

## NiCr İÇERİKLİ TERMAL SPREY KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZYON DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

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

<sup>1</sup>Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6560-2554>, <http://orcid.org/0000-0002-4978-290X>

<sup>2</sup>Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-4750-8787>, <http://orcid.org/0000-0002-1750-7989>

<sup>3</sup>Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler, Optisyenlik,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1121-5018>

Anahtar Kelimeler	Öz
NiCr Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Termal Sprey Kaplama Katı Partikül Erozyonu Hasar Oluşumu	<i>Mühendislik uygulamalarında katı partikül erozyonu nedeniyle malzemeler çalışma koşulları altında hasara uğramaktadır. Malzeme yüzeylerinin erozyon, oksidasyon ve korozyon gibi hasar mekanizmalarına karşı korunması için kullanılan yöntemlerden birisi de termal sprey kaplama uygulamalarıdır. Bu çalışmada, yüksek hızlı oksi-yakıt termal sprey kaplama yöntemi ile 316L paslanmaz çelik altlık üzerine biriktirilen NiCr kaplamaların katı partikül erozyon davranışları incelenmiştir. Katı partikül erozyon deneyleri aşındırıcı alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) partikülleri ve farklı çarpma açıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, özel bir test düzeneği yardımı ile yapılmıştır. Değişen çarpma açılarının yüzeyler üzerindeki etkisi, taramalı elektron mikroskobu ve 3D profilometre kullanılarak incelenmiş ve literatür çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Katı partikül erozyon testleri sonrası en yüksek erozyon oranı 60°'lik çarpma açısında görülürken, bu değeri sırasıyla 30° ve 90°'lik çarpma açılarındaki erozyon oranları takip etmiştir. Taramalı elektron mikroskobu analizleri sonucu gerçekleştirilen tüm katı partikül erozyonu testlerinde numune yüzeylerine aşındırıcı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin gömüldüğü ve farklı hasar oluşumlarının meydana geldiği tespit edilmiştir.</i>

## DETERMINATION OF SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIORS OF NiCr CONTAINING THERMAL SPRAY COATINGS

Keywords	Abstract
NiCr High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray Coating Solid Particle Erosion Damage Formation	<i>In engineering applications, materials are damaged under operating conditions due to solid particle erosion (SPE). One of the methods used to protect material surfaces against damage mechanisms are erosion, oxidation, and corrosion is thermal spray coating application. In this study, the solid particle erosion (SPE) behavior of NiCr coatings deposited on 316L stainless steel substrates by high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray coating method was investigated. SPE experiments were performed using abrasive alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) particles and different impact angles. The experiments were carried out at room temperature with the help of a special test setup. The effect of varying impact angles on the surfaces was investigated using scanning electron microscopy (SEM) and a 3D profilometer and discussed in comparison with literature studies. After SPE tests, the highest erosion rate was realized at an impact angle of 60°, followed by erosion rates at impact angles of 30° and 90°, respectively. As a result of SEM analysis, it was determined that abrasive Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles were embedded in the sample surfaces in all SPE tests performed, and different damage formations occurred.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 28.04.2023

