

Araştırma Makalesi

## Geri Dönüştürülmüş Yer Tutucu Kullanımıyla Sürdürülebilir Titanyum Köpük Üretimi Süreci

Betül Demir<sup>1</sup>  ve Aysun Ayday<sup>2,\*</sup> 

Gönderim: 17.04.2025

Kabul: 03.06.2025

<sup>1</sup>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye;  
[demirbt146@gmail.com](mailto:demirbt146@gmail.com)

<sup>2</sup>Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye;  
[aayday@sakarya.edu.tr](mailto:aayday@sakarya.edu.tr)

\*Sorumlu yazar

**Özet:** Bu çalışmada, seramik parlatma atığı (SPA) yer tutucu olarak kullanılarak elektrik akım destekli sinterleme (ECAS) yöntemiyle titanyum köpükler üretilmiştir. Endüstriyel kaynaklı SPA, Seramik Fabrikası'ndan temin edilmiş ve toz metalurjisi yöntemiyle ağırlıkça %2, %5, %8 ve %10 oranlarında Ti tozlarına ilave edilmiştir. Hazırlanan karışımlar, bilyalı değirmende homojenize edildikten sonra preslenerek ECAS yöntemiyle yaklaşık 1300 °C'de sinterlenmiştir. Mikro yapısal analizler, artan SPA içeriği ile birlikte gözenek morfolojisinin daha homojen hale geldiğini, açık gözeneklilik oranının arttığını ve köpük yapının kontrollü şekilde şekillendirilebildiğini ortaya koymuştur. Özellikle, SPA içeriğinde bulunan SiC'in oksidatif bozunmasıyla açığa çıkan gazların, gözenek oluşumunu desteklediği belirlenmiştir. %10 SPA katkısı ile elde edilen %34,4 porozite, hedeflenen düşük yoğunluklu yapıların üretiminde etkili sonuçlar sunmuştur. Bu kapsamda, SPA'nın hem fonksiyonel köpük üretiminde hem de atık yönetimi açısından sürdürülebilir bir yer tutucu alternatif olduğu sonucuna varılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** titanyum köpük, seramik parlatma atığı, sinterleme, porozite.

Research Article

## Sustainable Production of Titanium Foams Using Recycled Space Holder Materials

**Abstract:** In this study, titanium foams were produced using ceramic polishing waste (CPW) as a space holder through the Electric Current Assisted Sintering (ECAS) method. Industrially sourced CPW was obtained from Ceramic Factory and added to titanium powders at weight ratios of 2%, 5%, 8%, and 10% via conventional powder metallurgy techniques. The prepared mixtures were homogenized in a ball mill, pressed, and sintered at approximately 1300 °C using the ECAS process. Microstructural analyses revealed that increasing CPW content led to more homogeneous pore morphology, a higher open porosity ratio, and a more controlled foam structure. In particular, the oxidative decomposition of SiC within the CPW was found to promote pore formation through the release of CO and CO<sub>2</sub> gases. A porosity of 34.4% was achieved with 10% CPW addition, demonstrating effective results for the production of low-density structures. Consequently, CPW was concluded to be a sustainable space holder alternative in terms of both functional foam production and waste management.

**Keywords:** titanium foam, ceramic polishing waste, sintering, porosity.

## 1. Giriş

Mühendislik malzemeleri, teknik, ekonomik, çevresel ve görsel gereksinimler doğrultusunda zaman zaman yetersiz kalmakta; bu durum ise yeni nesil üretim yöntemleri ile yeni nesil malzemelerin geliştirilmesini zorunlu kılmaktadır [1,2]. Bu bağlamda, metal köpükler gelişime son derece açık, önemli malzeme gruplarından biri olarak öne çıkmaktadır. Metal köpük, büyük bir gaz dolu gözenek fraksiyonu içeren katı bir metalden oluşan gözenekli bir yapı olarak tanımlanabilir. Tipik olarak, toplam hacmin %40-95'i boşluklardan veya gözeneklerden oluşmaktadır. Bu gözenekler kapalı veya açık (birbirine bağlı bir ağ) hücreli olmak üzere iki farklı şekilde olabilir. İlk olarak, 1940'lı yıllarda Benjamin Sosnick, alüminyum köpükleştirme denemesi ile literatüre girmiştir. 1950'lerde popüler olan bu araştırmalar da, sonra ki senelerde kısa bir durgunluk dönemi yaşanmıştır [3–6]. Günümüzde ise bu malzemelere olan ilgi yeniden artış göstermiştir. Bu yeniden yükselişin nedeni, o zamana kadar sonsuz gibi görünen enerji kaynaklarının aslında sınırlı olduğunun anlaşılmasıydı. Çünkü kara taşımacılığı, deniz taşımacılığı ve hava taşımacılığı sektörlerinde, araçların giderek daha kapsamlı ve büyük hale gelmesi, enerji verimliliği ve ağırlık sorunlarını ön plana çıkarmaya başladı. Metal köpükleri, özellikle hafiflik, dayanıklılık ve termal iletkenlik gibi olumlu özellikleri onları birçok alanda cazip hale getirmektedir [1,7,8].

Alüminyum ve çelik köpükler yaygın kullanılan metal köpük türleri olsa da, nikel, magnezyum, bakır ve titanyum son zamanlar önemli bir yer almıştır [2,8–16]. Bu çalışmada toz metalürjisi (TM) yöntemi kullanılarak titanyum esaslı köpük üretimi sürecine değinilecektir. Tablo 1'de Ti köpüklerin çeşitli kullanım alanları verilmiştir.

