

Araştırma Makalesi / Research Article

YSZ Seramik Üst Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Katı Partikül Erozyon (SPE) Davranışlarının İncelenmesi

Derviş ÖZKAN<sup>1\*</sup>, Garip ERDOĞAN<sup>2</sup>, Yasin ÖZGÜRLÜK<sup>3</sup>, Gülfem BİNAL<sup>4</sup>,  
Sefa Erdem YILMAZ<sup>5</sup>, Abdullah Cahit KARAOĞLANLI<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4978-290X>, [dervisozkan@bartin.edu.tr](mailto:dervisozkan@bartin.edu.tr)

<sup>2</sup> Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3924-9984>, [gerdogan@sakarya.edu.tr](mailto:gerdogan@sakarya.edu.tr)

<sup>3</sup> Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler Bölümü, Optisyenlik Programı, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-1121-5018>, [yozgurluk@bartin.edu.tr](mailto:yozgurluk@bartin.edu.tr)

<sup>4</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4750-8787>, [gbinal@bartin.edu.tr](mailto:gbinal@bartin.edu.tr)

<sup>5</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-6560-2454>, [sefaerdemylmaz@gmail.com](mailto:sefaerdemylmaz@gmail.com)

<sup>6</sup> Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bartın, Türkiye, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1750-7989>, [karaoglanli@bartin.edu.tr](mailto:karaoglanli@bartin.edu.tr)

Geliş/ Received: 14.01.2023;

Kabul / Accepted: 26.02.2023

**ÖZET:** Gaz türbin motorları servis kullanım koşulları altında farklı birçok hasar mekanizmasına maruz kalmaktadır. Bunlardan birisi de yabancı madde hasarı (FOD) ve diğer yabancı partiküllerin (volkan küller vb.) oluşturduğu yüzey üzerinde meydana gelen hasar yapılarıdır. Bu durumlara bağlı olarak türbin bileşenlerini oluşturan türbin bıçağı ve kanatçık gibi komponentlerde dökülme ve pullanarak kalkma gibi hasar oluşumları meydana gelmektedir. Belirtilen partiküllerin yüksek hızlarda ve farklı açılarda malzeme yüzeyine tekrarlı çarpması sonucunda katı partikül erozyon (SPE) hasarları meydana gelmektedir. Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY bağ ve yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) içeriğine sahip seramik üst kaplamalar atmosferik plazma sprey (APS) püskürtme yöntemi kullanılarak üretilmiştir. Üretilen termal bariyer kaplama (TBC) sistemindeki SPE sonucu oluşan mikroyapısal ve yüzey üzerindeki oluşum gösteren değişimler incelenmiştir. SPE testleri alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) partiküllerinin kullanılmasıyla literatürde yaygın olarak çalışılmayan 25°, 50° ve 75°'lik püskürtme açılarında çalışılmış ve bu açılarda yapılan erozif aşınma testlerinde ortaya çıkan hasar mekanizmaları ve erozif aşınma oranı ayrıntılı olarak incelenmiştir. TBC kaplamalı numunelerde en yüksek erozyon oranı 50°'lik çarpma açısında gerçekleşirken bu değeri sırasıyla 75° ve 25°'lik çarpma açısı takip etmiştir. Çalışmalarda

\*Sorumlu yazar / Corresponding author: [dervisozkan@gmail.com](mailto:dervisozkan@gmail.com)

Bu makaleye atıf yapmak için /To cite this article

Özkan, D., Erdoğan, G., Özgürlük, Y., Binal, G., Yılmaz, S.E., Karaoğlanlı, A.C. (2023). YSZ Seramik Üst Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Katı Partikül Erozyon (SPE) Davranışlarının İncelenmesi. Journal of Materials and Mechatronics: A (JournalMM), 4(1), 100-115.

gerçekleştirilen alansal pürüzlülük ölçümlerinde erozyon oranlarının alansal pürüzlülük değerleri ile doğru orantılı olduğu görülmüştür. En yüksek alansal pürüzlülük değerlerinin 50°'lik çarpma açısında oluşum gösterdiği görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Süper alaşım, CoNiCrAlY, Yttriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ), Termal bariyer kaplama (TBC), Hasar mekanizması, Katı partikül erozyonu (SPE).

## **Investigation of Solid Particle Erosion (SPE) Behaviors of Thermal Barrier Coatings (TBCs) with YSZ Ceramic Top Coating**

**ABSTRACT:** Under operating conditions, gas turbine engines are subjected to a wide range of damage mechanisms. One of them is foreign object damage (FOD) and damage structures that occur on the surface formed by other foreign particles (volcanic ash etc.). Depending on these situations, damage formations such as spalling and flaking occur in components such as turbine blades and fins that comprise the turbine components. Solid-particle erosion (SPE) damages occur as a result of the repeated impact of the specified particles on the material surface at high speeds and at different angles. In this study, a CoNiCrAlY bond coat and ceramic top coat with yttria stabilized zirconia (YSZ) content on an Inconel 718 superalloy substrate were produced using the atmospheric plasma spray (APS) spraying method. Microstructural and surface changes resulting from SPE in the produced thermal barrier coating (TBC) system were investigated. Using alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) particles, SPE tests were done at impact angles of 25°, 50° and 75°, which are not commonly studied in the literature. The damage mechanisms and erosive wear rates that occurred in the tests conducted at these angles were examined in detail. While the highest erosion rate in TBC coated samples occurred at an impact angle of 50°, this value was followed by those of 75° and 25°, respectively. In the areal roughness measurements carried out in the studies, it was seen that the erosion rates were directly proportional to the areal roughness values. It has been observed that the highest areal roughness values occur at an impact angle of 50°.

**Keywords:** Super alloy, CoNiCrAlY, Yttria-stabilized zirconia (YSZ), Thermal barrier coating (TBC), Failure mechanism, Solid particle erosion (SPE).

### **1. GİRİŞ**

TBC'ler, kritik türbin motoru parçalarını (kanatlar, yanma odaları, vb.) yüksek sıcaklıklardan ve agresif servis koşullarından korumak amacıyla uzun yıllardır kullanılmaktadır (Golewski ve ark., 2019). TBC'ler, sıcak gaz akışı ile metalik altlık arasında bir yalıtım tabakası sağlayarak gaz türbini motorlarının çalışma sıcaklıklarının artmasını sağlar. Ayrıca motorların sıcak bölümlerinin ömrünü uzatmanın yanı sıra özgül yakıt tüketimini de iyileştirirler (Shin ve ark., 2018). TBC'ler genellikle; seramik üst kaplama (genellikle ağırlıkça %6–8 YSZ, MCrAlY (M=Ni ve/veya Co) ve bu iki tabaka arasına nüfuz eden oksijen ve ısı etkisiyle zamanla oluşan TG) olarak adlandırılan üç katmandan oluşur (Özkan, 2022). YSZ ile altlık malzemenin ısıl genleşme katsayılarındaki farklılıktan kaynaklanan uyumsuzluğu, sünek malzeme özelliği göstererek ortadan kaldırmak bağ kaplamanın önemli bir görevidir (Demirci ve ark., 2022). YSZ, yüksek termal genleşme katsayısına, düşük termal iletkenliğe, alfa Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ile faz uyumluluğuna, yüksek erime noktasına ve büyük partikül darbelerinden ve darbe erozyonundan kaynaklanan hasara karşı iyi dirence sahip olduğundan, TBC üst kaplamalarda yaygın olarak kullanılan seramik bir malzemedir (Malvi ve ark., 2021). Son zamanlarda yapılan çalışmalar yüksek entropili alaşımların (HEAs) sahip oldukları üstün nitelikleri sonucuyla,