Kabul Tarihi

: 14.08.2023

Research Article

Submission Date

: 28.04.2023

Accepted Date

: 14.08.2023

\* Sorumlu yazar: [dervisozkan@bartin.edu.tr](mailto:dervisozkan@bartin.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1289508>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Katı partikül erozyonu (KPE), havacılık, petrol, kimya ve enerji üretimi gibi birçok endüstride büyük ekonomik kayıplara neden olan yaygın bir malzeme bozunma mekanizmasıdır (Zhang, Dong ve Chen, 2017). Eroziyon aşınma esas olarak katı ve sıvı parçacıkların mekanik bileşenlerin yüzeyi üzerindeki tekrarlanan etkilerinden kaynaklanır (Thakur ve Arora, 2013). Yüzeyin, aşındırıcının momentumu ve kinetik enerjisi ile etkileşimi nedeniyle hasar meydana gelir (Swain, Mantry, Mohapatra, Mishra ve Behera, 2022). Aşındırıcının doğası, parçacık boyutu, çarpma hızı, çarpma açısı eroziyon aşınma oranını etkileyen önemli parametrelerdir (Debasish, Panigrahi, Sengupta ve Bajpai, 2022). Toz bulutları içinde uçan bir uçağın gaz türbini kanatları ve hidrolik pompaların pervaneleri gibi çeşitli makinelerde sıklıkla eroziyon aşınma görülür. Bu bileşenleri korumak için genellikle termal sprey kaplamalar kullanılır (Thakur ve Arora, 2013). Kaplamalar, altlık malzemelerin mekanik özelliklerinin korunmasına izin verir; aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı direnç sağlarken malzemelerin kullanım sınırlarını da genişletirler (Ramesh, Prakash, Nath, Sapra ve Venkataraman, 2010; Karaoglanli, 2023). Termal sprey tekniğinde, kaplama malzemesi farklı kaynaklar aracılığıyla erime noktasına yakın veya daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılır. Kaplama tozu partikülleri hızlandırılarak altlık tabakasının yüzeyine çarptırılır ve burada biriktirilir. Bu işlem sırasında yüksek sertliğe sahip katmanlı bir yapı oluşur. Termal sprey işleminde altlık tabakasının sıcaklığındaki artış minimum düzeyde olduğundan altlığın metalurjik özellikleri etkilenmeden kalır (Pradeep, Venkatesh ve Nithin, 2022). Termal sprey prosesleri, hammadde ve enerji kaynaklarına (elektrik ve kimyasal enerji) göre sınıflandırılır (Guduru, Dixit ve Kumar, 2022; Derelizade ve diğ., 2022). Termal sprey yöntemlerinden biri olan yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) yöntemi, esnekliği ve maliyet etkinliği nedeniyle tercih edilmektedir (Tan, Looney ve Hashmi, 1999). HVOF yöntemi ile üretilen kaplamalar, önemli ölçüde yüksek parçacık hızı ve nispeten düşük parçacık sıcaklığının bir sonucu olarak düşük oksijen içeriği, düşük gözeneklilik yüzdesi, yüksek yoğunluk, bağ kuvveti, tokluk ve sertlik gibi olağanüstü özelliklere sahiptir. HVOF fonksiyonel kaplamalar, performansı artırmak, ürün ömrünü uzatmak ve bakım maliyetini azaltmak için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Li ve Christofides, 2009; Prashar ve Vasudev, 2022; Ozkan, 2023; Odabas ve diğ., 2022; Ozgurluk, 2022). HVOF termal sprey yöntemi, NiCr kaplamalar üretmek için en uygun yöntemlerden biridir. Nikel bazlı alaşımlar erozyona, korozyona ve aşınmaya karşı mükemmel direnç sağlamaktadır (Sidhu, Sidhu ve Prakash, 2007). Bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen kaplamalardır.

Bu çalışmanın amacı, 316L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine HVOF yöntemi kullanılarak üretilen

80Ni-20Cr kaplamaların katı partikül erozyonu davranışlarının incelenmesidir. Kaplamaların KPE davranışı oda sıcaklığında 30°, 60° ve 90° çarpma açılarındaki, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcı partiküller kullanılarak belirlenmiştir. Erozyon oranları ağırlık kaybı yöntemi ile hesaplanmış ve sonuçlar optik profilometre çalışmaları ile desteklenmiştir. Ayrıca aşınmış yüzeyler SEM kullanılarak incelenmiş ve literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ile değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

## 2. Yöntem

Bu çalışmada altlık malzeme olarak 25,4 mm çapında ve 5 mm kalınlığa sahip AISI 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Altlık malzemeler, 40 ± 5 µm partikül boyutlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu ve 2,5 bar basınç kullanılarak kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra etil alkol ile ultrasonik temizleme uygulanmıştır.

GTV (Almanya) Şirketi'nden temin edilen 80Ni-20Cr içerikli kaplama tozu kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Tozlarının partikül boyut dağılımları Malvern Mastersizer 3000 partikül boyutu ölçüm cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Bu ölçüme göre d(10) değeri 28,15 µm, d(50) değeri 44,35 µm ve d(90) değeri 72,95 µm'dir. Tozlar endüstriyel bir HVOF sprey tabancası (Hipojet 2700-M, Hindistan) ve Tablo 1'de listelenen parametreler kullanılarak, AISI 316L paslanmaz çelik yüzeylerde biriktirilmiştir. Kaplama sürecinde parametreler, literatür çalışmaları, sprey ekipmanı ve kaplama tozunun temin edildiği firma tarafından sağlanan veriler esas alınarak belirlenmiştir (Yılmaz, 2023; Özkan vd., 2023). Biriktirilen kaplamalar yaklaşık 100 µm kalınlığa sahiptir. Kaplanmış numunelerin, mikroyapı analizleri SEM (Tescan MAIA3 XMU, Çek Cumhuriyeti) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kaplanmış numunelerin faz yapısı 10° ile 90° 2θ tarama aralığı ve Cu Ka radyasyonu kullanılarak X-ışını kırınım (Rigaku, Dmax 2200 PC, Japonya) cihazı ile belirlenmiştir.

