

**ARAŞTIRMA MAKALESİ /RESEARCH ARTICLE**

**EMDİRME SONRASI ISIL İŞLEMLERİN B<sub>4</sub>C-AI KOMPOZİTLERİN MİKROYAPI VE ÖZELLİKLERİNE ETKİLERİ**

**Gürsoy ARSLAN<sup>1</sup>, Ayşe KALEMTAŞ, Nihan TUNÇER, Selvin YEŞİLAY**

**ÖZ**

Bu çalışmada argon gaz ortamında, basınçsız olarak 2024 alüminyum alaşımlarının, gözenekli bor karbür altlıklara emdirilmesiyle üretilen bor karbür-alüminyum (B<sub>4</sub>C-AI) kompozitlere emdirme sonrası uygulanan ısı işleminin kompozitlerin mikroyapı, yoğunluk, mekanik ve balistik özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Üretilen kompozitlerin mikroyapı, mekanik ve balistik özelliklerinin uygulanan ısı işlemlerle geniş bir yelpazede kontrol edilebildiği belirlenmiştir. Mikroyapısı ve mekanik özellikleri optimize edilen, kalınlığı yaklaşık 1,15 cm olan kompozit seramik-metal plakaları 1 cm kalınlığındaki cam elyaf örgülü destek plakası ile birleştirilerek elde edilen zırh sistemi, MIL-STD-662'ye uygun olarak yapılan balistik testlerde 4. seviye tehditlere (hızı > 841 m/s olan çelik çekirdekli zırh delici mermi) karşı tam koruma sağlamıştır.

**Anahtar Kelimeler** : Bor Karbür, Kompozit, Emdirme, Zırh, Balistik test.

**EFFECT OF POST INFILTRATION HEAT TREATMENTS ON THE MICROSTRUCTURE AND PROPERTIES OF B<sub>4</sub>C-AI COMPOSITES**

**ABSTRACT**

In this work, the effect of post-infiltration heat treatments on the microstructure, bulk density, mechanical and ballistic properties of B<sub>4</sub>C-AI composites produced by pressureless melt infiltration of 2024 Al alloys into porous B<sub>4</sub>C pellets under an Ar gas atmosphere were investigated. It was found that the microstructure, mechanical and ballistic properties of the produced composites could be tailored in a wide range via application of post-infiltration heat treatments. The armour systems produced by joining approximately 1.15 cm thick ceramic-metal composite plates, whose microstructure and mechanical properties were optimized, with 1 cm thick glass fiber reinforced backing plates, showed full protection against level 4 threats (steel cored armour piercing projectile having a velocity > 841 m/sec) in ballistic tests that were carried out according to the MIL-STD-662.

**Keywords:** Boron Carbide, Composite, Infiltration, Armour, Ballistic test.

<sup>1</sup> Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir.  
E-posta: garslan@anadolu.edu.tr.

## 1. GİRİŞ

B<sub>4</sub>C hafifliği ve üstün mekanik özellikleri nedeniyle, aşınma ve darbe direnci gerektiren uygulamalarda geniş kullanım alanı bulmaktadır. Balistik uygulamalarda kullanılan malzemeler incelendiğinde B<sub>4</sub>C gibi seramik malzemelerin çelik ve alüminyum gibi geleneksel zırhlara alternatif olduğu görülmektedir. Ancak, her ne kadar yekpare seramik zırhlar günümüzde kullanılmakta ise de, kovalent bağlı seramiklerin düşük kırılma tokluğu ve yüksek üretim maliyeti kullanımlarının bu alanda daha da yaygınlaşmasını önlemektedir. Çelik zırhlara oranla sahip oldukları yüksek sertlik ve düşük yoğunlukları nedeniyle kullanılmakta olan yekpare seramik zırhlar genellikle sıcak pres gibi pahalı teknikler kullanılarak üretilmektedir. Gerçekleştirilen bu çalışmada ise süreç koşullarının kolaylığı, seri üretime uygunluğu ve sıcak preslemeye kıyasla çok daha düşük sıcaklıklarda üretim yapılabilmesi açısından düşük maliyetli bir üretim yöntemi olan basınçsız emdirme yöntemi kullanılmaktadır. Al, hafifliği ve düşük ergime sıcaklığı nedeniyle, emdirilecek malzeme olarak en yaygın biçimde kullanılan metal malzemedir. Emdirme işleminin B<sub>4</sub>C-Al sisteminde başarılı olması, sıvı Al'nin B<sub>4</sub>C ile kolayca tepkimeye girmesinden kaynaklanmaktadır. Hafif ve yüksek tokluğa sahip B<sub>4</sub>C-Al kompozitleri sabit disklerde, yüksek aşınma dirençli fren disklerinde ve balistik performansı yüksek zırh plakalarında kullanım alanı bulabilmektedir.

B<sub>4</sub>C-Al kompozitlerinde seramik ile metal arasındaki tepkime miktarı ve hızı kontrol edilip, üretim koşulları optimize edilerek nihai kompozitlerin kimyasal bileşimi, mikroyapısı ve mekanik özellikleri ilave ısıtma işlemlerinden de faydalanılarak geniş bir aralıkta ihtiyaca göre ayarlanabilmektedir.

Zırhlar tank, helikopter, personel taşıma araçları, gemiler ve personel korumasında geniş bir kullanım alanına sahip olması nedeniyle gizli ve stratejik teknolojiler arasında yer almaktadır ve "Vizyon 2023" belgesinde de vurgulandığı üzere mutlaka yurt içinde geliştirilmesi gereken teknolojilerdir. Bu tür teknolojilerin bazı politik ortamlarda para karşılığında bile temininin güç olduğu dikkate alındığında henüz bu teknolojiye sahip olmayan ülkemizin kendi zırh teknolojisini ulusal kaynaklarını kullanarak bir an önce üretmesinin bir zorunluluk olduğu açıktır. Bu çalışmada yüksek kırılma tokluğuna sahip, yapısal işlevi de olabilen, hafif ve çoklu çarpmalara dayanıklı farklı seramik-metal karma zırh sistemlerinin düşük maliyetli yöntemlerle üretimi ve tanımlanması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

## 2. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu çalışmada kullanılan Alfa Aesar firmasına ait ince ve kaba bor karbür tozları ve Eskişehir 1. Hava İkmal ve Bakım Merkezi Komutanlığı'ndan temin edilen alüminyum alaşımının kimyasal bileşimleri Çizelge 1'de sunulmaktadır.