özellikle yüksek sıcaklık uygulamalarında TBC sistemlerinde alternatif bir malzeme olarak kullanılabilceğini göstermiştir (Özkan ve Karaoğlanlı, 2021). TBC sistemlerinde altlık malzemesini yüksek sıcaklıktaki korozyon ve oksidasyondan korumak için alev püskürtme, plazma püskürtme, soğuk püskürtme, yüksek hızlı oksijen yakıtı (HVOF) ve D-gun gibi çeşitli termal sprey püskürtme yöntemleri kullanılır (Binal, 2022; Parlakyiğit ve ark., 2020). TBC'ler genellikle APS ya da Elektron Işını Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) yöntemleri kullanılarak üretilmektedir. Biriktirme tekniğine göre farklı mikroyapısal morfolojiler, termal ve mekanik özellikler elde edilebilir. Tipik APS TBC'ler, ince yuvarlak mikro gözenekler, katmanlar arası gözenekler, transgranüler çatlaklar ve seramik splatların üst üste binmesinden oluşan gözenekler içeren bir mikro yapıya sahiptir (Karaoglanli, 2023, Cernuschi ve ark., 2016). Kullanım sırasında TBC'ler, oksidasyon, sıcak korozyon, termal şok, sinterleme etkisi, CMAS (CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>) etkisi ve aşınma gibi birçok hasar mekanizmasına maruz kalmaktadır. Bu hasar mekanizmaları, TBC sisteminin bütünlüğü ve mekanik özellikleri üzerinde olumsuz etkilere sahiptir (Karaoğlanlı ve ark., 2019; Özgürlük ve ark., 2018). SPE, özellikle kumlu ortamda çalışan gaz türbinlerinde kullanılan TBC'ler için birincil hasar mekanizmalarındandır (Wang ve ark., 2012). SPE, katıların, sıvıların, gazların veya bunların kombinasyonlarının çarpması nedeniyle metalik bir yüzeyin metal kaldırma veya bozunma mekanizmasıdır. Termik santrallerde, uçak motorlarının gaz türbinlerinde, uçak yapılarında, rafinerilerde ve petrokimya endüstrilerinde ciddi bir sorundur (Kumar ve ark., 2021). SPE, küçük katı partiküllerin bir gaz veya sıvı ortamda malzeme yüzeyine tekrarlayan etkileri nedeniyle malzemede yüzey kütle kaybına ve son olarak TBC'lerin parçalanmasına yol açan önemli bir husustur (Zhang ve ark., 2018). Hava araçlarının gaz türbinleri söz konusu olduğunda, kum ve volkanik küller ana aşındırıcı kaynakları iken, kara araçlarındaki gaz türbinleri söz konusu olduğunda, filtrelerden kaçan veya yanma odasında üretilen partiküller erozyondan sorumludur (Cemuschi ve ark., 2014). SPE, birim zamanda yüzeye çarpan partikül sayısı ve boyutu, çarpma açısı, partikül kinetik enerjisi, altlık malzeme özellikleri, atmosfer ve sıcaklıktan etkilenen bir hasar türüdür (Nomoto ve ark., 2017). SPE kaynaklı oluşacak hasarların önceden doğru bir şekilde tahmin edilmesi, TBC'lerin çalışma/servis ortam koşulları altındaki performansının ve kullanım ömürlerinin belirlenmesi, tamir ve bakım maliyetlerinin en aza indirilmesi hususunda önemli bir faktördür. Bu çalışmada, Inconel 718 altlık malzeme üzerine APS yöntemi kullanılarak MCrAlY metalik bağ ve YSZ seramik üst kaplama içeriğine sahip kaplamalar üretilmiştir. TBC sistemi Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülleri ile SPE deneylerine tabi tutulmuştur. Deneyler 25°-50°-75° partikül çarpma açılarında ve 1,5 bar püskürtme basıncında gerçekleştirilmiştir. Eroziyon aşınma testleri sonrasında taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve optik profilometre ile aşınma yüzeyleri incelenerek karakterize edilmiş ve tartışılmıştır.

## 2. MATERYAL VE YÖNTEM

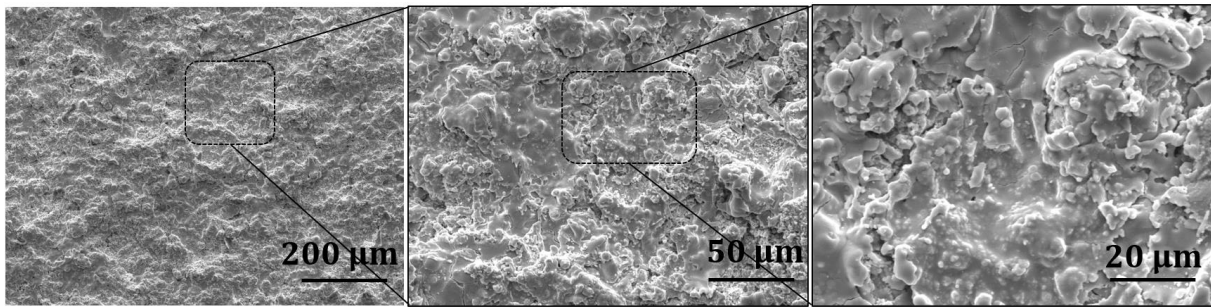
### 2.1 Deney Malzemeleri

SPE aşınma deneylerinde, altlık malzemesi olarak Inconel 718 süper alaşım seçilmiştir. Inconel 718, yüksek sürünme dayanımı ve korozyon direncine sahip, havacılık/uzay endüstrisinde yaygın olarak kullanılan nikel-krom esaslı bir alaşımdır. Silindir çubuklar halinde ticari olarak elde edilen Inconel 718 süper alaşım altlık malzemeler tel erozyon yöntemi kullanılarak 25,4 mm çapında ve 5,0 ± 0,6 mm kalınlıkta olacak şekilde kesilmiştir. Kaplama işlemleri öncesi altlık numunelerinin yüzeyleri belirli pürüzlülük değeri (Ra= 5,3 ± 0,7) erişmesi ve kaplamanın yapışma mukavemetinin daha iyi olması için kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Kumlama işleminde, altlık/hedef malzeme

yüzeyine ~60 cm'lik uzaklıktan yatayla yaklaşık 75°'lik açı oluşturacak şekilde ~2-2.5 bar değerindeki basınçlı hava yardımı ile Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları püskürtülmüştür. Kaplama süreçlerinin daha iyi yürütülebilmesine olanak sağlamak için, altlık malzeme yüzeyleri etil alkol ile ultrasonik temizleme yöntemi kullanılarak temizlenmiş ve kaplama işlemleri için hazırlanmıştır. Kaplama üretim parametreleri ise, sprej ekipmanı, literatür çalışmaları ve toz üretim firması tarafından sağlanan koşullar baz alınarak belirlenmiştir.

## 2.2 SPE Testleri

SPE test çalışmaları, özel olarak tasarlanmış test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan test düzeneği; ayarlanabilir numune fikstürü, nozul sabitleyici, basınçlı hava kompresörü ve elemanlarından oluşmaktadır. SPE aşınmasından önce alınan TBC numunelerinin SEM üst yüzey mikroyapı görüntüleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. TBC numunelerin SPE aşınma deneyleri öncesi üst yüzey SEM mikroyapı görüntüsü

Deneylerden sonra mikroyapısal karakterizasyonlar gerçekleştirilmiş ve TBC kaplamaların sergilemiş oldukları hasar davranışları incelenmiştir. Ayrıca, erozif aşınma sonrası numunelerin iz derinlikleri ve aşınmış ölçümleri 3D optik profilometre (Profil3D brand-USA) kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çizelge 1'de ise deneylerde kullanılan aşınma parametreleri verilmiştir. Deneylerde aşındırıcı partikül olarak 170-230 mesh boyut aralığında Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kullanılmıştır.

Çizelge 1. Katı partikül erozif aşınma deney parametreleri

Aşındırıcı partikül	Aşındırıcı partikül boyutu (µm)	Basınç (Bar)	Kütlesel debi (gr/sn)	Numune fikstür açısı (Derece)	Nozul mesafesi (mm)	Nozul çapı (mm)
Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	65-80	1,5	4,84	25 - 50 - 75	20	3

SPE deneylerinde numunelerin ağırlık tartımları ± 0,0001 mg hassasiyete sahip Kern & Sohn marka hassas terazi ile gerçekleştirilmiştir. Her deney öncesi numune yüzeyleri yüksek basınçlı hava ile temizlenmiş ve sonrasında aşınma oranları hesaplanmıştır. Numunelerin aşınma öncesi ağırlıkları (m<sub>1</sub>) tespit edildikten sonra deney sonrası tekrardan ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Deney öncesi ve deney sonrasında ölçülen deney numunesi ağırlıkları farkının aşındırıcı partikülün kütleli debisine ( $\dot{m}$ ) ve zamana ( $t$ ) bölünmesi neticesinde katı partikül erozif aşınma oranı ( $E$ ) hesaplanmıştır.

$$E = \frac{(m_1 - m_2)}{\dot{m} \times t}$$

Kütlesel debiyi hesaplayabilmek için aşındırma süresince harcanan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> miktarının tespit edilmesi gerekmektedir. Bu durumu gerçekleştirebilmek amacıyla kullanılmış Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozlarının biriktirebileceği bir hazne deney düzeneği tasarımına eklenmiştir. Gerçekleştirilen tüm deneyler sonrası biriktirilen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları hassas terazi yardımı ile tartılmıştır. Deneylerde 145,2 gr Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu kullanılmıştır. Kullanılan toz miktarını deney parametreleri aynı olduğu için deney sayısına bölerek her deney için kullanılan ortalama toz miktarı elde edilmiştir.

$$\dot{m} = \frac{m}{t}$$

Yukarıda verilen formüle göre  $\dot{m}$ = kütlesel debi (gr/sn),  $m$ = püskürtülen Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerin ağırlığı (gr) ve  $t$ = püskürtme zamanını (s) ifade etmektedir.