Tablo 1. HVOF İşleme Parametreleri

Kaplama	Yanma Gazları	Toz Taşıyıcı Gaz	Toz Besleme Gazı Akışı (slpm)	Kaplama Mesafesi (mm)
80Ni-20Cr	O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	12,5	250

KPE testleri, ayarlanabilir numune fikstürü, nozul sabitleyici ve basınçlı hava kompresörü içeren özel olarak tasarlanmış bir deney düzeneğinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Katı Partikül Erozyon Deney Parametreleri

Aşındırıcı Partikül	Aşındırıcı Partikül Boyutu (µm)	Basınç (Bar)	Kütlesel Debi (g/sn)	Çarpma Açısı (Derece)	Çarpma Mesafesi (mm)	Nozul Çapı (mm)
Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	65-80	1,5	3,89	30-60-90	20	3

Deney numunelerinin ağırlıkları  $\pm 0,0001$  mg hassasiyete sahip Kern & Sohn marka hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Numunelerin KPE testlerinden önce ağırlıkları ( $m_1$ ) belirlenmiştir. KPE testlerinden sonra ağırlık ( $m_2$ ) ölçüm işlemi tekrarlanmıştır. Eşitlik 1 yardımıyla katı partikül erozyon oranı (E) hesaplanmıştır. Burada ( $\dot{m}$ ) aşındırıcı partiküllerin kütsel debisini (g/sn) ve (t) test süresini (sn) ifade etmektedir. Kütsel debiyi hesabında KPE testi sırasında kullanılan  $Al_2O_3$  miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Harcanan  $Al_2O_3$  tozlarının depolanacağı bir hazne deney düzeneğinde bulunmaktadır. Yapılan her test sonrasında haznede toplanan  $Al_2O_3$  tozlarının ağırlığı (m) hassas terazi yardımı ile ölçülmüştür. Kütsel debi Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$E = \frac{(m_1 - m_2)}{\dot{m} \times t} \quad (1)$$

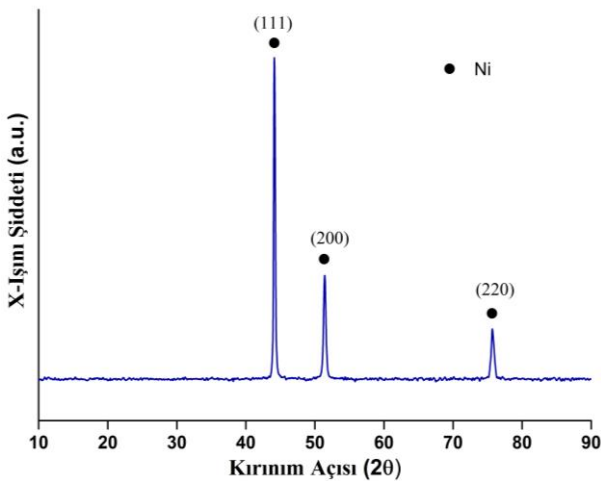
$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (2)$$

SPE testlerinden sonra numune yüzeyleri SEM yardımıyla mikroyapısal inceleme işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca, KPE testleri sonrasında numunelerin iz derinlikleri ve aşınma ölçümleri 3D optik profilometre (Profil3D brand-ABD) kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### 3. Bulgular

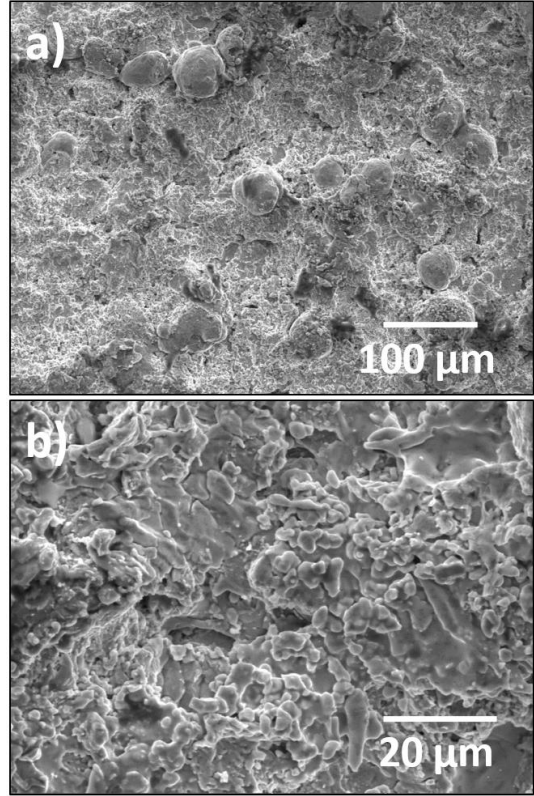
#### 3.1. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu

316L paslanmaz çelik altlık tabakası üzerinde biriktirilen 80Ni-20Cr kaplamanın XRD yüzey analizi, Şekil 1'de gösterilmektedir. Kaplamanın tek fazlı yüzey merkezli kübik (YMK) Y-Ni (Ni-Cr katı eriyiği) fazından oluştuğu benzer çalışmada da görülmektedir (Binal, 2023).



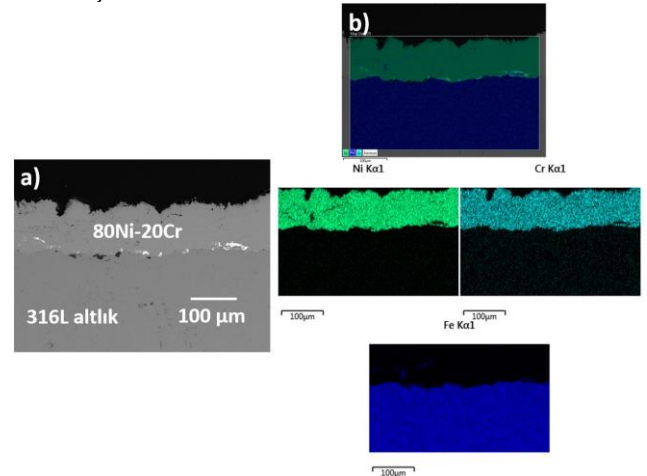
Şekil 1. NiCr Kaplamaya Ait XRD Paterni

Şekil 2'de, HVOF yöntemi ile üretilmiş, NiCr kaplamanın işlemsiz üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir. Kaplama yapısı incelendiğinde, düzensiz morfolojiye sahip birbirine kenetlenmiş ve kısmen erimiş partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Kaplama yapısı yoğun görünmektedir ve partiküllerin düzgün bir şekilde birleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2. NiCr Kaplamaların İşlemsiz Üst Yüzey 500 ve 3000x büyütmedeki SEM Görüntüleri

Şekil 3'de, HVOF yöntemi ile üretilmiş, 80Ni-20Cr kaplamanın arayüzey ve elementel haritalama mikroyapı görüntüleri 500 ve 3000x büyütmede verilmiştir.



Şekil 3. 80Ni-20Cr kaplama mikroyapısı; a) ara yüzey kesit görüntüsü ve b) elementel haritalama görüntüleri

### 3.2. NiCr Kaplamaların SPE Davranışları

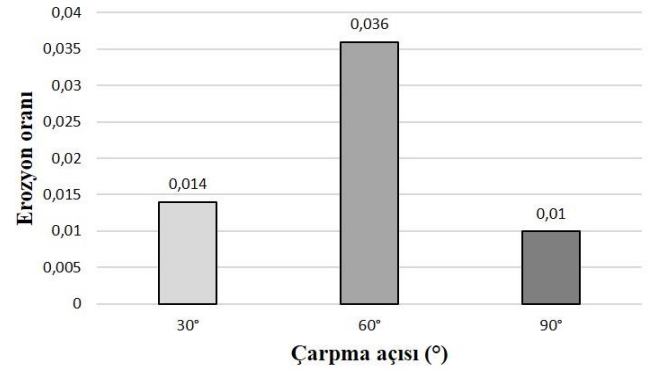
NiCr kaplamalı numunelerinin KPE testleri öncesi ve sonrasında ölçülen ağırlıkları, ağırlık kayıpları ve erozyon oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. NiCr Kaplamaların KPE Testleri Sırasında Ölçülen Ağırlık Kaybı ve Aşınma Oranları

Altlık Kaplama	Çarpma Açısı	Çarpma Süresi (sn)	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/sn)	Ağırlık Kayıpları			Erozyon Oranları
				$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$\Delta m$ (g)	
316L 80Ni-20Cr	30°	20	3,89	2,8865	2,8866	0,0011	0,014
	60°			3,6917	3,6889	0,0028	0,036
	90°			2,1494	2,1486	0,0008	0,010