**Tablo 1.** *Ti köpük uygulama alanları ve Fonksiyonları* [2,7,16–21]

| Uygulama Alanı                           | Fonksiyonel Açıklama                                                                                                |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Biyomedikal İmplantlar</b>            | Gözenekli yapısı sayesinde kemiklerle iyi entegrasyon sağlar, vücut tarafından biyouyumlu şekilde kabul edilebilir. |
| <b>Ortopedik Protezler</b>               | Düşük yoğunluğu ve biyouyumluluğu sayesinde, uzun süreli kullanım için idealdir.                                    |
| <b>Isı Eşanjörleri</b>                   | Yüksek yüzey alanı sayesinde ısı transferini artırır ve verimli ısı değişimi sağlar.                                |
| <b>Filtreleme Sistemleri</b>             | Gözenekli yapısı, gaz ve sıvı filtrasyonunda yüksek verimlilik sunar.                                               |
| <b>Otomotiv Sektörü</b>                  | Enerji emici özelliği sayesinde çarpışma anında darbe sönümleyici olarak görev yapar.                               |
| <b>Havacılık ve Uzay Endüstrisi</b>      | Hafiflik ve yüksek mukavemeti sayesinde yakıt verimliliğini artırır.                                                |
| <b>Ses ve Titreşim Sönümleme</b>         | Gözenekli yapı sayesinde ses yalıtımı ve titreşim sönümleme sağlar.                                                 |
| <b>Pil ve Yakıt Hücresi Elektrotları</b> | Yüksek yüzey alanı, reaksiyon alanını artırarak elektrokimyasal performansı iyileştirir.                            |
| <b>Dekoratif ve Mimari Uygulamalar</b>   | Estetik görünüm ve korozyon direnci sayesinde iç ve dış mekân tasarımlarında kullanılabilirliğini artırır.          |

Toz metalurjisi ile metalik köpük üretimi arasında bazı küçük farklılıklar bulunsa da, genel süreç benzerdir. Bu süreç; metal tozlarına köpürtücü madde veya yer tutucu ilave edilerek, bu karışımın homojen bir şekilde karıştırılması, ardından oda sıcaklığında hidrolik presle kompakt hale getirilmesi ve köpükleştirilmesi şeklinde gerçekleştirilir [4,22–24].

Kullanılan yer tutucular, düşük sıcaklıklarda sistemden uzaklaştırılabilen ve minimal kirlilik yaratan katı malzemelerdir. Bu yöntemde, yer tutucu ile titanyum tozu karıştırılır, karışım preslenir ve ısıtılma işlemi uygulanarak yer tutucu öncelikle sistemden uzaklaştırılır. Ardından sinterleme işlemi ile titanyum köpüğü elde edilir [1,3,6,16,17,25–27]. Bu metodun en büyük zorluğu, parçalar üzerindeki organik veya inorganik yer tutucu malzemenin etkili bir şekilde uzaklaştırılmasıdır. İstenilen gözenek boyutu, kullanılan yer tutucu taneciklerinin boyutuna göre ayarlanabilmektedir. Genellikle yer tutucu olarak, 200 °C’de uzaklaştırılabilen üre veya amonyum hidrojen karbonat (AHK) gibi organik maddeler, seramik bazlı yer tutucular, polistiren gibi ya da daha düşük sıcaklıklarda uzaklaştırılabilen magnezyum gibi malzemeler tercih edilmektedir. Yer tutucuların tam olarak sistemden uzaklaştırılamaması, titanyum veya diğer malzemelerde istenmeyen kirliliğe yol açabilir [16,22,23,27–31]. Bu, özellikle biyomedikal veya yüksek performanslı malzemeler için sorun teşkil edebilir. Farklı uygulamalarda örneğin, biyomedikal ile havacılık da kullanılan malzemeler arasında büyük farklılıklar bulunabilir, bu da seçilecek yer tutucunun tipini ve özelliklerini kısıtlar. Yer tutucuların düzgün bir şekilde dağılması veya bazı bölgelere yeterince yerleşmemesi, son üründe heterojen bir yapıya yol açabilir. O sebeple köpük üretiminde yer tutucular oldukça önemli bir rol oynarlar [32–34]. Bu çalışmada, kullanılan yer tutucu tozlar olarak seramik parlatma atığı (SPA) materyali kullanılarak, titanyum köpük üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu bağlamda kullanılacak olan seramik atık toz Kütahya Seranit Fabrikasından temin edilmiştir. Seramik parlatma atık (SPA) materyallerin yer tutucu olarak kullanımı ile geri kazanımı çevresel sürdürülebilirliği artırmayı da hedeflemektedir.

Sinterleme işlemi, bu çalışmada geleneksel yöntemlerden farklı Elektrik Akım Destekli Sinterleme (ECAS), yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Bu yöntem malzeme üretiminde daha hızlı ve verimli sinterleme sağlamak amacıyla kullanılan bir yöntemdir. Elektrik akımının doğrudan malzeme üzerine uygulanması, ısının hızlı ve homojen bir şekilde yayılmasına olanak sağlar. Titanyum köpük üretimi için, bu teknik, titanyum tozu veya parçacıklarının belirli bir sıcaklık ve basınç altında sinterlenmesiyle üretilir. ECAS yöntemi, geleneksel sinterleme yöntemlerine kıyasla çeşitli önemli avantajlar sunar. Elektrik akımı, tozlar arasındaki serbest elektronların hareketini teşvik ederek Joule ısısı oluşturur; bu da ısının tüm malzeme boyunca homojen biçimde dağılmasına neden olur. Böylece malzeme çok daha kısa sürede yüksek sıcaklıklara ulaşabilir. Böylece, sinterleme süresi önemli ölçüde kısalmış ve daha düşük enerji tüketimi sağlanır [20,35–37].

## 2. Deneysel Çalışmalar

Bu tez çalışmasında, piyasadan temin edilen Ticari Ti tozu ve Kütahya Seranit Fabrikasından temin edilmiş seramik parlatma atık tozu kullanılmıştır. Ti tozunun genel özellikleri Tablo 2’de sıralanmıştır. Tozlarından geleneksel toz metalurjisi yöntemi ile hazırlanmış ve elektrik akımı destekli sinterleme yöntemi ile üretimleri gerçekleştirilmiştir. Yer tutucu ağırlıkça %2, %5, %8 ve %10 parlatma atığı katkılı

tozlar, homojen karışım eldesi için bilyalı değirmene 1:20 oranında (ağırlıkça toz/bilye) besleme yapılarak kuru ortamda 250 RPM hızla 2 saat süre ile karıştırılmıştır. Ardından hazırlanan toz karışımları, 15 mm çelik kalıp içerisine yerleştirilip 50 MPa basınç altında hidrolik pesle preslenerek pelet haline getirilmiştir. ECAS yöntemiyle gerçekleştirilen üretim sürecinde, numuneler  $900 \pm 50$  A akım değerlerinde, kalıp sıcaklığı  $1300^\circ\text{C}$ 'de sabitlenecek şekilde açık atmosferde sinterleme işlemleri gerçekleştirilmiştir. Her bir üretim için sinterleme süresi 15 dakika olarak belirlenmiştir.