### 3. BULGULAR VE TARTIŞMA

#### 3.1. Kaplama Tozları ve Karakterizasyonları

Inconel 718 süper alaşım altlık malzemelerin metalik bağ kaplamaları MCrAlY (CoNiCrAlY, Oerlikon Amdry 9951) içeriğine sahip metalik tozları kullanılarak üretilmiştir. Ticari olarak elde edilen bağ kaplama tozları 38,5Co-32Ni-21Cr-8Al-0.5Y (%ađ.) kimyasal bileşime sahiptir. Çizelge 2’de TBC üretimlerinde kullanılacak olan CoNiCrAlY metalik bağ kaplama tozlarına ait özellikler ayrıntılı olarak verilmiştir.

Çizelge 2. CoNiCrAlY metalik toz kaplama malzemesine ait özellikler

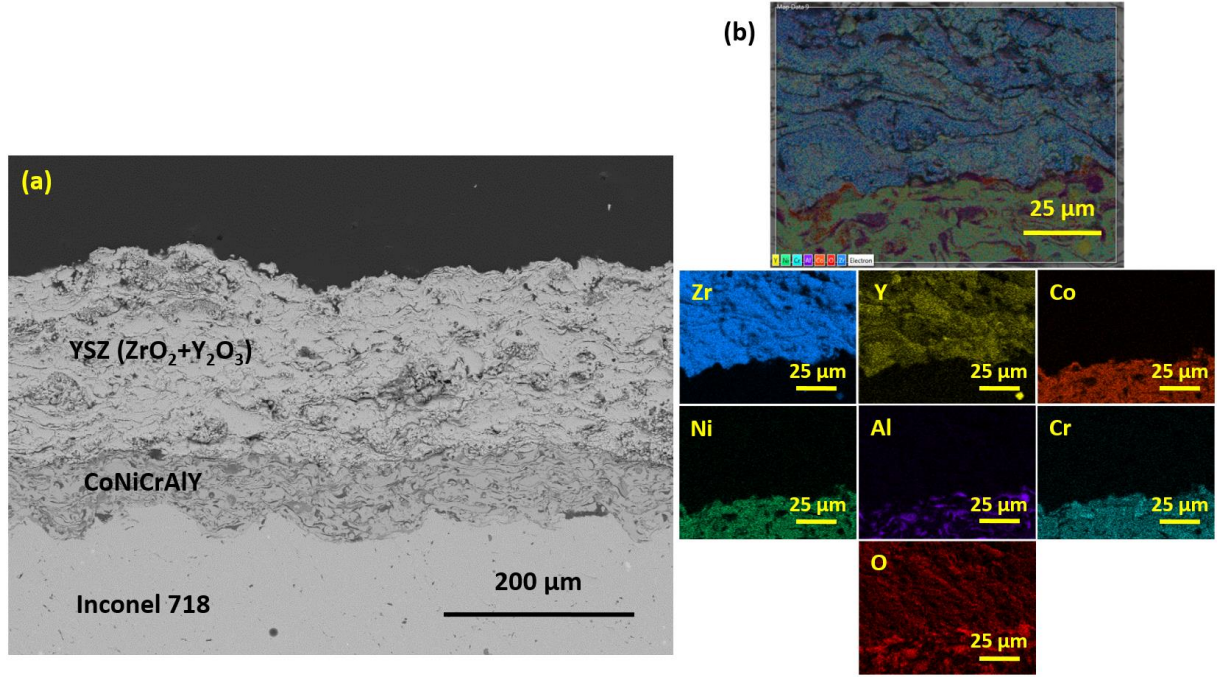
Toz kompozisyonu	Toz şekli	Üretim şekli	Üretici firma
CoNiCrAlY	Sferoidal (küremsi)	Gaz atomizasyon	Sulzer Metco

Toz ve altlık malzemelerin mikroyapısal karakterizasyon işlemleri Bartın Üniversitesi’nde bulunan MAIA3 XMU TESCAN marka SEM cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Seramik üst kaplamaların üretiminde ticari YSZ (GTV) kaplama toz malzemesi kullanılmıştır. Bağ kaplama tozlarının ortalama partikül boyut dağılımı Microtrack S3500 cihazı kullanılarak ölçülmüş ve (D50) değeri 30,78 µm olarak belirlenmiştir. Bağ kaplama üretiminde kullanılan CoNiCrAlY tozlarının kimyasal kompozisyonu Çizelge 3’de verilmiştir.

Çizelge 3. CoNiCrAlY tozun kimyasal kompozisyonu

Ürün Kodu	Partikül boyutu	Kimyasal kompozisyon (ađ. %)				
		Co	Ni	Cr	Al	Y
Oerlikon, Amdry 9951	5,6-39 µm	Kalan	29-35	18-24	5-11	0,1-0,8

TBC numuneleri bağ kaplama tabaka kalınlığı ~100 µm ± 20 µm ve YSZ seramik üst kaplama tabaka kalınlığı ~300 µm ± 40 µm olacak şekilde üretilmiştir (Şekil 2).



Şekil 2. SPE aşınma deneylerinde kullanılan TBC mikroyapısı: (a) APS yöntemiyle üretilmiş TBC numunesinin SEM ara yüzey kesit mikroyapı görüntüsü ve (b) TBC numunesine ait ara yüzey SEM elementel haritalama analizi

Üst kaplama malzemesi olarak YSZ seramik tozları kullanılmıştır. Üst kaplamaya ait malzeme özellikleri Çizelge 4’de verilmiştir.

Çizelge 4. YSZ üst kaplamaya ait sprej ve toz malzeme özellikleri

Kaplama türü	Sprej tabancası		Toz malzeme özellikleri	
	Teknik	Firma	Toz	Partikül boyutu (μm)
Üst kaplama	APS	F6-GTV Germany	ZrO <sub>2</sub> -8% Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-45+20

Katı partikül erozif aşınma deneylerinde kullanılan TBC numunelerin bağ ve üst kaplama kullanılan APS parametreleri Çizelge 5’de verilmiştir.

Çizelge 5. CoNiCrAlY bağ ve YSZ kaplamalara ait püskürtme parametreleri

APS-Bağ Kaplama						
Ark akımı	Elektriksel güç	Argon akış oranı	Hidrojen akış oranı	Toz besleme oranı	Kaplama Mesafesi	
550-600 A	35-40 kW	55-65 slpm	15 slpm	20-30 g/dk	150 mm	
APS-Üst Kaplama						
Ark akımı	Elektriksel güç	Argon akış oranı	Hidrojen akış oranı	Toz besleme oranı	Ark voltajı	Kaplama Mesafesi
600-650 A	35-40 kW	40-50 slpm	14 slpm	20-30 g/dk	65V	100 mm

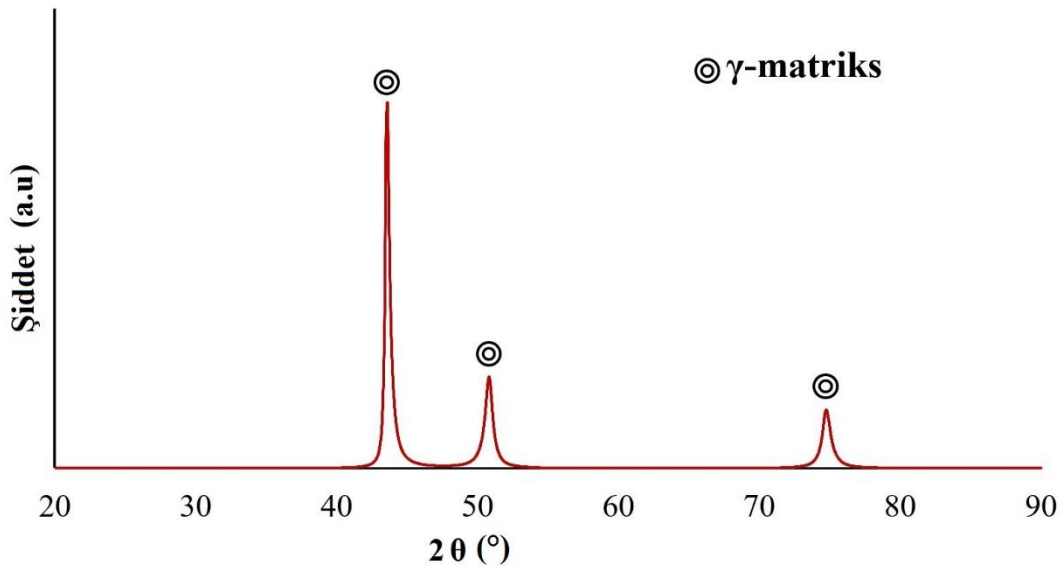
Atmosfere açık olarak gerçekleştirilmesi ve üretim sıcaklığının yüksek olmasından dolayı APS yöntemi ile üretilen TBC kaplamalar yoğun miktarda porozite, mikro çatlak ve oksit içermektedir.