Tozun tane boyutu paketlenme davranışını önemli ölçüde etkilediğinden ince ve kaba B<sub>4</sub>C tozları sırasıyla %25 ve %75 oranlarında birlikte kullanılarak seramik peletlerin paketlenme davranışı iyileştirilmiştir. 1400°C'de 2 saat veya 4 saat pasifleştirilmiş B<sub>4</sub>C tozları kullanılarak hazırlanan yığınlar, alkol ortamında aksel deşirmesinde 150 devir/dakika'da 15 dakika süreyle karıştırıldıktan sonra 55°C'de döner kurutucuda kurutulmuştur. Hazırlanan tozlara bağlayıcı ilave edildikten sonra tek yönlü presle 20 MPa basınç altında şekillendirilme işlemi gerçekleştirilmiştir. Tek yönlü preslemeyle şekillendirilen peletler 300 MPa basınç altında eşbasıncılı presle yoğunlaştırılmıştır.

Bağlayıcı giderme işleminden sonra yaklaşık olarak 5 cm x 5 cm x 1 cm boyutlarındaki numunelerin üzerine, uygun ölçülerde kesilen ve yüzey oksit tabakası uzaklaştırılmış Al alaşım blokları konularak, seramik altlık içerisine yerleştirilmiştir. Emdirme deneyleri 1200°C sıcaklıkta 10 dakika süreyle, ortam denetimli ve iç çapı 75 cm olan yatay alümina tüp fırını içerisinde gerçekleştirilmiştir. Al alaşımının, gözenekli seramik bünyeye sızdırılması sırasında oksitlenmesini önlemek için yüksek saflıkta Ar gazı kullanılmıştır. Ar gazının akış hızı yaklaşık olarak 350 cm<sup>3</sup>/dakika olarak belirlenmiştir. Emdirme sonrası numunelerin yüzeyindeki kalıntı Al alaşımını SiC zımpara kağıtları ile uzaklaştırılıp numunelere 700 veya 800°C'de 48 saat süreyle emdirme sonrası ısıtma işlemi uygulanmıştır. Emdirme ısıtma işlemi 900°C'ye kadar 5°C/dakika, 1200°C'ye kadar ise 10°C/dakika ısıtma hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir. Soğutma işlemi sırasında 1200°C'den 900°C'ye kadar 10°C/dakika, 900°C'den 25°C'ye kadar ise 5°C/dakika soğutma hızı uygulanmıştır. Emdirme sonrası uygulanan ısıtma işlemlerinde ise ısıtma ve soğutma hızı 10°C/dakika olarak uygulanmıştır.

Çizelge 1. Bor karbür tozları ve alüminyum alaşımının kimyasal bileşimi

B <sub>4</sub> C tozu			Alüminyum Alaşımı 2024	
Element	Kaba ağ. %	İnce ağ. %	Element	ağ. %
C	21,85	Safsızlık < 0,2	Cu	3,8-4,9
O	0,83		Mn	1,2-1,8
N	0,43		Mg	0,3-0,9
Si	0,047		Fe, Si, Zn	0,5
Fe	0,022		Ti, Cr	0,3
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	≤ 0,6			
*d <sub>50</sub>	47 µm		1,5 µm	

\*d<sub>50</sub>: tozların ortalama tane boyutu

Emdirme yöntemi ile elde edilen seramik-metal kompozitlerin yığınsal yoğunluğu ASTM C 373-88 standardına uygun olarak belirlenmiştir (ASTM C, 2006) Basma deneyleri ASTM E 9-81 standardı esas alınarak, Instron marka evrensel test cihazında gerçekleştirilmiştir (ASTM E, 1981). Üretilen kompozitlerin basma mukavemetini belirlemek için boy/en oranı 1,8 olacak şekilde kare kesitli numuneler hazırlanmıştır. Basma mukavemetinin belirlenmesinde 5 basma testinin ortalaması alınmıştır. Sertlik ölçümleri Emcotest M1C 010 makro sertlik cihazında Rockwell 15N ucu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sertlik testleri, üretilen kompozitler sıcak kalıplama yöntemiyle kalıba alınıp yüzey parlatma işlemleri yapıldıktan sonra uygulanmıştır. Sertlik testlerinde yük 10 saniye süreyle uygulanmış ve en az 5 ölçümün ortalaması alınarak sertlik ile standart sapma değerleri belirlenmiştir.

Üretilen kompozitlerin mikroyapıları Supra VP 50 ve Evo EP 50 marka taramalı elektron mikroskopları (SEM) ile incelenmiştir. İy yapı fotoğrafları hem ikincil (SEI) hem de geri saçınımlı elektron (BSE) görüntü modunda çekilmiştir. SEI modunda çekilen fotoğraflarda yüzey görünümünü mümkün olduğunca muhafaza edebilmek için elektron kaynağına genellikle nispeten düşük bir voltaj (5 kV) uygulanmıştır. BSE görüntü modunda çekilen fotoğraflarda ise fazlar arasındaki karşıtlığı olabildiğince artırabilmek için daha yüksek voltaj değerleri (20 kV) tercih edilmiştir. SEM numuneleri hazırlanırken standart zımparalama ve parlatma işlemleri uygulandıktan sonra, numuneler 0,05 µm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katkılı parlatma çözeltisi ile ilave bir parlatma işlemine tabi tutulmuştur.

Üretilen seramik-metal karma zırh plakalarının balistik deneylerinin gerçekleştirilebilmesi için zırh plakalarının arkasına bir destek plakasının yerleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma-

da hazırlanan kompozitlerin E-camı elyaf örgü takviyeli polimer esaslı destek plakaları ile birleştirilmesine karar verilmiştir. Bu işlem İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Makine Mühendisliği Bölümü'nde gerçekleştirilmiştir. 18 cm\*18 cm ebatlarında olan her bir destek plakasına 4 kompozit zırh plakası yerleştirilmiştir. Bu şekilde oluşturulan zırh sistemlerinin balistik testleri FNSS şirketindeki balistik test laboratuvarında MIL-STD-662F standardına uygun olarak gerçekleştirilmiştir (MIL-STD-662F, 1997). Zırh sistemlerine uzunluğu 71,12 cm olan sabitleştirilmiş namludan 15 m mesafeden ve sıfır dereceden atış yapılmış olup, barut miktarı merminin çarpma hızı > 841 m/s olacak şekilde ayarlanmıştır. Balistik deneylerde sertleştirilmiş çelik çekirdekli, 7.62 kalibre zırh delici mermiler (AP M2) kullanılmıştır. Zırh sistemini balistik deney düzeneğine yerleştirebilmek için 2 cm kalınlığında Al çerçeve kullanılmıştır.

