride/sulphate solution. *Results in Physics*, doi: https://doi.org/10.1016/j.rinp.2018.07.025.
- Jun D., Liu, Y.H., Yu, S.R. and Li, W.F. (2004). Dry sliding friction and wear properties of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and carbon short fibres reinforced Al-12Si alloy hybrid composites. *Wear*, 257, 930-940. doi:10.1016/j.wear.2004.05.009
- Qiao, Y., Qu, L., Zhang, X. and Zhang, H. (2015). Boron carbide composite ceramic preparation and corrosion behavior in simulated seawater. *Ceramics International*, 41, 5026-5031. doi: 10.1016/j.ceramint.2014.12.070
- Riahi, A.R. and Alpas, A.T. (2001). The role of tribo-layers on the sliding wear behavior of graphitic aluminum matrix composites. *Wear*, 251, 1396-1407. doi: 10.1016/S0043-1648(01)00796-7
- Saxena, M., Modi, O.P., Prasad, B.K., Jha, A.K.. (1993). Erosion and corrosion characteristics of an aluminum alloy-alumina fibre composite. *Wear*, 169,1(1), 119-124. doi.org/10.1016/0043-1648(93)90397-5
- Saraswathi, Y.L., Das, S. and Mondal, D.P. (2006). Influence of microstructure and experimental parameters on the erosion-corrosion behavior of Al alloy composites. *Materials Science and Engineering A*, 425, 244-254. doi:10.1016/j.msea.2006.03.083
- Shanbhag, V.V., Yalamoori, N.N., Karthikeyan, S., Ramanujam, R., Venkatesan, K.,. (2014). Fabrication, surface morphology and corrosion investigation of Al 7075-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> matrix composite in seawater and industrial environment. *Procedia Engineering*, 97, 607-613. doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.289
- Shimizu, Y., Nishimura, T., Matsushima, I. (1995). Corrosion resistance of Al-based metal matrix composites. *Materials Science and Engineering A*, 198, 113-118.
- Suryanarayana, C. (2001). Mechanical Alloying and Milling. *Progress in Materials Science*, 46, 1-184. doi.org/10.1016/S0079-6425(99)00010-9
- Toptan, F., Alves, A.C., Kerti, I., Ariza, E., Rocha, L.A. (2013). Corrosion and tribocorrosion behaviour of Al-Si-Cu-Mg alloy and its composites reinforced with B<sub>4</sub>C particles in 0.05M NaCl solution. *Wear*, 306, 27-35. doi: 10.1016/j.wear.2013.06.026
- Zhu, J., Hihara, L.H. (2010). Corrosion of continuous alumina-fibre reinforced Al-2 wt.% Cu-T6 metal matrix composite in 3.15 wt.% NaCl solution. *Corrosion Science*, 52, 406-415. doi:10.1016/j.corsci.2009.09.028