Porozite ölçümlerinde önce TBC numunelerinden beşer adet mikroyapı resimleri alınmıştır. Ardından Image J analiz programı yardımıyla porozite yüzdeleri belirlenmiştir. Çizelge 6'da bağ ve üst kaplamaların porozite ölçüm sonuçları verilmiştir.

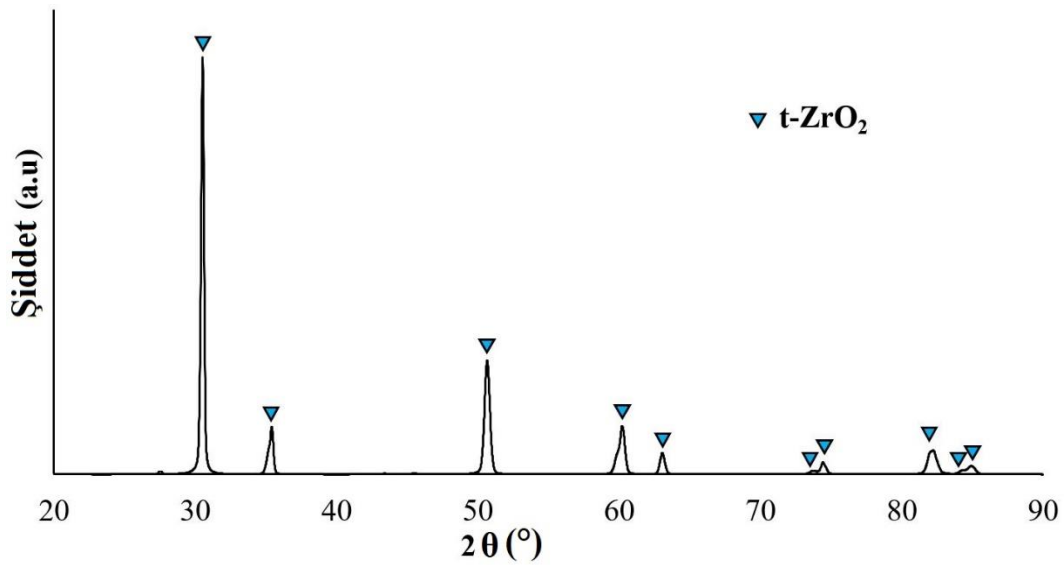
Çizelge 6. APS tekniği ile üretilmiş kaplamaların porozite değerleri

Malzeme	Bağ kaplama porozite oranı (%)	Üst kaplama porozite oranı (%)
APS-TBC	$5,0 \pm 1,5$	$8,0 \pm 2,0$

Şekil 3 ve Şekil 4'de APS tekniği kullanılarak üretilen bağ ve üst kaplamalara ait XRD analiz sonuçları verilmiştir. Bağ kaplamanın XRD analizinde,  $\gamma$  matriks fazı, üst kaplamanın XRD analizinde ise tetragonal  $ZrO_2$  fazı tespit edilmiştir.



Şekil 3. APS bağ kaplamalara ait XRD analizi sonucu



Şekil 4. YSZ kaplamalara ait XRD analizi sonucu

### 3.2. TBC'lerin SPE Aşınma Davranışları

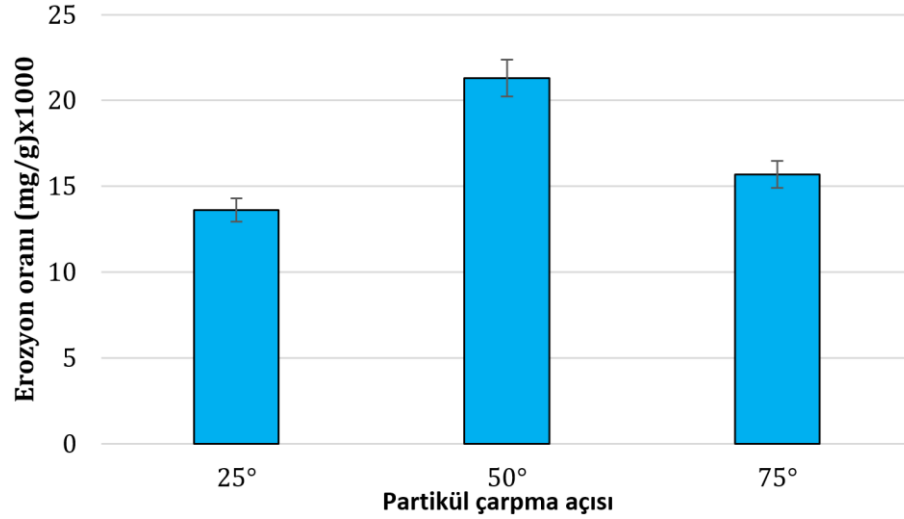
TBC sistemine ait SPE deneyleri öncesi ve sonrası ağırlıkları, oluşan ağırlık kayıpları ve erozyon oranlarını içeren bilgiler Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. TBC'lerin SPE deneyleri sonrası malzeme kaybı ve aşınma oranları

Altlık ve kaplama türü				Ağırlık kayıpları ve erozyon oranları			
Altlık	Bağ kaplama	Üst kaplama	Çarpma açısı	m <sub>1</sub> (g)	m <sub>2</sub> (g)	Δm (g)	Erozyon oranı (E = (m <sub>1</sub> - m <sub>2</sub> / m × t)×1000)
Inconel 718	CoNiCrAlY	YSZ	25°	4,03	4,01	0,01	0,280
			50°	3,61	3,58	0,02	0,440
			75°	3,38	3,36	0,01	0,324

Şekil 5'de SPE deneylerinin gerçekleştirilme açıları ve erozyon oranları ilişkisi verilmektedir. 50°'de gerçekleştirilen deney sonuçlarında maksimum erozyon aşınma oranı tespit edilmiştir. Bu durum yüzey doyurma oranı ve partiküllerin deformasyon korelasyonu ile ilişkilidir. 50°'de gerçekleştirilen erozif aşınma oranını sırasıyla 75°'de ve 25°'de gerçekleştirilen deneyler sonrası meydana gelen erozyon oranları takip etmektedir. Partikül çarpma açısının, malzemelerin erozyon davranışı için en önemli parametrelerden biri olduğu bilinmektedir. Erozyon oranlarının çarpma açısına bağlı olarak sergilediği davranışlar sünek veya kırılğan olarak nitelendirilirler. Sünek yüzey özellikleri sergileyen malzemelerin düşük çarpma açıları (15°–30°) en yüksek erozyon hasarları ile karşılaştığı bilinmektedir. Gevrek yüzey özellikleri sağlayan malzemeler ise yüksek çarpma açıları (60°–90°) maksimum erozyon oranlarına ulaşırlar. Yarı sünek yüzey özelliklerine sahip malzemeler ise, 45°–60° çarpma açıları en yüksek erozyon oranlarına ulaştığı bilinmektedir (Chowdhury ve ark., 2016). Gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası erozyon oranları incelendiğinde TBC numunelerinin yarı sünek yüzey özellikleri sergilediği tespit edilmiştir. Buna istinaden 50°'lik partikül çarpma açısında gerçekleştirilen SPE deneylerinde en yüksek erozyon oranlarına ulaşılmıştır. Essa vd. APS yöntemini kullanarak Inconel 718 altlık malzeme üzerine YSZ üst kaplama ve CoNiCrAlY bağ kaplamadan oluşan TBC'ler üretmişlerdir. TBC kaplamaları oda sıcaklığında SPE aşınması deneylerine tabi tutmuşlardır. SPE deneylerini farklı partikül çarpma açısı (30°, 45°, 60°, 90°) gerçekleştirmişlerdir. SPE oranı ve partikül çarpma açısı arasındaki korelasyonu çarpma açısı büyüdükçe erozyon oranında artış gözlemlendiği şeklinde kurmuşlardır. Bununla birlikte yüksek çarpma hızlarında da SPE oranında artış olduğunu tespit etmişlerdir (Essa ve ark., 2021). Zhao vd. GH356 Ni bazlı süper alaşım altlık malzeme üzerine APS yöntemi kullanarak geleneksel olmayan çift katmanlı La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/YSZ TBC üretmişlerdir. TBC'lerin türbin kanatçıklarına sağladıkları mükemmel ısı yalıtım performansları ile son derece işlevsel kaplamalar olduğunu belirtmişlerdir. Ürettikleri TBC'leri 60° ve 90° çarpma açıları SPE aşınmasına tabi tutmuşlardır. SPE aşınmasında TBC hasarının oluşmasını yüzeyde kaplama kalınlığının azalması ve parçalanması olarak rapor etmişlerdir. Sonuçta 60° çarpma açısının, 90° çarpma açısına kıyasla daha yüksek oranda erozyona sebebiyet verdiğini tespit etmişlerdir. Çift katmanlı TBC'lerin geleneksel YSZ'lere kıyasla daha dayanımlı olduğunu da belirtmişlerdir (Zhao ve ark., 2022).