**Tablo 2.** Ticari Ti Tozunun genel özellikleri

| Atomik Özellikler     |       | Fiziksel Özellikler                     |      |
|-----------------------|-------|-----------------------------------------|------|
| <i>Atom Numarası</i>  | 22    | <i>Yoğunluk (g/cm<sup>3</sup>) 20°C</i> | 4.5  |
| <i>Atom Çapı [nm]</i> | 0,147 |                                         |      |
| <i>Kristal yapı</i>   | HSP   | <i>Ergime Sıcaklığı (°C)</i>            | 1660 |

Üretilen numuneler metalografik olarak hazırlanarak yüzey karakterizasyonları gerçekleştirilecektir. Bakalite alınan numuneler, standart numune hazırlama yöntemlerine uygun olarak sırasıyla 60, 180, 240, 400, 600, 800, 1000 ve 1200 meshlik SiC zımpara ile zımpara kademelerinden geçirilmiştir ve vakumlu etüvde kurutma için 24 saat bekletilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen Ti köpük numunelerinin morfolojilerinin incelenmesinde JOEL JSM-6600 marka taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve EDS analiz test cihazları ile incelenmiştir. Rigaku marka X-Işını difraktometresi faz analizleri için kullanılmıştır. Cihaz 25 kV güç değerlerinde ve numune yüzeyinin  $0,2^\circ$ 'lik artışlarla  $0-90^\circ$  arasında taranmasıyla gerçekleştirilmiştir. Cu K $\alpha$  tüpü kullanılmıştır.

Elde edilen Ti köpük (%10), 0,001 mg hassasiyetine sahip Radwag marka hassas terazi kullanılarak tartımları yapılmıştır. Öncelikle, numunelerin etüvde beklettikten sonra ki kuru ağırlıkları hassas terazi ile ölçülmüştür. Daha sonra, numunenin açık gözeneklerinin su ile tamamen dolmasını sağlamak amacıyla, numune belirli bir süre saf su içerisinde bekletilerek doyurulmuştur. Bu işlem sonrasında yüzeyde biriken fazla su dikkatlice silinmiş ve numunenin doymuş ağırlığı ölçülmüştür. Ardından, numune tamamen suya batırılarak suda ki ağırlıkları tespit edilmiştir. Elde edilen bu üç ölçüm değeri kullanılarak numunenin hacmi ve buna bağlı olarak hacimsel yoğunluğu hesaplanmıştır. Numunelerin yoğunlukları, Arşimet Prensibi esas alınarak denklem 2.1 'de verilen formül yardımıyla hesaplanmıştır [38].

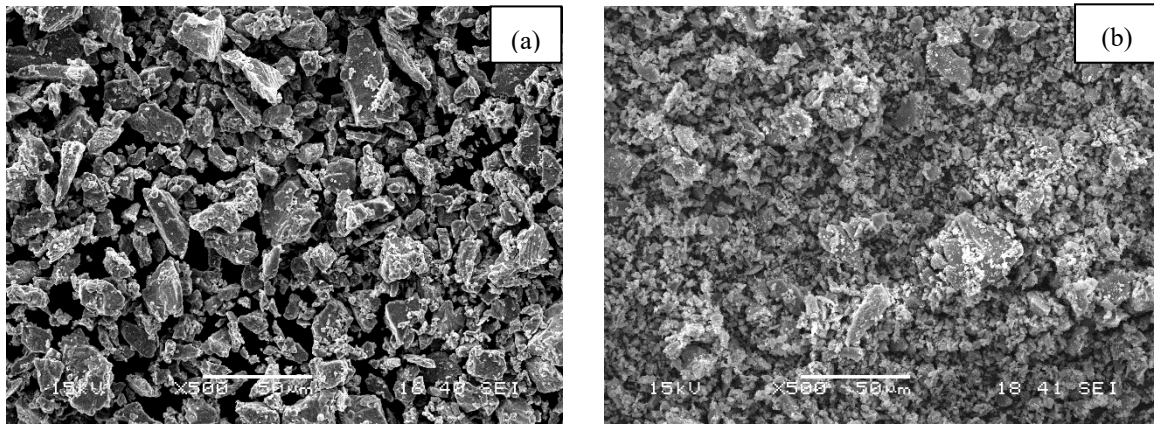
$$\rho = \frac{m^*}{m' - m_a} \times \rho_{su} \quad (2.1)$$

Burada:

- $\rho$ : Köpüğün yoğunluğu (g/cm<sup>3</sup>)
- $m^*$ : Köpüğün havadaki kuru ağırlığı (g)
- $m'$ : Köpüğün suya doymuş ağırlığı (g)
- $m_a$ : Köpüğün su içerisindeki askıdaki ağırlığı (g)
- $\rho_{su}$ : Saf suyun yoğunluğu ( $\sim 1$  g/cm<sup>3</sup>)