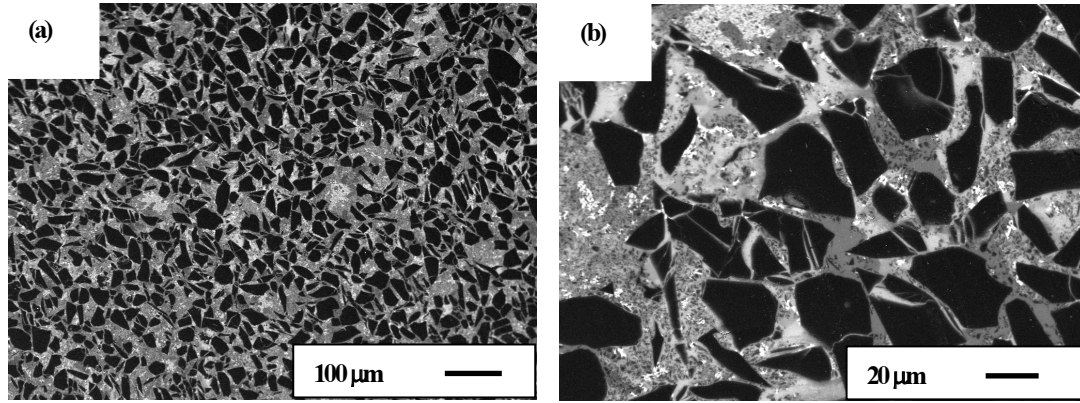
### 3. DENEYSEL SONUÇLAR

B<sub>4</sub>C tozlarının 1400°C'de 2 saat ve 4 saat pasifleştirilmesiyle hazırlanan kompozisyonlarla 1200°C'de 10 dakika süreyle gerçekleştirilen emdirme çalışmaları sonrasında üretilen kompozitlerin yoğunluklarının %100 yoğunluğa çok yakın olduğu belirlenmiştir. Kompozitlerin, üretim şartları ve başlangıç tozlarının pasivasyon koşullarına bağlı olarak kitlesel yoğunluğunun 2,59 ile 2,63 g/cm<sup>3</sup> arasında değiştiği saptanmıştır. Üretilen kompozitlere ait emdirme ve ısıl işlem sonrası % açık gözenek miktarları Çizelge 2'de verilmektedir.

Kompozitlerde artan ısıl işlem süresi ile gözenek miktarında kayda değer bir değişim meydana gelmemektedir. Aksine artan ısıl işlem süresiyle öncelikle açık gözenek miktarında bir miktar azalma (12 saat ve 24 saat) gözlemlenmektedir. Ancak ısıl işlem süresinin 48 saat olması durumunda gözenek miktarında bir miktar artış meydana gelmektedir.

Çizelge 2. Üretilen kompozitlerin yoğunluk değerleri ve açık gözenek miktarları

1400°C'de pasifleştirme süresi (saat)	Isıl işlem sıcaklığı ve süresi	Açık Gözenek (%)
4	Isıl işlem yok	0,79 ± 0,28
2	Isıl işlem yok	0,52 ± 0,12
2	700°C-6 saat	0,72 ± 0,26
2	700°C-12 saat	0,62 ± 0,34
2	700°C-24 saat	0,57 ± 0,30
2	700°C-48 saat	0,74 ± 0,24
2	800°C-48 saat	1,17 ± 0,42
4	700°C-48 saat	1,23 ± 0,22
4	800°C-48 saat	0,89 ± 0,17



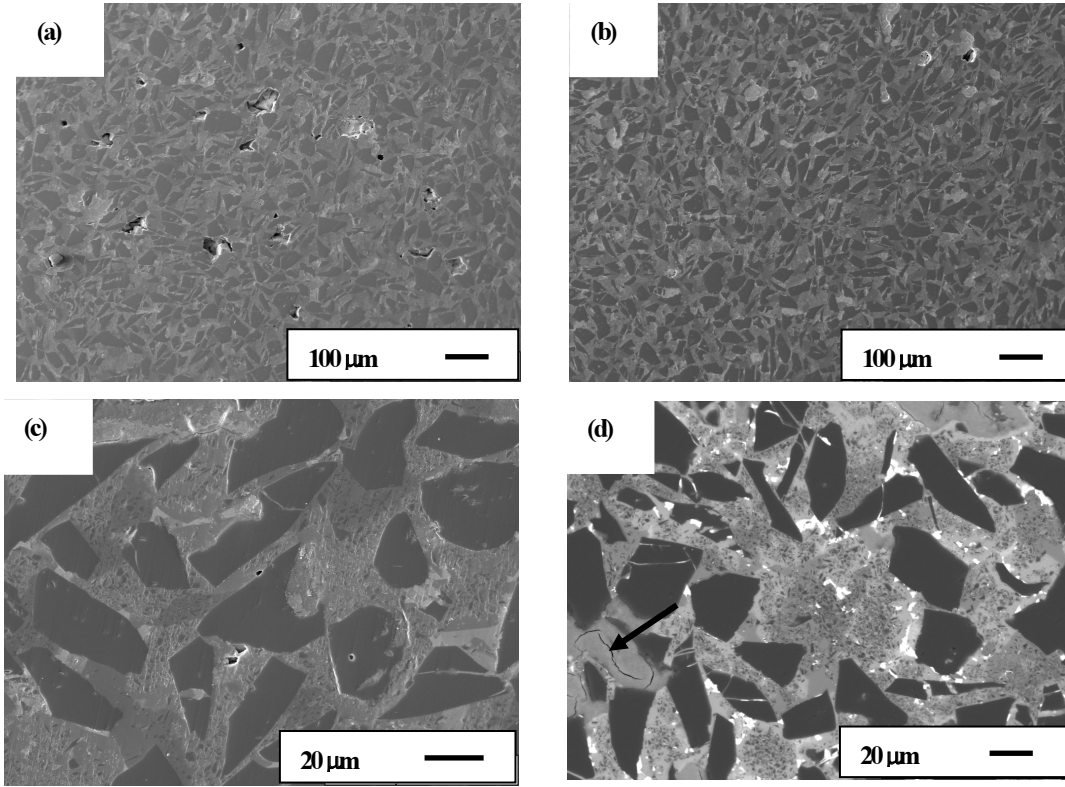
Şekil 1. Emdirme sonrası ısıl işleme tabi tutulmayan kompozitin parlatılmış yüzey görüntüleri (SEM-BEI) (a) 100 büyütme ve (b) 500 büyütme