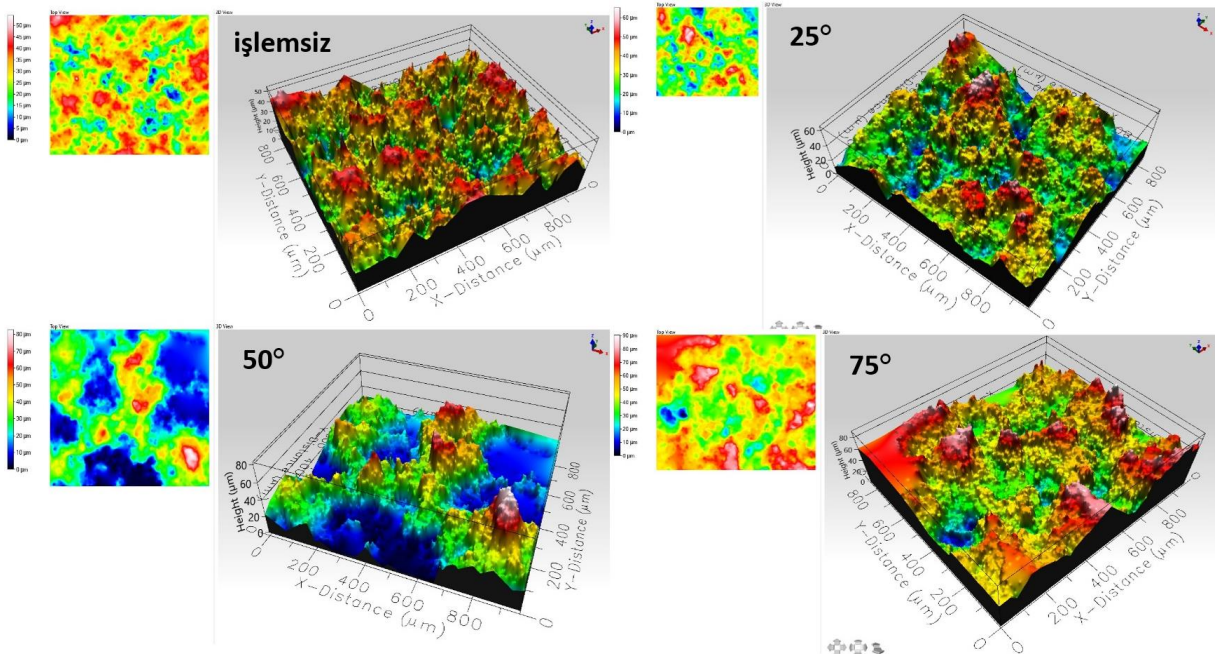




Şekil 5. TBC'lerin farklı partikül çarpma açılardaki erozyon oranları

### 3.2. TBC'lerin 3D profilometre analizi

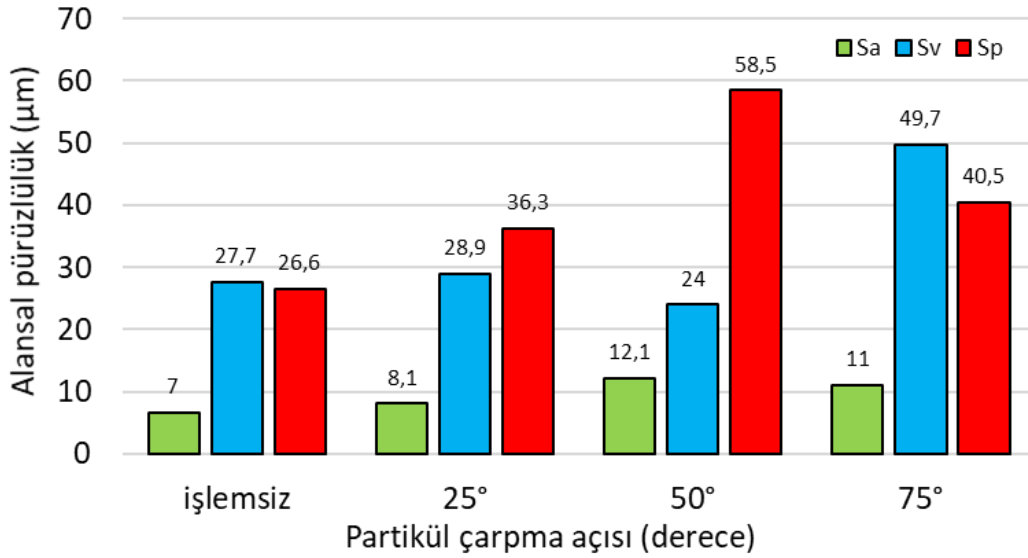
Şekil 6'da katı partikül erozif aşınma öncesi elde edilen TBC numunesinin ve farklı partikül çarpma açısı ile erozyona uğramış TBC'lerin 3D profilometre analizi sonuçları verilmektedir. SPE aşınmasına tabi tutulmuş numunelerinin deneyler sonrası 3D profilometre cihazı ile ortalama alansal pürüzlülük (Sa), maksimum çukur derinliği (Sv), maksimum pürüz yüksekliği (Sp) değerleri tespit edilmiştir.



Şekil 6. Farklı partikül çarpma açısı ile SPE hasarına uğramış TBC'lerin 3D profilometre analizi sonuçları

Şekil 7'de farklı partikül çarpma açılarının Sa değerine etkisi verilmiştir. Elde edilen grafik 1,5 bar püskürtme basıncına ait farklı partikül çarpma açılarında, 170-230 mesh boyutundaki partiküller ile aşındırılan TBC kaplamaların 3D profilometre analizi sonucu elde edilen Sa değeri verileridir. Grafikte işlemsiz olarak belirtilen sütun erozyona maruz kalmayan (erozyon öncesi) TBC numunesinin Sa değeri verileridir. Alansal pürüzlülük değerleri ve erozyon oranları arasında doğru

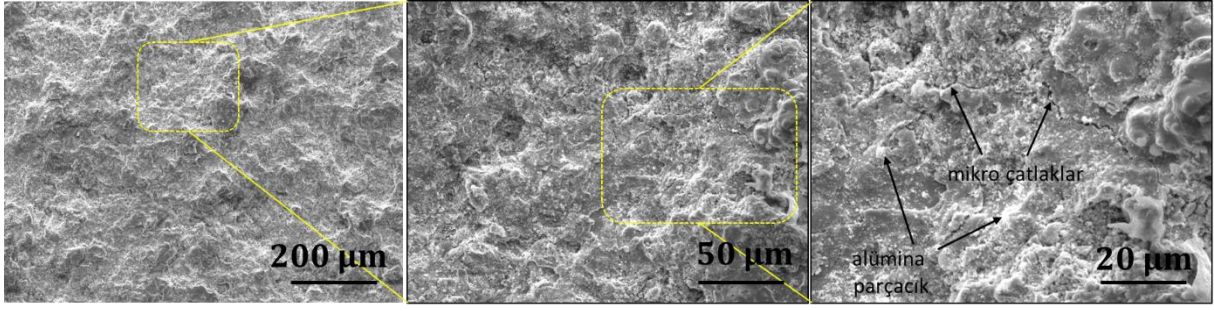
orantılı ilişki olduğu tespit edilmiştir. Yüksek erozyon oranları pürüzlülük değerlerini artırırken, düşük erozyon oranlarının ise azalttığı gözlemlenmiştir. Elde edilen grafikten de görüleceği üzere en yüksek pürüzlük verisi 50°'lik partikül çarpma açısıyla meydana gelen erozyon oranı sonucu oluşmuştur. Tespit edilen bu sonuç SPE aşınma oranlarında elde edilen sonuçları desteklemektedir. Şekil 6'dan da görüldüğu üzere 50°'lik partikül çarpma açısında alansal pürüzlülük oranları partiküllerin yüzey doyurma ve deformasyon oranına bağlı olarak daha yüksek çıkmaktadır. Minimum değerler 25°'lik partikül çarpma açısında elde edilmesine rağmen SEM görüntülerinde kaplama yüzeyinde çukurlar ve sürekli çatlakların meydana geldiği görülmüştür.