### 3. Deneysel Sonuçlar ve Tartışmalar

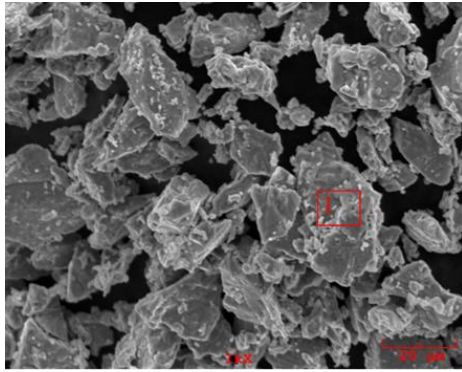
Şekil 1’de SEM görüntüleri verilen toz malzemeler, metal köpük üretiminde kullanılan metalik tozu ve yer tutucu tozu temsil etmektedir. Titanyum (Ti) metal tozu, keskin kenarlı, düzensiz ve açısallık morfolojisiyle yüksek gözeneklilik sağlamak amacıyla metal matrisi oluşturan ana fazı bileşenidir. Seramik parlatma atığı tozuna ait toz ise, daha ince, yuvarlak ve yoğun bir yapıya sahiptir. Bu toz, üretim sürecinde yer tutucu olarak kullanılarak köpük yapının gözenekli formunun elde edilmesini ve köpükleştirici görevi görecektir. Her iki tozun morfolojik özellikleri, üretilecek metal köpüğün gözenek yapısını ve mekanik özelliklerini doğrudan etkilemektedir [19,33]. Tozların morfolojik özellikleri, sinterleme sürecinde yoğunlaşma ve gözenek yapısının oluşumu üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Keskin kenarlı ve düzensiz şekilli Ti tozları, sinterleme sırasında daha düşük akışkanlığa sahip olmalarına rağmen, parçacıklar arası temas noktalarının fazla olması nedeniyle boyun oluşumu ve difüzyon mekanizmaları daha etkin şekilde gerçekleşebilir. Bu durum, sinterleme sonrası mekanik dayanımı artırabilir. Öte yandan, seramik parlatma atığı gibi daha ince ve yuvarlak morfolojili tozlar, daha homojen bir şekilde dağılarak yer tutucu görevini etkili şekilde yerine getirerek ve sinterleme sırasında bu partiküllerin uzaklaştırılmasıyla gözenek oluşumu sağlanır. Bu nedenle, her iki tozun morfolojik özellikleri sinterleme sonrası elde edilen metal köpüğün gözenek boyutu, dağılımı ve mekanik özellikleri üzerinde belirleyici rol oynamaktadır.



Şekil 1. Tozların SEM Görüntüleri (a) Ti Tozu (b) Seramik Parlatma Atık Tozu

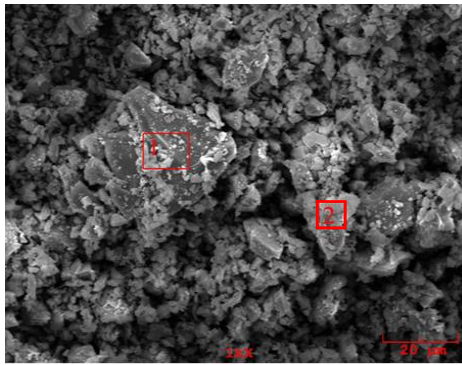
Şekil 2’de saf Ti tozu ve SPA için EDS analizleri verilmiştir. Ti içinde herhangi bir katkı olmadığı sadece Ti elementinden oluştuğu görülürken, EDS analizi sonucunda, seramik parlatma atığının bileşimini değerlendirmek amacıyla yapılan incelemede, elementel olarak alüminyum (Al), silisyum (Si), karbon (C), oksijen (O) ve sodyum (Na) tespit edilmiştir.





(a)

| Elt. | Rady. | Şiddet (c/s) | Toplam | Birim |      |
|------|-------|--------------|--------|-------|------|
| Ti   | Ka    | 902.45       | 100.0  | wt.%  | 100% |

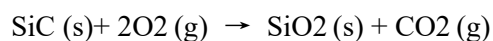
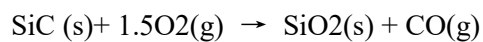


(b)

| Elt. | Rady. | şiddet (c/s) | Toplam | Birim |   |
|------|-------|--------------|--------|-------|---|
| C    | Ka    | 0.54         | 0.559  | wt. % | 1 |
|      |       | 0.99         | 1.335  |       | 2 |
| O    | Ka    | 151.47       | 39.093 | wt. % | 1 |
|      |       | 115.57       | 39.427 |       | 2 |
| Na   | Ka    | 41.00        | 4.744  | wt. % | 1 |
|      |       | 21.28        | 3.221  |       | 2 |
| Al   | Ka    | 155.20       | 13.991 | wt. % | 1 |
|      |       | 109.11       | 12.615 |       | 2 |
| Si   | Ka    | 415.37       | 41.613 | wt. % | 1 |
|      |       | 340.34       | 43.402 |       | 2 |

**Şekil 2.** SEM görüntüleri ve EDS analizleri (a) Ti Tozu (b) Seramik Parlatma Atığı

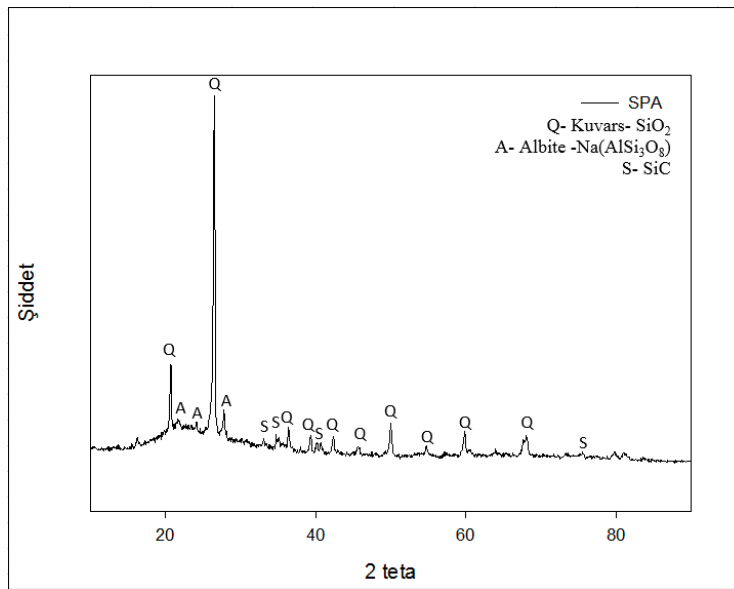
Al ve Si elementleri, tipik olarak seramik matrisin temel bileşenleri olan alüminyum silikat yapılarının göstergesi iken; C elementi, aşındırıcı partiküller (alümina, silisyum karbür, elmas tozu gibi) ve kimyasal katkı maddelerinden kaynaklı olabilir. Oksijenin varlığı, metal oksit fazlarını işaret ederken, Na elementi ise seramik hammaddesi ya da katkı maddesi olarak kullanılan bazı bileşiklerin bir parçası olabilir. Elde edilen elementel seramik kompozisyonları ile benzerdir. Bununla birlikte, seramik bünyelerde kullanılan seramik parlatma atıkları, SiC içeriği tespit edilmiştir (Şekil 4). SiC'ün oksidasyon reaksiyonunda, yüksek sıcaklıkta SiC, oksijenle tepkimeye girerek silika (SiO<sub>2</sub>) ve karbon monoksit (CO) veya karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) oluşturur. Bu gazlar, özellikle sıvı fazda hapsolür ve kabarcıklar oluşturur. Bu süreç köpükleşmeye yol açar.