İç yapılarda görülen siyah renkli iri ve küçük taneler  $B_4C$  fazını, koyu gri tonlarındaki taneler seramik tepkime ürünlerini ( $Al_3BC$ ,  $AlB_2$ ), açık gri tonlarındaki matris Al alaşımını göstermektedir (Şekil 1). Al'ye göre daha ağır olan Cu, Cr gibi alaşım elementlerinin yoğunlaştığı bölgeler beyaza yakın bir renk almaktadır. Kompozitlerdeki fazların ( $B_4C$ , Al,  $Al_3BC$ ,  $AlB_2$ ) neredeyse tamamının hafif elementler olan B ve/veya C içermeleri nedeniyle fazlar arasındaki renk karışıklığı çok zayıf olmaktadır ve özellikle  $Al_3BC$ - $AlB_2$  ayrımını neredeyse imkansız kılmaktadır. Bu olumsuzluk kendisini enerji saçınımı x-ışınları spektrometre (EDS) analizlerinde de göstermektedir çünkü B ve C elementlerinden güçlü sinyaller elde edilememektedir. Yüzey alanının çok daha fazla olması nedeniyle sıvı Al'nin ağırlıklı olarak ince  $B_4C$  taneleri ile tepkimeye girmesi, durumu daha da zorlaştırmaktadır çünkü bu durumda oluşan tepkime ürünleri de ince taneli olmaktadır. Dolayısıyla, belli bir noktadan yapılan EDS analizinde hangi sinyalin hangi fazdan geldiği genelde tespit edilememektedir.

Şekil 1'de 1400°C'de 4 saat tutularak pasifleştirilen  $B_4C$  tozundan üretilen ve emdirme sonrası herhangi bir ısıl işleme tabi tutulmayan kompozitin SEM-BEI görüntüleri yer almaktadır. Şekil 2'de ise, yine aynı koşullarda pasifleştirilen ancak emdirme işlemi sonrasında 800°C'de 48 saat tutularak ilave ısıl işleme tabi tutulan kompozitin SEM görüntüleri yer almaktadır.

Bu iki kompozitin mikroyapıları birbirileri ile kıyaslandığında genelde benzer bir görünüm sergiledikleri açıkça görülmekle birlikte, bazı farklılıklar da dikkat çekmektedir. Kaba ve ince  $B_4C$  taneleri her iki kompozitte de genel olarak homojen bir şekilde dağılmış olmakla birlikte,  $B_4C$  tanelerinden yoksun alanlar da bulunmaktadır [Şekiller 1(a) ve (b), Şekil 2 (d)]. Öte yandan, emdirme sonrası ısıl işleme tabi tutulan kompozitte gözenek miktarının diğerine göre bazı bölgelerde daha fazla olduğu dikkat çekmektedir [Şekil 2(a)]. Ayrıca, Şekil 2 (d)'de tepkime ürününe ait fazdaki çatlak (ok ile gösterilmektedir) bu kompozitin emdirme sonrası uygulanan ısıl işlem nedeniyle daha kırılabilir hale geldiğine işaret etmektedir.





Şekil 2. Emdirme sonrası ısıtılma tabi tutulan kompozitin parlatılmış yüzey görüntüleri (SEM-BEI) (a) ve (b) 100 büyütme, (c) 750 büyütme ve (d) 500 büyütme

Çizelge 3. Farklı ısıtılma koşullarında üretilen kompozitlerin basma mukavemetleri

Özellik	#1400°C/2 saat	#1400°C/4 saat	#1400°C/2 saat	#1400°C/4 saat	#1400°C/2 saat	#1400°C/4 saat
	<sup>§</sup> Isıl işlemsiz	<sup>§</sup> Isıl işlemsiz	<sup>§</sup> 700°C/48 saat	<sup>§</sup> 700°C/48 saat	<sup>§</sup> 800°C/48 saat	<sup>§</sup> 800°C/48 saat
Basma mukavemeti (MPa)	1004 ± 81	950 ± 47	1281 ± 276	1019 ± 198	1421,5 ± 87	1553,5 ± 175
Açık gözenek (%)	0,52 ± 0,12	0,79 ± 0,28	0,72 ± 0,24	1,23 ± 0,22	1,17 ± 0,42	0,89 ± 0,17

# B<sub>4</sub>C tozuna emdirme öncesi uygulanan pasifleştirme işlemi

<sup>§</sup> kompozite emdirme sonrası uygulanan ısıtılma işlemi

Farklı karıştırma koşullarında üretilen kompozitlerin basma mukavemetleri, açık gözenek miktarları ve kitlesel yoğunluk değerleri ile birlikte Çizelge 3'de verilmektedir.

Emdirme sonrası ısıtılma işlemi kompozitlerin basma mukavemeti üzerinde belirgin bir etkisi bulunmaktadır. Emdirme sonrası ısıtılma tabi tutulmayan kompozitlerin basma mukavemetleri 950-1000 MPa civarında iken, 700°C'de yapılan ısıtılma işlemi bu değer 1281 MPa'ya, ısıtılma sıcaklığının 800°C'ye yükseltilmesi durumunda ise 1550 MPa'ya kadar yükselmektedir. Isıtılma işlemleri ile basma mukavemetinin artması, emdirme süreci sonrası yapıda kalan Al'nin B<sub>4</sub>C ile

tepkimeye girerek tüketilmesine ve bunun sonucunda oluşan seramik tepkime ürünlerinin artmasına bağlanmaktadır (Arslan, 2007). Çizelge 3'de gösterilen basma mukavemet ve standart sapma değerleri de bunu doğrulamaktadır. Emdirme sonrası uygulanan ısıtılma işlemleri sonucunda basma mukavemeti değerleri emdirme sonrasına oranla belirgin bir şekilde artmaktadır. Ayrıca uygulanan ısıtılma işlem sıcaklığının yükselmesine bağlı olarak da basma mukavemeti değerlerinde belirgin bir artış sağlandığı belirlenmiştir (Çizelge 3). Isıtılma işlem koşullarına bağlı olarak kompozitteki seramik faz oranı artmakta ve bu da yapıyı daha kırılğan hale dönüştürmektedir. Bu durumda standart sapma değerlerinin de art-