Şekil 7. Farklı partikül çarpma açılarında erozyona uğramış kaplamaların alansal pürüzlülükleri

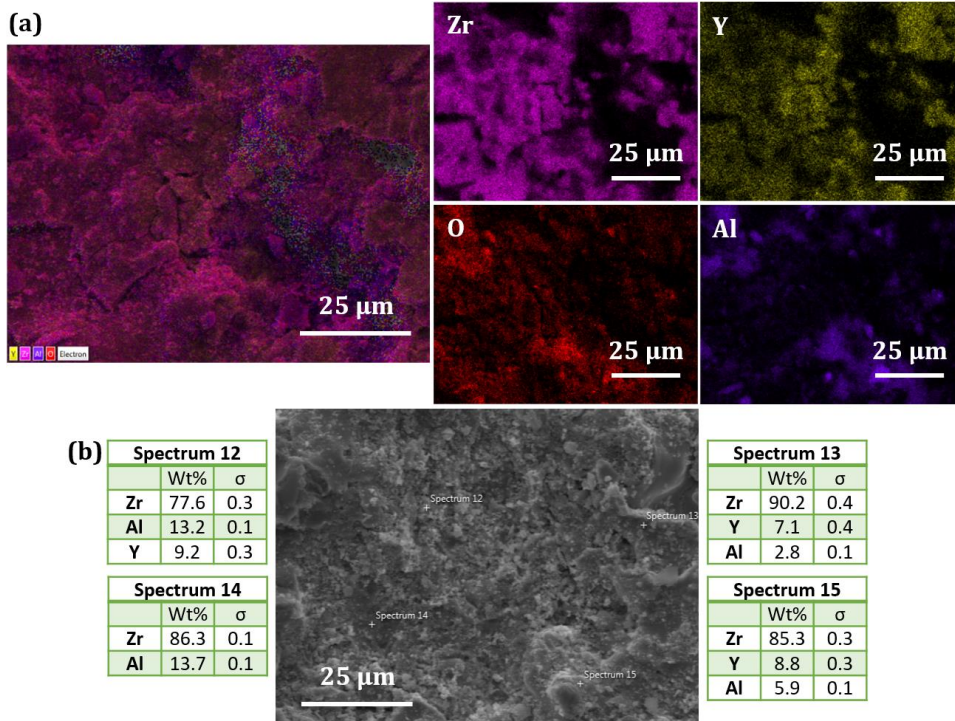
### 3.3. TBC'lerin SPE hasarı sonrası mikroyapısal incelemeleri

Şekil 8'de 25°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin 500x, 1.00kx ve 2.00kx büyütmelemlerde alınan mikro yapı üst yüzey görüntüleri verilmiştir. Kaplama yüzeylerinde aşındırıcı partiküllerin çarpma etkisi ile kaplamada mikro çatlak ve gözeneklerin oluştuğu belirgin bir şekilde gözlenmektedir. Aşındırıcı partiküller yoğun bir şekilde kaplamaya nüfus ederek birikmiş ve plastik deformasyona yol açarak yüzeyde tepeciklerin oluşumuna neden olmuştur. Ayrıca düşük çarpma açısında (25°) aşındırıcı partiküller mikro kesme mekanizmaları ile malzeme koparmaktadır. Büyük büyütmede alınan SEM görüntüsünde ise kaplama yüzeyinde çukurların oluştuğu, mikro çatlakların ve aşındırıcı partiküllerin daha belirgin olduğu gözlenmektedir. 25°'lik partikül çarpma açısı ile alınan görüntülerde kaplama yüzeyinde partiküllerin yüzeye çarpması neticesinde pürüzlülüğu yüksek bölgeler gözlenmiştir. Çarpan partikül taneciklerinin kaplama yüzeyinde düzensiz bir morfolojiye neden olduğu belirtilebilir.



Şekil 8. 25°'lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin üst yüzey SEM mikroyapı görüntüleri

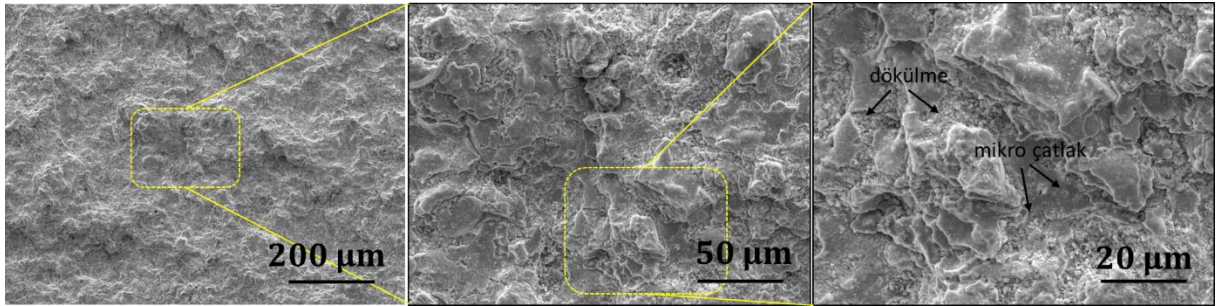
Katı partiküllerin temas ettiği yüzeyel bölgeler elementel haritalama analizi görüntülerinde ve EDS analizinde görülmektedir. Şekil 9a'da 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine ait elementel haritalama analizi verilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere TBC numunesinin 25°'lik partikül çarpma açısına maruz kalmasından sonra yüzeyde Zr, Y, Al ve O elementlerinin tespiti yapılmıştır. Buradaki elementel analiz YSZ'den meydana geldiğini ortaya koymaktadır. Şekil 9b'de elementel haritalama analizine ek olarak gerçekleştirilen üst yüzeyden alınan SEM görüntüsünün noktasal EDS analizi verilmiştir. 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesinin noktasal analizi neticesinde kaplama yüzeyinde olan daha düşük düzeydeki aşınma oranı görülebilmektedir (Şekil 7). 25°'lik partikül çarpma açısı ile gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrası TBC numunelerinin elementel haritalama ve EDS analiz sonuçları incelendiğinde, üretilen TBC'lerin yarı sünek yüzey özellikleri sergilemesi ile ilişki aşındırıcı partiküllerin yüzeye gömülmesi sonucunda yüksek oranda Al elementinin varlığı tespit edilmiştir.



Şekil 9. 25°'lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin SEM analizi sonuçları: a) SEM elementel haritalama sonucu ve b) SEM EDS analizi sonucu

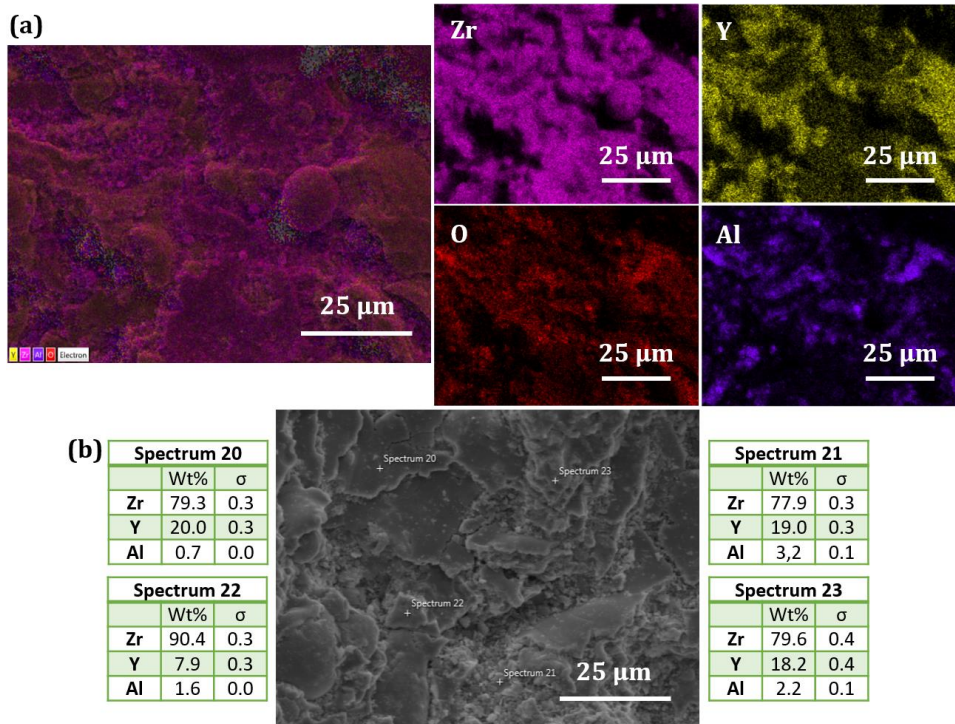
Şekil 10'da 50°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin 500x, 1.00kx ve 2.00kx büyütmelerde alınan SEM üst yüzey görüntüleri verilmiştir. SEM görüntüleri incelendiğinde,