Metalik toz içerisinde ilave edilen parlatma atığının sinterleme sonrası reaksiyonu aşağıda verilmiştir.

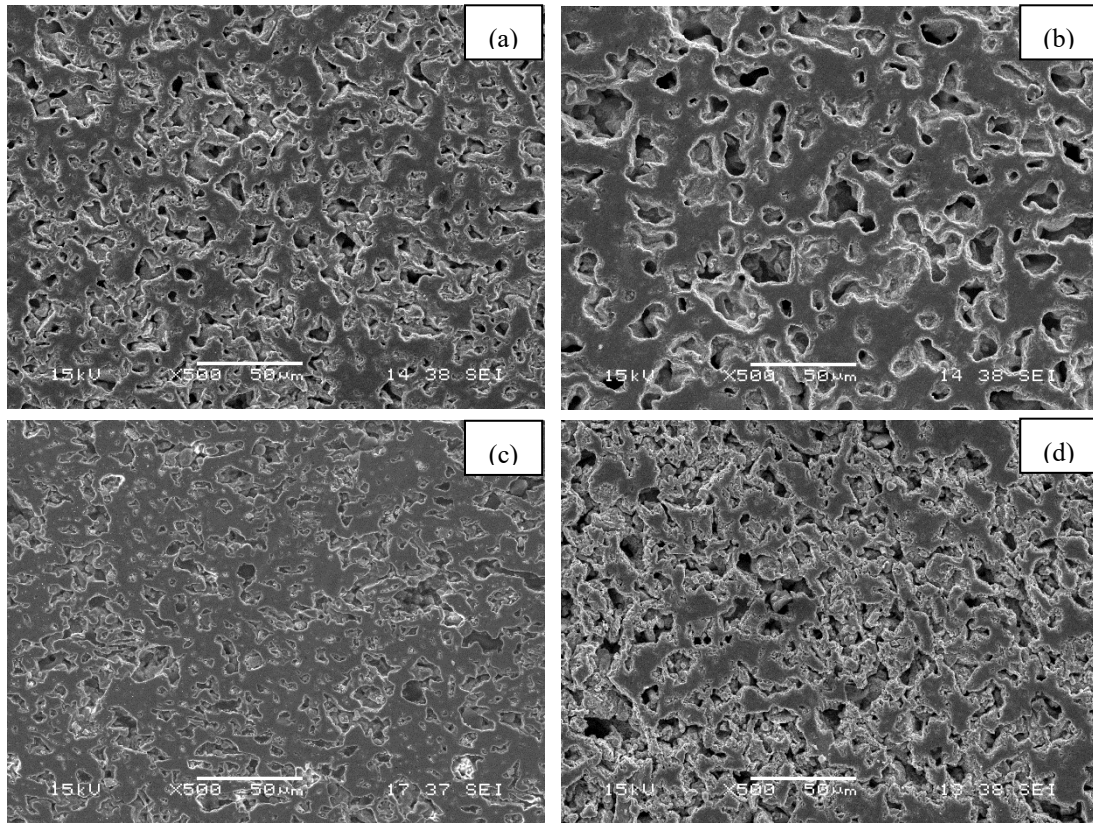
$$\text{Ti (s)} + \text{SiC (SPA)} \rightarrow [\text{ECAS – Sinterleme Prosesi}] \rightarrow \text{Gözenekli Ti} + \text{CO/CO}_2$$

Seramik parlatma atığının XRD (X-Ray Diffraksiyon) analizi Şekil 3 de verilmiştir. Alınan analize göre atıktaki kuvars ( $\text{SiO}_2$ ), albit ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) ve silisyum karbür ( $\text{SiC}$ ) fazlarının tespit edilmiştir. Kuvars ve albit, feldispat grubu mineraller olarak doğal kökenli bileşenler olup, parlatma işlemi sırasında işlenen seramik malzemelerin yapısal içeriğini yansıtabilir. Silisyum karbür ise yüksek sertlik ve aşındırıcı özellikleri nedeniyle parlatma sürecinde katkı malzemesi olarak kullanıldığına işaret etmektedir. Bu fazların varlığı, atığın yeniden kullanım potansiyelini değerlendirmede önemli olup, özellikle yapı malzemeleri, seramik gibi alanlarda ikincil hammadde olarak değerlendirilebileceğini de ortaya koymaktadır [38].



**Şekil 3.** Seramik parlatma atığının XRD analiz

Şekil 4’de toz elektrik akım sinterleme yöntemiyle elde edilen ağırlıkça %2, %5, %8 ve % 10 parlatma atığı katkılı Ti köpüklerin SEM görüntüleri sırası ile verilmiştir. Artan yüzde ile köpük, açık gözeneklere sahip daha homojen bir yapıya dönmüştür. Köpükteki gözenek morfolojisinin, küresel formda olmadığı geometrik formlarda olduğu görülmektedir. İlave edilen parlatma atığı morfolojisi ile benzer bir yapı sergilemektedir. Köpük gözenek yapısı yer tutucu parçacıkların seçilerek kolayca kontrol edilebildiği gösterilmiştir. Farklı boyut aralıklarında SPA parçacıkları kullanılarak köpükte özel olarak tasarlanmış bir gözenek boyutu dağılımı elde etmek de mümkündür. Gözeneklilik artan SPA ile %30 ile %40 arasında olduğu ön görülmekte ve bu nedenle, boşluk tutucu yöntemiyle %50 ile %80 arasında ayarlanabilir bir gözeneklilik elde edilebilirliğin mümkün olacağı sonucuna varılmıştır. %2, %5, %8 katkılı numunelerde porozite oluşumu numune genelinde olmamıştır. İlave edilen atık oranının yeterli olmadığı görüşüne varılmıştır.