ması beklenmektedir. Aynı ısıl işleme maruz kalan kompozitlerin basma mukavemetleri arasındaki farklılıklar gözenek miktarlarındaki değişimlerle orantılıdır. Örneğin, ısıl işlem uygulanmayan kompozitlerin basma mukavemetleri kıyaslandığında, açık gözenek miktarının % 0,52'den % 0,79'a yükselmesine paralel olarak basma mukavemeti de 1004 MPa'dan 950 MPa'ya düşmektedir. Benzer şekilde, 700 ve 800°C'de ısıl işleme tabi tutulan kompozitlerin basma mukavemetleri de artan gözenek miktarı ile sırasıyla 1281 MPa'dan (% 0,72 gözenek) 1019 MPa'ya (% 1,23 gözenek) ve 1553 MPa'dan (% 0,89 gözenek) 1421,5 MPa'ya (% 1,17 gözenek) düşmektedir.

Bu durumda pasifleştirme koşullarının gözenek miktarı üzerinde bir etkisi olduğu düşünülebilir. Ancak, eldeki veriler böyle bir bağlantı kurulmasını güçleştirmektedir. Şöyle ki; her ne kadar ısıl işlem görmemiş ve 700°C'de ısıl işlem görmüş kompozitlerde 4 saat süreyle pasifleştirilen numunelerde açık gözenek miktarı biraz daha yüksek ise de, 800°C'de ısıl işlem görmüş kompozitlerde bunun tam tersi söz konusudur. Bu uyumsuzluğun bir kaç sebebi olabilir. Birincisi, mukavemet ile gözenek arasındaki ilişkinin net olarak belirlenebilmesi için kapalı gözenek miktarlarının da bilinmesi gerekir. İkincisi, ortalama açık gözenek ve ortalama basma mukavemet değerleri yeterince hassas ve/veya güvenilir bir şekilde belirlenememiş olabilir (ortalamaların hesaplanmasında daha çok sayıda numunenin kullanılması gerekebilir).

Emdirme sonrası ısıl işleme tabi tutulmamış (Şekil 3) ve tabi tutulmuş (Şekil 4) iki kompozitin basma deneyi sonrası kırık yüzey görüntüleri aşağıdaki şekillerde gösterilmektedir.

Bu iki kompozitin parlatılmış yüzeyleri incelendiğinde gözenek miktarı dışında belirgin bir farklılığın tespit edilemediği kaydedilmiştir. Kırık yüzey incelemeleri ise iki kompozit arasında önemli bir farklılığın daha olduğunu açıkça ortaya koymaktadır. Emdirme sonrası ısıl işlem görmeyen kompozitte [Şekil 3(d) ve (e)] sünek kopma izlerine rastlanırken (daire içine alınmış bölgeler), emdirme sonrası ısıl işlem görmüş kompozitlerde bu oluşumlara hiç rastlanmamaktadır (Şekil 4). Al sünek bir metal olduğundan ve sistemde Al dışında bir metalik faz bulunmadığından, sünek kırılma bölgelerinin çokluğu doğrudan yapıda kalmış metalik Al miktarı ile doğru orantılıdır. Bu durumda, beklendiği üzere ve XRD analizleri ile daha önceden de ortaya konduğu gibi, emdirme sonrası ısıl işleme tabi tutulan kompozitte Al fazı önemli ölçüde tüketildiğinden sünek kopma bölgeleri

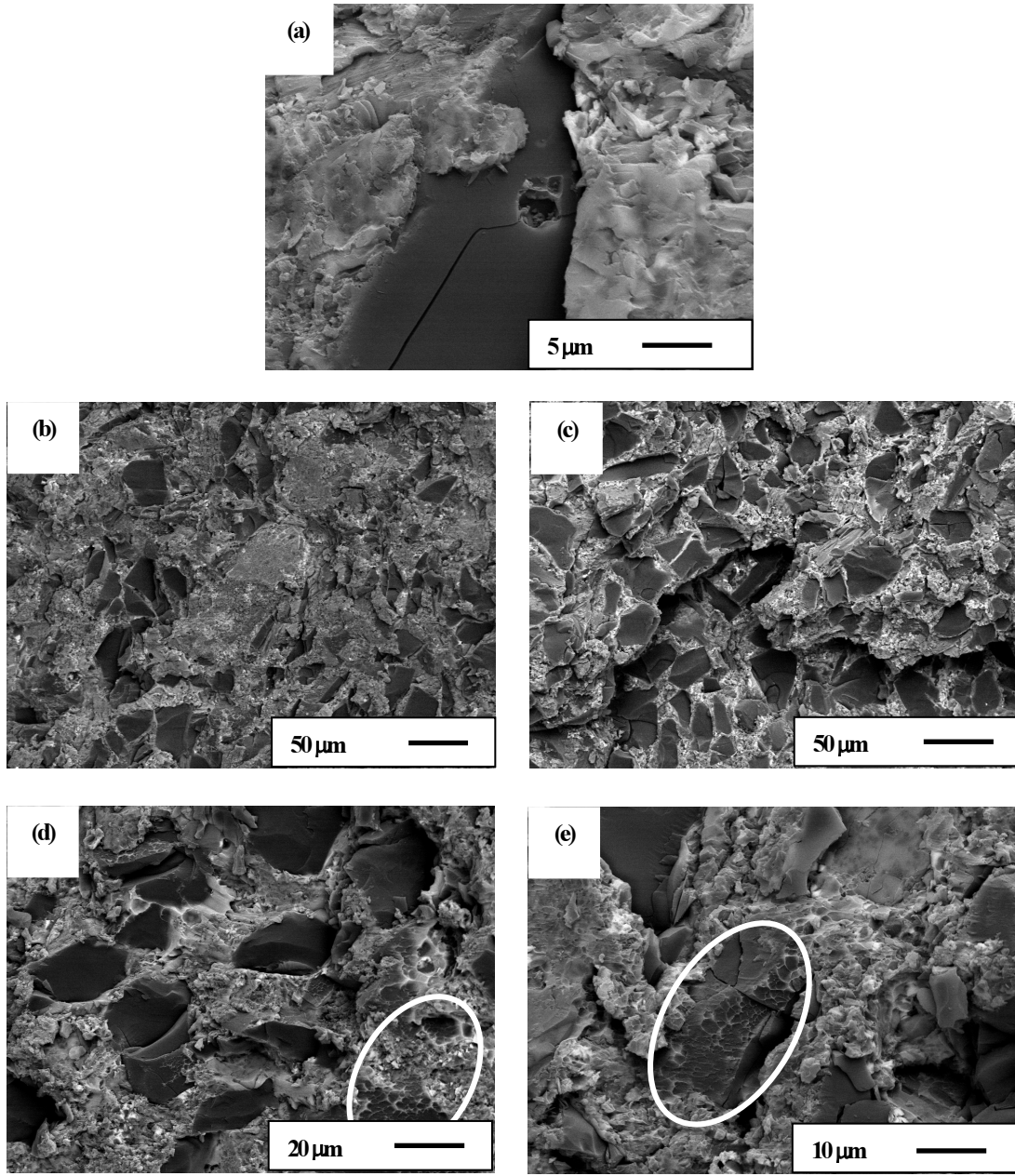
görülmektedir (Arslan, 2007). Tüketilen Al'nin yerini seramik bileşikler ( $Al_3BC$ ,  $AlB_2$ ) almaktadır. Seramiklerin basma mukavemeti metallere oranla çok daha yüksek olduğundan, bunun paralelinde kompozitin basma mukavemetinde de ciddi bir artış meydana gelmektedir. Gerçekten de emdirme sonrası ısıl işlem görmeyen kompozitin ortalama basma mukavemeti 950 MPa civarında iken, ısıl işlem gören kompozitin basma mukavemeti 1550 MPa'nın üzerindedir (Çizelge 3).