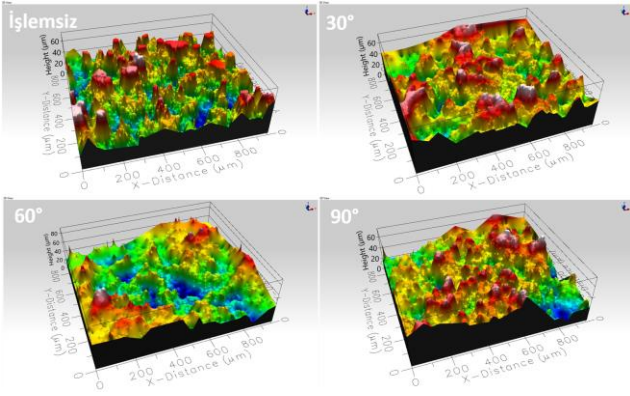
Şekil 4'de KPE testlerinde kullanılan çarpma açıları ve meydana gelen erozyon oranları (Tablo 3) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Maksimum erozyon oranı 60° çarpma açısında yapılan test sonucu gerçekleşmiştir. Bu durum yüzey doyurma oranı ve partiküllerin deformasyon korelasyonu ile ilişkilidir. 60°'de meydana gelen erozyon oranını sırasıyla 30° ve 90°'de yapılan testler sonrasında oluşan erozyon oranları takip etmektedir. Çarpma açısı, hedef malzeme ile aşındırıcıların yörüngesi arasındaki açı olarak tanımlanır. Erozyon oranının çarpma açısına bağımlılığı büyük ölçüde hedef malzemenin doğası tarafından belirlenmektedir (Sundararajan ve Roy, 1997). Tipik olarak, bir malzemenin KPE davranışı sünek veya gevrek olarak sınıflandırılabilir (Bousser, Martinu ve Klemberg-Sapieha, 2014). NiCr kaplamalar KPE sırasında sünek yüzey özellikleri sergilemektedir. Sünek bir hedef malzeme için maksimum erozyon, normale göre yaklaşık 70-80°'lik geliş açılarında meydana gelir (Molinari ve Ortiz, 2002). Genel olarak, yeterince sığ geliş açılarında, erozyonun oyuklanma ve kesme eylemlerinin bir kombinasyonu ile gerçekleştiğine inanılmaktadır. Bu durumda plastik akış ve sürtünme, deformasyon ve enerji dağılımının temel mekanizmalarını oluşturmaktadır (Molinari ve Ortiz, 2002; Bousser ve diğ., 2014). Sünek bir malzeme 90°'lik çarpma açısı ile darbe aldığı daha az hasar görür. Çünkü bu malzemeler katı partiküller tarafından 90° (dikey yönde) darbe aldığı, yanal çekme gerilimi sünek malzemenin yüksek kırılma gerilmesi nedeniyle etkili bir şekilde hasara neden olmayabilir (Chen ve Li, 2003). Vicenzi, Marques ve Bergmann (2008) yaptıkları çalışmada, AISI 310 paslanmaz çelik altlık üzerine HVOF ve plazma sprey NiCr bazlı kaplamaların sıcak ve soğuk erozif aşınma mekanizmalarını değerlendirmiştir. Erozyon testleri özel olarak geliştirilmiş ekipmanlar farklı sıcaklıklar ve 30°, 45°, 60° ve 90° çarpma açıları kullanılarak erimiş alüminyum oksit aşındırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar NiCr kaplamaların, monolitik metalik malzemelere benzer şekilde sünek özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. 25°C sıcaklıkta en yüksek aşınma oranı 30°, en düşük aşınma oranı ise

90° çarpma açılarındadır. Plazma sprey kaplamaların gözeneklilik oranları HVOF kaplamalara göre yüksektir. Daha gözenekli kaplama daha yüksek aşınma oranları göstermektedir. Sidhu, Sidhu ve Prakash (2006), yaptıkları çalışmada HVOF yöntemi ile NiCr kaplanan kazan borusu çeliklerini KPE testlerine tabi tutmuşlardır. Kaplama işlemi hem toz formunda hem de tel formunda NiCr kullanılarak gerçekleştirilmiştir. KPE testleri bir hava jeti üzerinde erozyon test cihazı kullanılarak 150 ila 200 µm silika kum partikülleri ile 30° ve 90° çarpma açılarındadır yapılmıştır. NiCr toz kaplama, NiCr tel kaplamaya kıyasla yüksek bir erozyon oranına sahiptir. 30°'lik çarpma açısında nispeten daha yüksek bir erozyon oranı gözlemlenmiştir, bu da kaplamanın sünek bir şekilde aşındığını göstermektedir.