**Şekil 4.** ECAS sonrası üretilen Ti köpük numunelerin SEM görüntüleri (a) %2 SPA katkılı, (b) %5 SPA katkılı, (c) %8 SPA katkılı, (d) %10 SPA katkılı

%10 oranında Seramik Parlatma Atığı (SPA) katkısı içeren titanyum esaslı köpük malzemede elde edilen 2,95 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk değeri, yaklaşık 4,5 g/cm<sup>3</sup> [19] yoğunluğa sahip kompakt saf titanyum ile karşılaştırıldığında, malzemenin oldukça yüksek bir gözeneklilik oranına sahip olduğunu göstermektedir. Bu değer, teorik yoğunluğun yalnızca küçük bir yüzdesinin korunabildiğini ve yapının büyük oranda açık ve/veya kapalı gözeneklerden oluştuğunu ortaya koymaktadır. Söz konusu düşük yoğunluk, köpükleşme mekanizmasının etkin bir şekilde gerçekleştiğini ve katkı malzemesi olan SPA'nın, gaz oluşumu ya da eriyik faz viskozitesi üzerinde etkili olarak gözenek oluşumunu teşvik ettiğini göstermektedir. SPA'nın bünyesinde SiC'in oksidasyonu sonucu oluşan CO/CO<sub>2</sub> gazlarının köpük yapının gelişimine katkı sağlamasına olanak tanımaktadır. SPA katkısının aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik açısından endüstriyel atıkların yeniden değerlendirilmesine katkı sağlaması, bu yaklaşımı sadece malzeme mühendisliği açısından değil, aynı zamanda döngüsel ekonomi bağlamında da değerli kılmaktadır. Sonuç olarak, %10 SPA katkısı ile üretilen titanyum esaslı köpüklerde gözlenen 2,95 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk, hem malzemenin fonksiyonel hafiflik özelliklerine işaret etmekte hem de katkı malzemesinin köpükleşme davranışı üzerindeki etkisini açıkça ortaya koymaktadır.



#### 4. Sonuçlar

Çalışmada, seramik parlatma atığı tozlarının kullanımı ile metal köpük üretimi hedeflenmiştir. Hedeflenen gözenek yapısı mikro yapısal bütünlüğü ile fonksiyonel özellikleri için dengeli bir optimizasyon sağlanmıştır.

- ✓ Seramik parlatma atığı (SPA) katkı oranının artırılmasıyla birlikte, titanyum köpüklerin gözenek yapısında belirgin bir homojenleşme sağlanmış, açık gözenek oranı artmış gözenek morfolojisinin, yer tutucu partikül formuyla uyumlu şekilde, kontrollü biçimde şekillendirilebildiği gözlemlenmiştir. Bu doğrultuda, sinterleme süreci sırasında SPA içeriğinde yer alan SiC'in oksidatif bozunması sonucu oluşan CO ve CO<sub>2</sub> gazlarının titanyum matris içerisinde hapsediği ve bunun da gözenek oluşumunu tetikleyerek köpük yapının gelişiminde doğrudan etkili olduğu sonucuna varılmıştır.
- ✓ Artan oranlarda kullanılan seramik parlatma atığının, Ti köpük üretim sürecinde gözenek oluşumunu etkin biçimde desteklediği, bu atığın titanyum esaslı gözenekli malzemelerde sürdürülebilir ve etkili bir katkı malzemesi olarak değerlendirilebileceğini göstermektedir.
- ✓ %10 SPA katkılı köpükte elde edilen 2,95 g/cm<sup>3</sup> yoğunluk, saf Ti'nin teorik yoğunluğu olan 4,50 g/cm<sup>3</sup> ile karşılaştırıldığında, yaklaşık %34,4 oranında bir gözeneklilik elde edildiğini göstermektedir. Bu sonuç, hedeflenen düşük yoğunluklu yapıların üretiminde SPA katkısının etkili bir köpükleştirici unsur olarak işlev gördüğünü sayısal olarak da ortaya koymaktadır. Bu bulgular, SPA katkısının yalnızca gözeneklilik oranını artırmakla kalmayıp aynı zamanda hedeflenen yoğunluk aralığında kontrollü köpük yapılar elde edilmesini mümkün kıldığını ve bu sayede fonksiyonel uygulamalara yönelik özelleştirilebilir malzeme tasarımına olanak sunduğunu göstermektedir.
- ✓ %10 SPA katkısı ile elde edilen yaklaşık %34,4 porozite, hedeflenen gözeneklilik seviyelerine ulaşmada önemli bir eşik olarak değerlendirilmiş ve bu katkı oranının, köpük yapının istenen yoğunluk ve porozite aralığına yönlendirilmesinde etkili bir yol gösterici olduğu anlaşılmıştır. Bu doğrultuda, çalışmanın ilerleyen aşamalarında daha yüksek SPA oranlarının uygulanmasıyla gözenekliliğin %50'nin üzerine çıkarılması hedeflenmekte olup, malzemenin yapısal özelliklerinin bu artışa bağlı olarak nasıl değişeceği detaylı şekilde araştırılacaktır.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Sakarya Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvar altyapısı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Atık toz temini Kütahya Seranit Fabrikası tarafından gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, araştırmanın yürütülmesinde sağlanan destek nedeniyle Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (BAP) ve proje numarası 2024-26-62-119 ile verilen dolaylı teşekkür ederiz.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar bu çalışmada çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir. Çalışma, tüm yazarların katkılarıyla yazılmıştır.

### Araştırma ve Yayın Etiği Beyanı

Yazarlar, çalışmanın tüm süreçlerinde *International Journal of Pure and Applied Sciences* dergisinin bilimsel, etik ve atıf kurallarına uyduklarını beyan etmişlerdir.