$B_4C$  taneleri ile metal matrisi arasındaki ara yüzeylerde ayrışmaların olmaması [Şekil 3 (c)] ara yüzey bağlarının kuvvetli olduğuna işaret etmektedir.

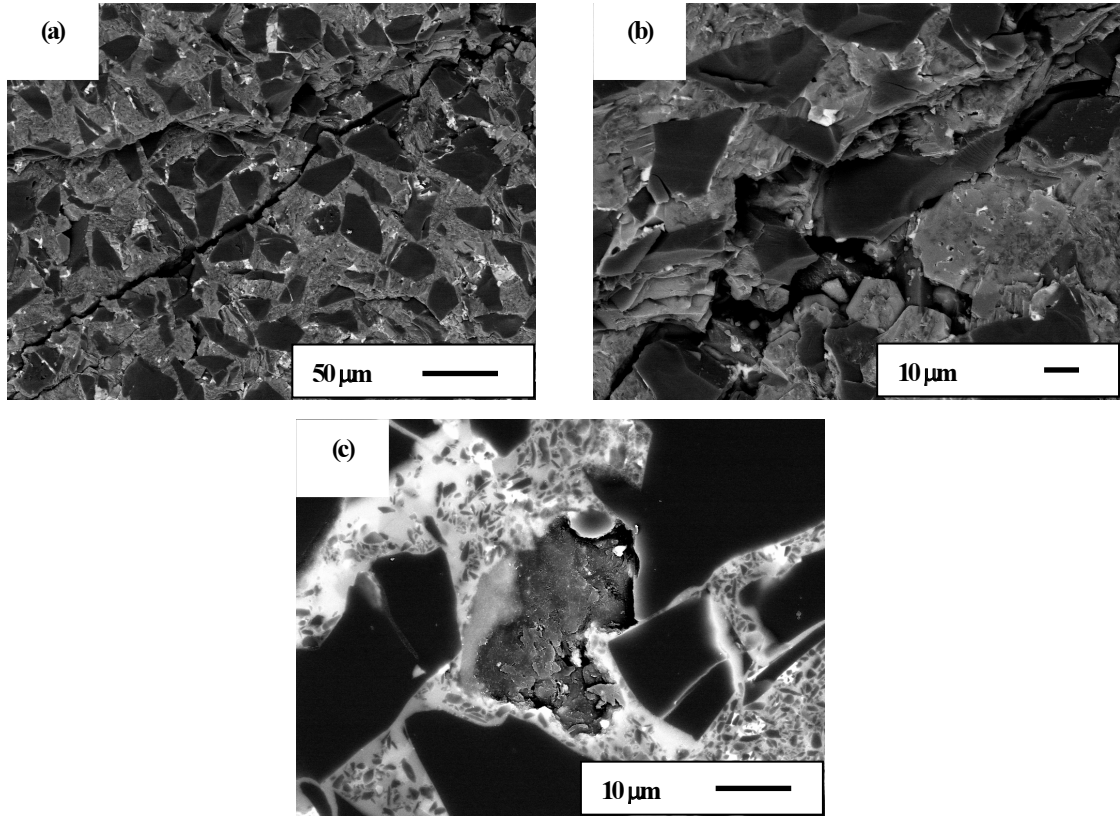
Şekil 3 (a)'da görülen ve yaklaşık 2  $\mu m$  büyüklüğünde olan gözenek,  $B_4C$  tanesinde görülen çatlakın kaynağı olmuş olabilir. Şekiller 3 (b) ve (c) kıyaslandığında  $B_4C$  tanelerinin her yerde homojen dağılmadığı yine açıkça görülmektedir. Isıl işlem görmüş numunede ise oluşan çatlakların daha kalın [Şekil 4 (a)] olduğu ve taneleri keserek ilerlediği dikkat çekmektedir. Şekil 4 (b)'de metal matrisi içinde nanometre büyüklüğünde kapalı gözenekler (ok ile gösterilmekte) bulunduğu görülmektedir. Şekil 4 (c)'de ise yaklaşık 20  $\mu m$  büyüklüğünde büyük bir gözenek görülmektedir.