kaplama yüzeyine aşındırıcı partiküllerin kompakt bir şekilde baskı uyguladığı ve kaplama yüzeyinde ağır bir tahribata yol açtığı gözükmemektedir. Dolayısıyla 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine göre pürüzlü yüksek bir yüzey morfolojiye sahiptir. Yine 25°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine benzer mikro çatlaklar, çukur ve oyuklar burada daha belirgin olarak karşımıza çıkmaktadır. Ayrıca, deformasyona maruz kalan kaplama yüzeyinde derin bir çukur oluşmuş ve kaplama yüzeyi tekrarlı aşındırıcı partiküllerin çarpması sonucu malzeme kaybına neden olmuştur. Bu durum Şekil 7'deki erozyon oranı hesaplarını destekler niteliktedir. 50°'lik partikül çarpma açısı ile gerçekleştirilen erozyon aşınmasında diğer çarpma açılara kıyasla en yüksek hasar oranı tespit edilmiştir.



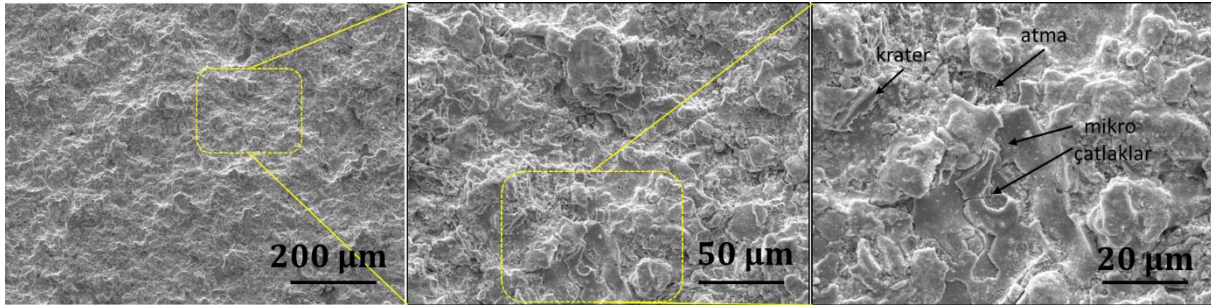
Şekil 10. 50°'lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin üst yüzey SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 11-a'da 50°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine ait elementel haritalama analizi verilmiştir. Üst kaplama yapısını oluşturan YSZ yapısını içeren elementel dağılımlar SEM yüzey mikroyapısı ve haritalamada yer alan mikroyapısal dağılımlardan görülmektedir. Şekil 11-b'de elementel haritalama analizine ek olarak gerçekleştirilen üst yüzeyden alınan SEM görüntüsünün SEM EDS analizi sonucu verilmiştir.



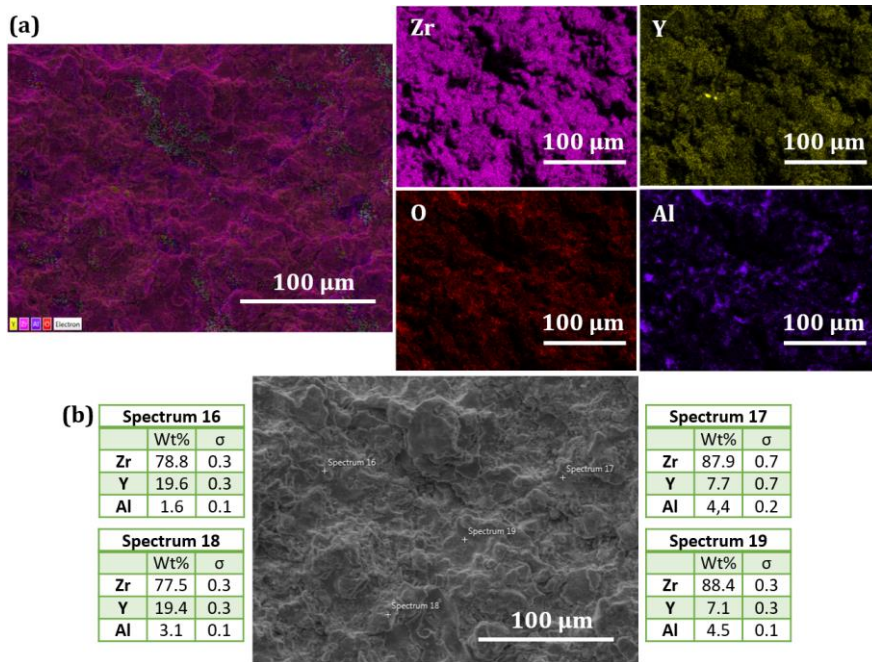
Şekil 11. 50°'lik partikül çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC'lerin SEM analizi sonuçları: a) SEM elementel haritalama sonucu ve b) SEM EDS analizi sonucu

Şekil 12’de 75°’lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin 500x, 1.00kx ve 2.00kx büyütmelemlerde alınan SEM üst yüzey görüntüleri verilmiştir. 75°’lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinin SEM mikroyapıları incelendiğinde, 25°’lik çarpma açısı ile aşındırılan kaplama yüzeyiyle benzer hasar mekanizmaları oluştuğunu göstermiştir. Bu durum ticari olarak elde edilen aşındırıcı partikülün kaplama yüzeyine çarpma açısına, püskürtme basıncına, süresine ve vb. deney parametrelerine de bağılı olmaktadır. Katı partikül erozif aşınmada malzeme kaybına sebep olan partiküllerin önemi oldukça fazladır. Eğer aşındırıcı partiküller katı ve sert bir halde ise aşınma türü abrazif karakterdedir. Karşılıklı zorlamalar sonucunda triboloji sistemin elemanları arasında oluşan aşınma birçok mühendislik sistemlerinin performansını etkiler niteliğe sahiptir. Aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyine püskürtülmesi esnasında birbirlerine çarparak kaplama yüzeyinden malzeme koparmakta ve kütle kaybına sebep olmaktadır. Yüzey derinliği ve genişliği daha düşük izler oluşturmasına rağmen yüzeyde çok sayıda aşındırıcı partiküller rastlanmaktadır ve mikro çatlaklar oluşmuştur.



Şekil 12. 75°’lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC’lerin üst yüzey SEM mikroyapı görüntüleri

Şekil 13-a’da 75°’lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunesine ait elementel haritalama analizi verilmiştir. Şekil 12-b’de elementel haritalama analizine ek olarak gerçekleştirilen üst yüzeyden alınan SEM görüntüsünün SEM EDS analizi sonucu verilmiştir.



Şekil 13. 75°’lik çarpma açısı ile SPE hasarına uğratılan TBC’lerin SEM analizi sonuçları: a) SEM elementel haritalama sonucu ve b) SEM EDS analizi sonucu

Aşınma izlerinden alınan görüntüler, erozif aşınma oranları ile ilgili yapılan hesaplamalar ile uyum göstermektedir. SPE aşınmasını etkileyen parametrelerden partikül toz türü, kaplama yüzeyine çarpma açısı ile basınç oluşan aşınma mekanizmalarını belirgin şekilde değişmektedir. Çarpma açısına bağlı olarak iz şekillerindeki değişim ele alındığında, partiküllerin kaplama yüzeyine temasında farklılık gösterdiği ve genel bir sonuç olarak karşımıza çıktığı görülmüştür. Dahası partikül geometrisine bağlı olarak iz şekli de değişebilmektedir. Kaplan ve ark. (2018) MCrAlY metalik bağ ve YSZ seramik üst kaplama kullanarak TBC numunelerini üretmişlerdir ve SPE aşınma deneylerini farklı partikül çarpma açılarında gerçekleştirmişlerdir. Deneyler sonrası EDS analiz incelemelerinde yarı sünek davranış sergileyen TBC kaplamaların yüzeyine yüksek oranda (%38,4) aşındırıcı partikül saplandığını tespit etmişlerdir.