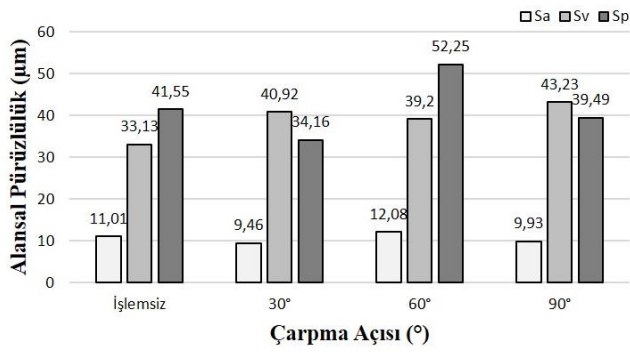


Şekil 4. Farklı çarpma açılarındaki KPE testine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların erozyon oranları

Şekil 5 ve Şekil 6'da KPE testi öncesi (işlemsiz) ve farklı çarpma açılarındaki test edilmiş NiCr kaplamaların 3D profilometre analizi sonuçları görülmektedir. 3D profilometre cihazı ile ortalama alansal pürüzlülük (Sa), maksimum çukur derinliği (Sv), maksimum pürüz yüksekliği (Sp) değerleri tespit edilmiştir. Şekil 5'de verilen pürüzlülük değerleri ve Şekil 4'de verilen erozyon oranları arasında benzerlik olduğu görülmektedir. Pürüzlülük değerleri, yüksek erozyon oranlarında artmış, düşük erozyon oranlarında ise azalmıştır. En yüksek pürüzlülük verisi 60°'lik çarpma açısında gerçekleşmiştir. Pürüzlülük oranları partiküllerin yüzey doyurma ve deformasyon oranına bağlı olarak daha yüksek çıkmaktadır.



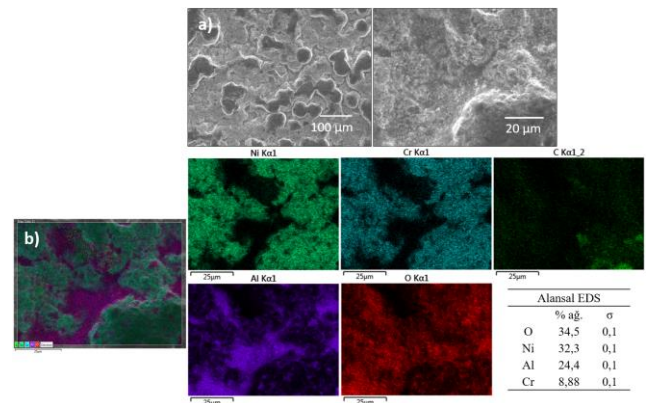
Şekil 5. Farklı çarpma açılarında KPE testine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların 3D profilometre analizi sonuçları



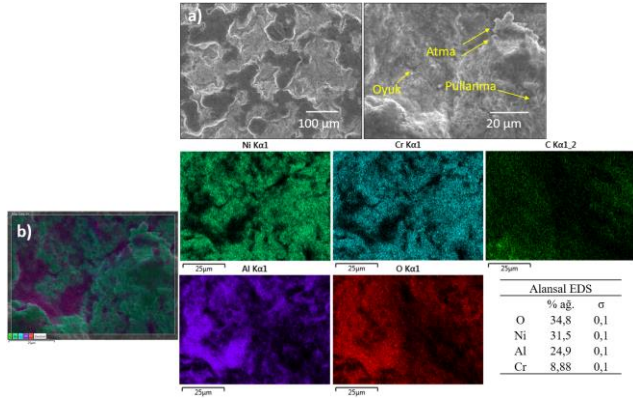
Şekil 6. Farklı çarpma açılarında KPE testine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların pürüzlülük değerleri