### Kaynaklar

- [1] P.T. Nivala, S.P. James, "Metal open-cell foams with periodic topology fabricated by spark plasma sintering," *Materialia*, vol. 8, 2019, doi:10.1016/j.mtla.2019.100428.
- [2] Y. Zhang, R. Liu, C. Liu, Y. Zhang, L. Yan, J. Jiang, E. Liu, F. Xu, "Metal foams for the interfering energy conversion: Electromagnetic wave absorption, shielding, and sound attenuation," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 215, pp. 258–282, 2025, doi:10.1016/j.jmst.2024.06.054.
- [3] F.S. Damanik, G. Lange, "Influence of MWCNT coated nickel on the foaming behavior of MWCNT coated nickel reinforced AlMg4Si8 foam by powder metallurgy process," *Metals* vol. 10, pp. 1–9, 2020, doi:10.3390/met10070955.
- [4] Ş. Eldemir, Ö. Üyesi, O. Erdem, "Metalik köpükler ve uygulama alanları," *Malzeme Bilimleri Dergisi* vol. 2, pp. 91–101, 2023.
- [5] T. Wang, L. Liu, Z. Liu, K. Wang, R. Yao, X. Yao, R. Hang, "Characterization, mechanical property, degradation behavior, and osteogenic activity of Zn–Mn alloy foam prepared by electrodeposition," *Acta Metallurgica Sinica*, May 2025, doi:10.1016/j.mtla.2019.100428(2025).
- [6] S. Mardani, V. Aghabalaei, M. Baghdadi, A. Torabian, B.A. Goharrizi, "Application of Cu@Cu foam and RuO<sub>2</sub>@Ti for removal of nitrogen compounds and organic matters from non-standard treated municipal wastewater by continuous electrochemical process: Optimization and mechanism," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 191, pp. 523–539, 2024, doi:10.1016/j.psep.2024.09.002.
- [7] J. Xiao, Y. Yang, G.B. Qiu, Y.L. Liao, H. Cui, X.W. Lü, "Volume change of macropores of titanium foams during sintering," *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 25, pp. 3834–3839, 2015, doi:10.1016/S1003-6326(15)64029-8..
- [8] M. Hajizadeh, M. Yazdani, S. Vesali, H. Khodarahmi, T. Mirzababaie Mostofi, "An experimental investigation into the quasi-static compression behavior of open-cell aluminum foams focusing on controlling the space holder particle size," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 70, pp. 193–204, 2021, doi:10.1016/j.jmapro.2021.08.043.
- [9] Q. Li, W. Yang, C. Liu, D. Wang, J. Liang, "Correlations between the growth mechanism and properties of micro-arc oxidation coatings on titanium alloy: Effects of electrolytes," *Surface Coatings Technology*, vol. 326, pp. 162–170, 2017, doi:10.1016/j.surfcoat.2017.03.021.
- [10] P. Ji, B. Chen, B. Li, Y. Tang, G. Zhang, X. Zhang, M. Ma, R. Liu, "Influence of Nb addition on microstructural evolution and compression mechanical properties of Ti–Zr alloys," *Journal of Materials Science & Technology*, vol. 69, pp. 7–14, 2021, doi:10.1016/j.jmst.2020.03.092.
- [11] E. Yılmaz, A. Gökçe, F. Findik, and H. O. Gulsoy, "Metallurgical properties and biomimetic HA

- deposition performance of Ti-Nb PIM alloys,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 746, pp. 301–313, 2018, doi:10.1016/j.jallcom.2018.02.274.
- [12] S. K. Yazici, F. Muhaffel, and M. Baydogan, “Effect of incorporating carbon nanotubes into electrolyte on surface morphology of micro arc oxidized Cp-Ti,” *Applied Surface Science*, vol. 318, pp. 10–14, 2014, doi:10.1016/j.apsusc.2013.11.137.
- [13] E. M. Saeed, N. M. Dawood, and S. F. Hasan, “Improvement corrosion resistance of Ni-Ti alloy by TiO<sub>2</sub> coating and hydroxyapatite/TiO<sub>2</sub> composite coating using micro arc oxidation process,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 42, pp. 2789–2796, 2021, doi:10.1016/j.matpr.2020.12.723.
- [14] S. Guan, M. Qi, Y. Li, and W. Wang, “Morphology evolution of the porous coatings on Ti-xAl alloys by Al adding into Ti during micro-arc oxidation in Na<sub>2</sub>B<sub>4</sub>O<sub>7</sub> electrolyte,” *Surface and Coatings Technology*, vol. 395, 2020, doi:10.1016/j.surfcoat.2020.125948.
- [15] E. Yang, R. Yang, W. Wei, Q. Mo, F. Liang, D. Li, and W. Li, “Corrosion resistance and antibacterial properties of hydrophobic modified Ce-doped micro-arc oxidation coating,” *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 29, pp. 3303–3316, 2024, doi:10.1016/j.jmrt.2024.02.052.
- [16] F. Cavilha Neto, V. Salinas-Barrera, C. Aguilar, W. Dal’Maz Silva, C. Binder, and A. N. Klein, “Highly porous CP-Ti foams manufactured with powder compaction, the space holder method and plasma-assisted sintering for biomedical applications,” *Materials Letters*, vol. 361, 2024, doi:10.1016/j.matlet.2024.136091.
- [17] I. M. Makena and M. B. Shongwe, “Effects of porosity on the corrosion behaviour of PM-fabricated titanium foams for biomedical applications,” *International Journal of Electrochemical Science*, vol. 19, 2024, doi:10.1016/j.ijoes.2024.100495.
- [18] I. García, M. Bayod, A. Conde, M. A. Arenas, J. Damborenea, A. Romero, and G. Rodríguez, “Concentrated Solar Energy sintering crossmark,” *Materials Letters*, vol. 185, pp. 420–423, 2016.
- [19] H. C. Hsu, S. K. Hsu, S. C. Wua, P. H. Wang, and W. F. Ho, “Design and characterization of highly porous titanium foams with bioactive surface sintering in air,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 575, pp. 326–332, 2013, doi:10.1016/j.jallcom.2013.05.186.
- [20] X. Ma, C. He, Y. Yan, J. Chen, H. Feng, J. Hu, H. Zhu, and Y. Xia, “Energy-efficient electrochemical degradation of ciprofloxacin by a Ti-foam/PbO<sub>2</sub>-GN composite electrode: Electrode characteristics, parameter optimization, and reaction mechanism,” *Chemosphere*, vol. 315, 2023, doi:10.1016/j.chemosphere.2023.137739.
- [21] A. Abhash, P. Singh, V. A. N. Ch, S. Sathaiah, R. Kumar, G. K. Gupta, and D. P. Mondal, “Study of newly developed Ti–Al–Co alloys foams for bioimplant application,” *Materials Science and Engineering: A*, vol. 774, 2020, doi:10.1016/j.msea.2020.138910.
- [22] A. Hassani, A. Habibolahzadeh, and H. Bafti, “Production of graded aluminum foams via powder space holder technique,” *Materials & Design*, vol. 40, pp. 510–515, 2012, doi:10.1016/j.matdes.2012.04.024.
- [23] H. Bafti and A. Habibolahzadeh, “Production of aluminum foam by spherical carbamide space holder technique-processing parameters,” *Materials & Design*, vol. 31, pp. 4122–4129, 2010, doi:10.1016/j.matdes.2010.04.038.