#### 4. SONUÇ

Bu çalışmada, Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine CoNiCrAlY metalik bağ ve YSZ seramik üst kaplamalar üretilerek SPE aşınma davranışları ve TBC sistemi yapısında oluşan mikroyapısal değişimler incelenmiştir. Çalışmalar neticesinde elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda yer almaktadır.

- Termal sprej kaplama yöntemlerinden APS yöntemi kullanılarak CoNiCrAlY metalik bağ kaplama ve YSZ seramik üst kaplamaların üretimi başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
- TBC kaplamalı numunelerde SPE deneyleri sonrası en yüksek erozyon aşınma oranına 50°'lik çarpma açısında karşılaşılırken, bu değeri sırasıyla 75°'lik çarpma açısı ve 25°'lik çarpma açılarında gerçekleştirilen deneyler takip etmektedir.
- SPE testleri sonrasında SEM mikroyapıları incelendiğinde, kaplama yüzeylerinde çukurların oluşum bulduğu ve sürekli çatlakların meydana geldiği görülmüştür.
- Farklı partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen SPE deneyleri sonrasında, 50°'lik çarpma açısı ile aşındırılan TBC numunelerinde maksimum erozyon aşınma oranı tespit edilmiştir.
- SPE deneyleri sonrası gerçekleştirilen alansal pürüzlülük ölçümleri incelendiğinde erozyon oranlarının alansal pürüzlülük değerleri ile doğru orantılı olarak artış gösterdiği gözlemlenmiştir.
- Yüksek erozif aşınma oranları, alansal pürüzlülük değerlerini artırırken, düşük erozif aşınma oranlarının alansal pürüzlülük değerlerini azalttığı görülmüştür.
- En yüksek alansal pürüzlülük değerlerine 50°'lik çarpma açısında ulaşılmış ve bu çarpma açısını sırasıyla 75° ve 25° partikül çarpma açılarının takip ettiği görülmüştür.

#### 5. TEŞEKKÜR

Yazarlar, desteklerinden dolayı Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 2021-FEN-A-009) teşekkürü bir borç bilir.

#### 6. ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar, bilinen herhangi bir çıkar çatışması veya herhangi bir kurum/kuruluş ya da kişi ile ortak çıkar bulunmadığını onaylamaktadırlar.

## 7. YAZAR KATKISI

Abdullah Cahit KARAOĞLALI ve Derviş ÖZKAN çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin belirlenmesi, Yasin ÖZGÜRLÜK, Garip ERDOĞAN ve Gülfem BİNAL çalışmanın kavramsal ve tasarım süreçlerinin yönetimi, Garip ERDOĞAN ve Sefa Erdem YILMAZ veri toplama, Derviş ÖZKAN ve Gülfem BİNAL veri analizi ve yorumlama, Sefa Erdem YILMAZ makale taslağının oluşturulması, Abdullah Cahit KARAOĞLALI ve Derviş ÖZKAN fikirsel içeriğin eleştirel incelenmesine katkı sağlamışlardır ve Derviş ÖZKAN, Gülfem BİNAL son onay ve tam sorumluluk kısmında da katkıda bulunmuştur.

## 8. KAYNAKLAR

- Binal G., Isothermal oxidation and hot corrosion behavior of HVOF sprayed 80Ni-20Cr coatings at 750 °C. *Surface and Coatings Technology*, 129141, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129141>
- Cemuschi F., Augello L., Solid Particle Erosion of TBCS: Jet Tester Modeling and Erosion Forecasts. In *Developments in Strategic Materials and Computational Design V: A Collection of Papers Presented at the 38th International Conference on Advanced Ceramics and Composites January 27–31, 2014 Daytona Beach, Florida (Vol. 35, pp. 139-150)*. Hoboken, NJ, USA: John Wiley Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781119040293.ch11>
- Cernuschi F., Guardamagna C., Capelli S., Lorenzoni L., Mack D.E., Moscatelli A., Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings. *Wear*, 348, 43-51, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.10.021>
- Chowdhury M.A., Debnath U.K., Nuruzzaman D.M. Islam M.M., Experimental analysis of aluminum alloy under solid particle erosion process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 230(12), 1516-1541, 2016. <https://doi.org/10.1177/1350650116639466>
- Demirci M., Bagci M., Erosion of ceramic coating applications under the influence of APS and HVOF methods. *Applied Nanoscience*, 12(11), 3409-3415, 2022. <https://doi.org/10.1007/s13204-022-02691-4>
- Essa S.K., Chen K., Liu R., Wu X. and Yao M.X., 2021. Failure mechanisms of APS-YSZ-CoNiCrAlY thermal barrier coating under isothermal oxidation and solid particle erosion. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30, 424-441, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11666-020-01124-4>
- Golewski P., Sadowski T., The influence of TBC aging on crack propagation due to foreign object impact. *Materials*, 12(9), 1488, 2019. <https://doi.org/10.3390/ma12091488>
- Kaplan M., Uyaner M., Avcu E., Yildiran Avcu, Y. Karaoglanli, A.C., Solid particle erosion behavior of thermal barrier coatings produced by atmospheric plasma spray technique. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 26(19), 1606-1612, 2019. <https://doi.org/10.1080/15376494.2018.1444221>
- Karaoglanli A.C., Structure and durability evaluation of blast furnace slag coatings and thermal barrier coatings (TBCs) under high temperature conditions. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129087, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129087>
- Karaoglanli A.C., Grund T., Turk A., Lampke T., A comparative study of oxidation kinetics and thermal cyclic performance of thermal barrier coatings (TBCs). *Surface and Coatings Technology*, 371, 47-67, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.12.082>

- Kumar D., Pandey K.N., Solid particle erosive wear behavior of sol–gel-derived AA2024 thermal barrier coatings. *Surface Review and Letters*, 28(02), 2050051, 2021. <https://doi.org/10.1142/S0218625X20500511>
- Malvi B., Roy M., Elevated Temperature Erosion of Plasma Sprayed Thermal Barrier Coating. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30(4), 1028-1037, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11666-021-01189-9>
- Nomoto H., Solid particle erosion analysis and protection design for steam turbines. In *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants*, Woodhead Publishing, 219-239, 2017.
- Ozgulruk Y., Doleker K.M., Ahlatci H., Ozkan D., Karaoglanli A.C., The microstructural investigation of vermiculite-infiltrated electron beam physical vapor deposition thermal barrier coatings. *Open Chemistry*, 16(1), 1106-1110, 2018. <https://doi.org/10.1515/chem-2018-0097>
- Özkan D., Karaoğlanlı C. High Entropy Alloys: production, properites and utilization areas. *El-Cezeri*. 8(1): 164-181, 2021. <https://doi.org/10.31202/ecjse.800968>
- Özkan D., MCrAlY İçerikli Bağ Kaplamaya Sahip Termal Bariyer Kaplamaların (TBCs) Mikroyapısal Özelliklerinin ve İzotermal Oksidasyon Davranışının İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 25, 1, 331-338, 2022. doi:10.2339/politeknik.885466
- Parlakyigit A.S., Ozkan D., Oge M., Ozgulruk Y., Doleker K.M., Gulmez T. Karaoglanli A.C., Formation and growth behavior of TGO layer in TBCs with HVOF sprayed NiCr bond coat. *Emerging Materials Research*, 9(2), 451-459, 2020. <https://doi.org/10.1680/jemmr.18.00085>
- Shin D., Hamed A., Influence of micro–structure on erosion resistance of plasma sprayed 7YSZ thermal barrier coating under gas turbine operating conditions. *Wear*, 396, 34-47, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2017.11.005>
- Wang D.S., Tian Z.J., Yang B., Shen L.D., Preparation and solid particle erosion behaviors of plasma-sprayed and laser-remelted ZrO<sub>2</sub>-7wt.% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coatings. In *Applied Mechanics and Materials* 159, 191-197, 2012. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.159.191>
- Zhang P., Li F., Zhang X., Zhang Z., Tan C., Ren L., Liu M., Effect of bionic unit shapes on solid particle erosion resistance of ZrO<sub>2</sub>-7wt% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coatings processed by laser. *Journal of Bionic Engineering*, 15(3), 545-557, 2018. <https://doi.org/10.1007/s42235-018-0045>
- Zhao X., Liu W., Li C., Yan G., Wang Q., Yang L. Zhou Y., Solid Particle Erosion Behavior of La<sub>2</sub>Ce<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/YSZ Double-Ceramic-Layer and Traditional YSZ Thermal Barrier Coatings at High Temperature. *Coatings*, 12(11), 1638, 2022. <https://doi.org/10.3390/coatings12111638>