Sünek malzemelerde erozyonun malzemenin plastik deformasyon gösterdiği oyuklanma ve kesme hasarları şeklinde meydana geldiği bilinmektedir. Maksimum erozyon oranı katı partiküller hedef malzemelere eğik olarak çarptığında ortaya çıkar. KPE için bu açı, hedef malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur ve aşındırıcı özelliklerine bağlı değildir. Seramik gibi gevrek malzemelerde ise, katı partiküllerden hedef malzemelerin yüzeyine enerji aktarımı söz konusu olmaktadır. Bu süreç malzeme deformasyonunu, çatlak oluşumunu ve yayılmasını tetiklemektedir (Wang ve Yang, 2008). Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da farklı çarpma açılarında KPE testlerine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri, elementel haritalama ve EDS analizi sonuçları verilmektedir. Verilen SEM görüntüleri ile haritalama ve EDS analizleri incelendiğinde tüm çarpma açılarında kaplama yüzeylerine yüksek miktarda aşındırıcı partikül ( $Al_2O_3$ ) gömüldüğü görülmektedir. Gömülen aşındırıcı partiküller kaplama yüzeylerinde meydana gelen hasar mekanizmalarının tespitini zorlaştırmaktadır. En fazla aşındırıcı partikül gömülmesi  $60^\circ$  çarpma açısında gerçekleştirilen KPE testi sonucunda ortaya çıkmıştır. Yüksek hızlı partiküller sünek hedeflere çarptığında, bunların bir kısmı genellikle gömülü kalır (Hadavi, Arani

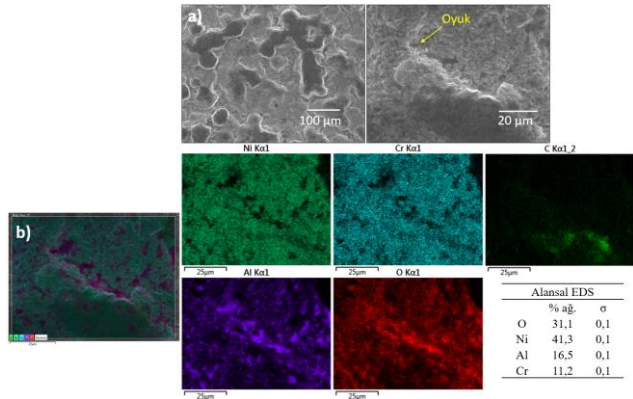
ve Papini, 2019). Gömülme, erozyon oranını azaltabilir ve yüzey pürüzlülüğünde istenmeyen değişimlere neden olabilir (Hadavi ve Panini, 2015). Sünek erozyonda başlangıçta partiküller hedef yüzeye gömülerek ağırlık kazanımına neden olabilir. Bu dönem kuluçka dönemi olarak bilinir. Kuluçka dönemi geçtikten sonra, aşınma genellikle sabit bir hızda ilerler. Maksimum ağırlık kaybı, gevrek ve sünek malzemeler için sırasıyla yaklaşık  $90^\circ$  ve  $30^\circ$  çarpma açısında bulunabilir (Tewari, Harsha, Häger ve Friedrich, 2003). Gömülen aşındırıcı partiküller Tablo 3'de verilen ağırlık kayıpları ve erozyon oranları üzerinde de önemli bir etki göstermiştir. Meydana gelen kütle kaybı oldukça azdır. Partikül gömülmesine yol açan proses parametrelerini belirlemek için yapılmış literatür çalışmaları mevcuttur. Partikül boyutunun artması (daha yüksek kinetik enerjili büyük partiküllerin çarpması) metalik hedeflerde gömülmenin artmasına yol açmaktadır (Day, Huang ve Richards, 2005; Akbarzadeh, Elsaadawy, Sherik, Spelt ve Papini, 2012; Hadavi ve diğ., 2019). Literatür çalışmaları, gömülmenin nispeten düşük hızda çarpan küçük partiküller ile de meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Getu, Spelt ve Papini, (2012), gömülme için minimum eşik hızının, gelen parçacığın hız vektörü çarpan parçacığın ana eksenine ile hizalandığında meydana geldiğini varsaymıştır. Çarpma açısı da parçacıkların gömülmesini etkileyen önemli bir faktördür ve maksimum gömülme dik gelişte meydana gelmektedir (Getu ve diğ., 2012; Hadavi ve Panini, 2015). Şekil 8'de verilen  $60^\circ$  çarpma açısında KPE testi sonrası SEM görüntüsü incelendiğinde aşındırıcı partikül gömülmesinin yanı sıra atma, oyuklanma ve pullanma şeklinde hasarlar meydana geldiği görülmektedir. Şekil 9'da verilen  $90^\circ$  çarpma açısında KPE testi sonrası SEM görüntüsünde ise aşındırıcı partikül gömülmesinin yanı sıra oyuklanma şeklinde hasar olduğu fark edilmektedir.