- [24] P. Siegkas, N. Petrinic, and V. L. Tagarielli, "Measurements and micro-mechanical modelling of the response of sintered titanium foams," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 57, pp. 365–375, 2016, doi:10.1016/j.jmbbm.2016.02.024.
- [25] D. P. Mondal, J. D. Majumder, N. Jha, A. Badkul, S. Das, A. Patel, and G. Gupta, "Titanium-cenosphere syntactic foam made through powder metallurgy route," *Materials & Design*, vol. 34, pp. 82–89, 2012, doi:10.1016/j.matdes.2011.07.055.
- [26] L. Pérez, S. Lascano, C. Aguilar, D. Domancic, and I. Alfonso, "Simplified fractal FEA model for the estimation of the Young's modulus of Ti foams obtained by powder metallurgy," *Materials & Design*, vol. 83, pp. 276–283, 2015, doi:10.1016/j.matdes.2015.06.038.
- [27] N. Jha, D. P. Mondal, J. D. Majumdar, A. Badkul, A. K. Jha, and A. K. Khare, "Highly porous open cell Ti-foam using NaCl as temporary space holder through powder metallurgy route," *Materials & Design*, vol. 47, pp. 810–819, 2013, doi:10.1016/j.matdes.2013.01.005.
- [28] A. Ayday and M. Durman, "Effect of different surface-heat-treatment methods on the surface properties of AISI 4140 steel," *Materials and Technology*, vol. 48, 2014.
- [29] G. Li, Y. Wang, L. Qiao, R. Zhao, S. Zhang, R. Zhang, C. Chen, X. Li, and Y. Zhao, "Preparation and formation mechanism of copper incorporated micro-arc oxidation coatings developed on Ti-6Al-4V alloys," *Surface and Coatings Technology*, vol. 375, pp. 74–85, 2019, doi:10.1016/j.surfcoat.2019.06.096.
- [30] Y. Zhang, G. R. Ma, X. C. Zhang, S. Li, and S. T. Tu, "Thermal oxidation of Ti-6Al-4V alloy and pure titanium under external bending strain: Experiment and modelling," *Corrosion Science*, vol. 122, pp. 61–73, 2017, doi:10.1016/j.corsci.2017.01.009.
- [31] C. T. Guerrero, I. A. Figueroa, M. F. Azamar, T. E. Soto, L. E. Carranza, C. Reyes, and I. Alfonso, "A study on syntactic aluminum foams manufactured infiltrating sintered preforms of iron hollow spheres," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 323, 2024, doi:10.1016/j.matchemphys.2024.129656.
- [32] N. I. Hafiz, M. A. Islam, and S. Saha, "Characterization of synthesized nickel foam using ammonium hydrogen carbonate as space holder," *Results in Engineering*, vol. 24, 2024, doi:10.1016/j.rineng.2024.103634.
- [33] S. Sathaiah, R. Dubey, A. Pandey, N. R. Gorhe, T. C. Joshi, V. Chilla, D. Muchhala, and D. P. Mondal, "Effect of spherical and cubical space holders on the microstructural characteristics and its consequences on mechanical and thermal properties of open-cell aluminum foam," *Materials Chemistry and Physics*, vol. 273, 2021, doi:10.1016/j.matchemphys.2021.125115.
- [34] J. Rivard, V. Brailovski, S. Dubinskiy, and S. Prokoshkin, "Fabrication, morphology and mechanical properties of Ti and metastable Ti-based alloy foams for biomedical applications," *Materials Science and Engineering: C*, vol. 45, pp. 421–433, 2014, doi:10.1016/j.msec.2014.09.033.
- [35] M. S. Bernardo, T. Jardiel, A. C. Caballero, M. Bram, J. Gonzalez-Julian, and M. Peiteado, "Electric current activated sintering (ECAS) of undoped and titanium-doped BiFeO<sub>3</sub> bulk ceramics with homogeneous microstructure," *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 39, pp. 2042–2049, 2019, doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2019.01.045.



- 
- [36] Y. Garip and O. Ozdemir, “A study of the cycle oxidation behavior of the Cr/Mn/Mo alloyed Ti–48Al–based intermetallics prepared by ECAS,” *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 818, 2020, doi:10.1016/j.jallcom.2019.152818.
- [37] A. Erdogan, T. Yener, and S. Zeytin, “Fast production of high entropy alloys (CoCrFeNiAlxTiy) by electric current activated sintering system,” *Vacuum*, vol. 155, pp. 64–72, 2018, doi:10.1016/j.vacuum.2018.05.027
- [38] D. Kırsever, H. Ö. Toplan, and A. Ş. Demirkıran, “Effect of porcelain polishing waste additive on properties and corrosion resistance of ceramic foams produced from zeolite,” *Journal of the Australian Ceramic Society*, vol. 59, pp. 671–683, 2023, doi:10.1007/s41779-023-00865-z.