Rockwell ucuyla (15N) gerçekleştirilen ölçümler sonucu elde edilen sonuçlar Çizelge 4'de sunulmaktadır. Beklendiği üzere üretilen kompozitlerden en düşük sertliğe sahip olanlar ısıl işlem uygulanmayanlardır. 1400°C'de 4 saat pasifleştirilmiş tozla hazırlanan ve emdirme sonrası ısıl işlem görmeyen kompozitin sertliği en düşük çıkmıştır. Uygulanan ısıl işlem sonrası kompozitlerin sertliklerinin Rockwell 15 N ölçümüne göre yaklaşık % 10-15 oranında arttığı belirlenmiştir. Uygulanan ısıl işlem sıcaklığının 700°C'den 800°C'ye yükseltilmesinin sertlik üzerinde belirgin bir farklılık oluşturmadığı belirlenmiştir. Oysa ki basma mukavemeti değerlerinde sıcaklık artışına bağlı olarak belirgin bir artış gözlemlenmiştir. Bunun nedeninin artan ısıl işlem sıcaklığıyla gözenek miktarında meydana gelen artış olabileceği düşünülmektedir (Çizelge 4). Yapıda ısıl işlem sonucu gözenek miktarında meydana gelen artışın sertlik ölçümlerini etkilemiş olabileceği düşünülmektedir.

Çizelge 5'deki sonuçlara göre, alansal yoğunluğu 43,4  $kg/m^2$  olan zırh sistemi, hızı > 841 m/s olan çelik çekirdekli zırh delicisini durdurmakta başarılı olmuştur (Şekil 5). Bundan önceki çalışmalarımızda aynı özellikleri taşıyan ve aynı koşullarda balistik deneylere tabi tutulan iki zırh sistemi de başarılı olmuştur (Arslan, 2006).



Şekil 3. Emdirme sonrası ısıtıl işlem görmeyen kompozitlerin basma deneyi sonrası kırık yüzey görüntüleri (SEM-BEİ)



Şekil 4. Emdirme sonrası ısıtılma tabi tutulan kompozitlerin basma deneyi sonrası kırık yüzey görüntüleri (SEM-BEI)

Çizelge 4. Rockwell ucuyla (15N) gerçekleştirilen sertlik ölçümü sonuçları

Kompozitlere Uygulanan Isıl İşlem	Sertlik
#1400°C/2 saat, emdirme sonrası	83,0 ± 1,0
#1400°C/2 saat, §700°C/48 saat	90,3 ± 1,2
#1400°C/2 saat, §800°C/48 saat	90,4 ± 1,2
#1400°C/4 saat, emdirme sonrası	79,6 ± 0,9
#1400°C/4 saat, §700°C/48 saat	91,2 ± 0,8
#1400°C/4 saat, §800°C/48 saat	91,8 ± 1,2

#B<sub>4</sub>C tozuna emdirme öncesi uygulanan pasifleştirme işlemi

§ kompozite emdirme sonrası uygulanan ısıtılma işlemi

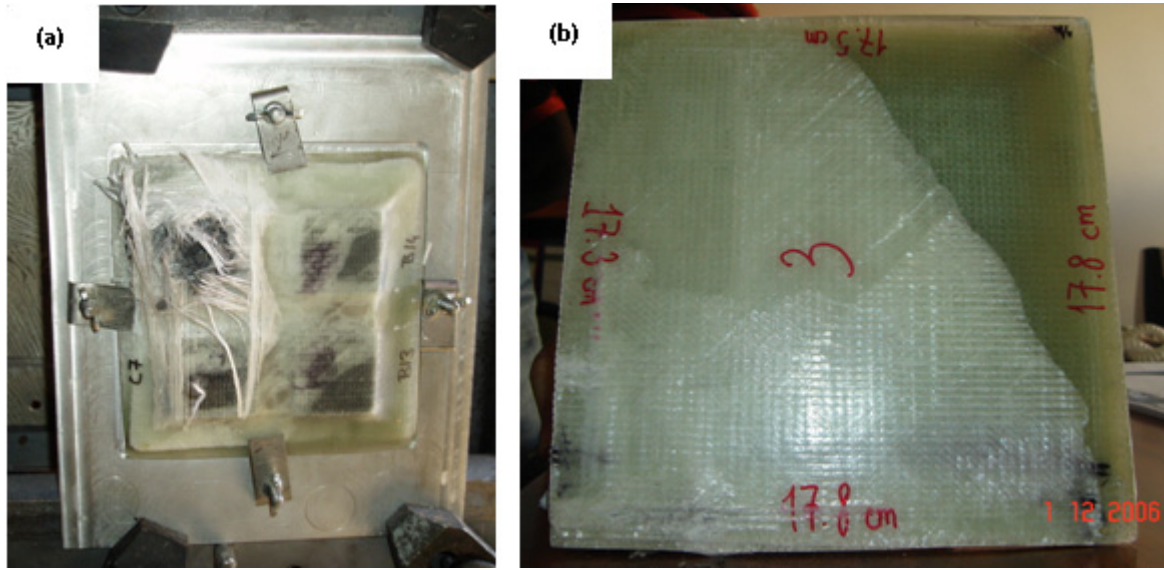
Çizelge 5. Balistik deney sonuçları

Kompozitlere Uygulanan Isıl İşlem	*t <sub>kompozit</sub> (mm)	t <sub>destek plakası</sub> (mm)	Alansal yoğunluk (kg/m <sup>2</sup> )	Sonuç
#1400°C/2 saat	11,5	10	43,4	Başarılı
§700°C/48 saat				
#1400°C/2 saat	11,5	7	39,4	Başarısız
§700°C/48 saat				

\*t : kalınlık

#B<sub>4</sub>C tozuna emdirme öncesi uygulanan pasifleştirme işlemi

§kompozite emdirme sonrası uygulanan ısıtılma işlemi



Şekil 5. Alansal yoğunluğu 43,4 kg/m<sup>2</sup> olan zırh sisteminin balistik deney sonrası görünümü. Atış sonrası (a) kompozit plakanın önden ve (b) destek plakasının arkadan görünümü.

Buna karşın, destek plaka kalınlığı daha ince ve buna bağlı olarak da alansal yoğunluğu daha düşük olan (39,4 kg/m<sup>2</sup>) zırh sisteminin aynı koşullarda gerekli korumayı sağlayamadığı tespit edilmiştir (Çizelge 5).

#### 4. GENEL SONUÇLAR

B<sub>4</sub>C-Al sisteminde süreç koşulları ayarlanarak nihai kompozitlerin mikroyapısı ve mekanik özelliklerinin geniş bir yelpazede kontrol edilebileceği belirlenmiştir. İyapısı ve mekanik özellikleri optimize edilmiş kompozit plakaların cam elyaf örgülü destek plakalarının birleştirilmesiyle elde edilen zırh sistemi, MIL-STD-662F'ye uygun olarak yapılan balistik testlerde 4. seviye tehditlere (hızı > 841 m/s olan çelik çekirdekli zırh delici mermi, 7.62 AP M2) karşı tam koruma sağlamıştır.

Üretmiş olduğumuz B<sub>4</sub>C-Al kompozitlerinin basma deneyleri sonucunda emdirme sonrası 700°C'de 48 saat süreli bir ısıtma işlemi tabi tutulan kompozitlerin basma mukavemetleri ısıtma işlemi yapılmayanlara göre belirgin bir şekilde daha yüksek olduğu belirlenmiştir. 800°C'de 48 saat süreyle ısıtma işlemi tabi tutulan kompozitlerle en yüksek (> 1550 MPa) basma mukavemeti elde edilmiştir.

Ancak, her ne kadar 800°C'de 48 saat süreyle ısıtma işlemi tabi tutulan kompozitlerin sertlik değerlerinde ve özellikle basma mukavemetlerinde belirgin artışlar sağlanıyor ise de gözenek miktarının da biraz arttığı dikkat çekmektedir. Tepkime ürünlerinin (Al<sub>3</sub>BC ve AlB<sub>2</sub>), özellikle de bol miktarda oluşan Al<sub>3</sub>BC fazının (2,99

g/cm<sup>3</sup>) B<sub>4</sub>C (2,52 g/cm<sup>3</sup>) ve Al'ye (2,70 g/cm<sup>3</sup>) oranla daha yoğun olduğu dikkate alınır, gözenek miktarındaki artış temelde hacim daralmasına bağlanmaktadır. Bu gözeneklerin genelde kapalı olacağı varsayılırsa ve Arşimet yöntemiyle sadece açık gözenek miktarının ölçülebilirdiği dikkate alınır, gözenek miktarındaki artışın küçümsenemeyecek boyutlarda olduğu söylenebilir.

#### TEŞEKKÜR

Yazarlar Tübitak'a 105M349 nolu "Bor Karbür-Alüminyum Kompozit Zırhların Balistik Performansının Belirlenmesi" başlıklı projeyi desteklediği için teşekkür etmektedir.

#### KAYNAKLAR

ASTM C 373-88 (2006). Standard test method for water absorption, bulk density, apparent porosity, and apparent specific gravity of fired whiteware products.

ASTM E 9-81 (1981). Standard methods of compression testing of metallic materials at room temperature, 176-188.

MIL-STD-662F, USA. Department of Defense (1997). Military Standard: V50 Ballistic Test for Armor.

Arslan, G., Kara, F., Turan, S., Tuncer, N., Kalemtaş, A. Yeşilay, S. (2007). Bor Karbür-Alüminyum Kompozit Zırhların

Balistik Performansının Belirlenmesi.  
Tübitak Araştırma Projesi, No: 105M349.

Arslan, G., Kara, F., Kalemtaş, A. ve Tuncer, N. (2006). Bor karbür ve silisyum karbür esaslı zırhların üretimi ve karakterizasyonu. *Anadolu Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, No: 030235.*



**Gürsoy ARSLAN**, 1967'de Çaykent'te doğdu. 1990 yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Metalürji Mühendisliği Bölümü'nden Lisans derecesini, 1993'de ise Yüksek Lisans derecesini aldı. Yüksek lisans tezi "O.D.T.Ü., Prof. Dr. Mustafa N. Parlar Tez Ödülü"ne layık görülmüştür. Doktora çalışmalarını 2001 yılında Anadolu Üniversitesi Seramik Mühendisliği Bölümü'nde tamamladı. 2001 yılından beri Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde öğretim üyesi olarak görev yapmaktadır. Science Citation Index (S.C.I) tarafından taranan dergilerde basılmış ya da baskıda olan 11 adet makalesi bulunmaktadır. Dört adet bilimsel araştırma projesinin yürütücülüğünü gerçekleştirmiştir. DAAD ve TÜBİTAK-NATO B2 bursları ile iki yıl süreyle yurt dışında bilimsel araştırmalarda bulunmuştur. İlgili alanları arasında seramik-metal kompozitler, köpük metaller ve X-ışını teknikleri yer almaktadır. Evli ve bir çocuk babasıdır.



**Ayşe KALEMTAŞ**, 1977'de Elazığ'da doğdu. 2000 yılında Anadolu Üniversitesi, Seramik Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini, 2002'de ise Yüksek Lisans derecesini aldı. 2000 yılından beri Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmakta ve 2003 yılında başladığı doktora çalışmalarına devam etmektedir. Science Citation Index (S.C.I) tarafından taranan dergilerde basılmış ya da baskıda olan 4 adet makalesi bulunmaktadır. Yedi adet bilimsel araştırma projesinde araştırmacı olarak yer almıştır. İlgili alanları seramik-metal kompozitler, azot seramikleri ve kaynaklama teknikleridir.



**Nihan TUNÇER**, Nihan Tunçer 1979 yılında Ankara'da doğdu. 2002 yılında Ortadoğu Teknik Üniversitesi Metalürji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'nden lisans derecesini aldı. Aynı yıl Anadolu Üniversitesi Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde yüksek lisansa başladı. Yüksek li-

sans derecesini 2006 yılının Ocak ayında aldıktan sonra doktora eğitiminin ilk dönemini İtalya'da Trieste Üniversitesi Malzeme Bilimi Bölümü'nde misafir doktora öğrencisi olarak geçirdi. Yüksek lisans ve doktora eğitimi boyunca 7 adet uluslararası bildiri sunmuş, 3 adet projede araştırmacı olarak yer almıştır. 2002 yılından beri Anadolu Üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görev yapmakta ve 2006 yılında başladığı doktora çalışmalarına devam etmektedir.



**Selvin YEŞİLAY**, Selvin YEŞİLAY, 1979 yılında Ankara'da doğdu. 2003 yılında Anadolu Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi Seramik Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2006 yılında Seramik Mühendisliği Anabilim dalında yüksek lisansını tamamladı. Şu anda doktorasına devam etmekte olup Anadolu Üniversitesi Güzel Sanatlar Fakültesi Cam Bölümü'nde Araştırma görevlisi olarak çalışmaktadır.