Şekil 7.  $30^\circ$ 'lik çarpma açısı ile KPE testine tabi tutulan NiCr kaplamasının a) üst yüzey SEM görüntüleri (500 ve 3000 büyütme), b) elementel haritalama ve EDS analizi



Şekil 8. 60°'lik çarpma açısı ile KPE testine tabi tutulan NiCr kaplamaların a) üst yüzey SEM görüntüleri (500 ve 3000 büyütme), b) elementel haritalama ve EDS analizi



Şekil 9. 90°'lik çarpma açısı ile KPE testine tabi tutulan NiCr kaplamaların a) üst yüzey SEM görüntüleri (500 ve 3000 büyütme), b) elementel haritalama ve EDS analizi

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 316L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine NiCr kaplamalar üretilerek 30°, 60° ve 90° çarpma açıları KPE davranışları SEM, elementel haritalama ve 3D profilometre analizleri ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- HVOF termal sprey kaplama yöntemi kullanılarak NiCr kaplamalar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Kaplama yapısı geleneksel HVOF karakteristik mikroyapısına sahip ve yoğun niteliktedir.
- NiCr kaplamaların KPE testleri neticesinde en yüksek katı partikül erozyon oranı 60°'lik çarpma açısında gerçekleşmiş, bu değeri sırasıyla 30° ve 90°'lik çarpma açılarındaki erozyon oranları izlemiştir. KPE testleri sonrasında SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplama yüzeylerine aşındırıcı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin gömüldüğü görülmüştür. NiCr kaplamalar, aşındırıcı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülünün

gömülmesi nedeniyle oldukça az kütle kaybı göstermiştir.

- En yüksek pürüzlülük değeri 60°'lik çarpma açısında elde edilmiş ve bu değeri 90° ve 30° çarpma açıları izlemektedir.
- Yüksek erozyon oranları pürüzlülük değerini artırırken, düşük erozyon oranları pürüzlülük değerini azaltmaktadır. Aşındırıcı partikül gömülmesinin, erozyon oranlarını azalttığı ve yüzey pürüzlülüğünde değişimlere neden olduğu öngörülmektedir. Aşındırıcı partikül gömülmesinin yanı sıra 60° çarpma açısında KPE testi sonrası kaplamada atma, oyuklanma ve pullanma şeklinde, 90° çarpma açısında ise oyuklanma şeklinde hasarlar meydana geldiği görülmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021-FEN-A-009' nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Sefa Erdem YILMAZ, deneylerin gerçekleştirilmesinde ve bilgisayar ortamına aktarılmasında, Gülfem BİNAL, literatür araştırmasında, sonuçların değerlendirilmesi, yorumlanması ve yazımında, Yasin ÖZGÜRLÜK, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımında, Derviş ÖZKAN, özgün değerlerinin ortaya konulması, deneylerin tasarlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımında, Abdullah Cahit KARAOĞLANLI, özgün değerlerinin ortaya konulması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı konularında katkı sağlamışlardır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- Akbarzadeh, E., Elsaadawy, E., Sherik, A. M., Spelt, J. K., Papini, M. (2012). The solid particle erosion of 12 metals using magnetite erodent. *Wear*, 282, 40-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.01.021>
- Binal, G. (2023). Isothermal oxidation and hot corrosion behavior of HVOF sprayed 80Ni-20Cr coatings at 750° C. *Surface and Coatings Technology*, 454, 129141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129141>
- Bousser, E., Martinu, L., Klemberg-Sapieha, J. E. (2014). Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications. *Surface and*

- Coatings Technology*, 257, 165-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.037>
- Chen, Q., Li, D. Y. (2003). Computer simulation of solid particle erosion. *Wear*, 254(3-4), 203-210. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00006-1)
- Day, J., Huang, X., Richards, N. L. (2005). Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods. *Journal of Thermal Spray Technology*, 14, 471-479. doi: 10.1361/105996305X76469
- Debasish, D., Panigrahi, A., Sengupta, P., Bajpai, S. (2022). Erosive wear characteristic of Mo-TiN composite coatings on turbocharger compressor wheel using Taguchi experimental design. *Materials Today: Proceedings*, 66, 534-539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.114>
- Derelizade, K., Rincon, A., Venturi, F., Wellman, R.G., Kholobystov, A., Hussain, T. (2022). High temperature (900 C) sliding wear of CrNiAlCY coatings deposited by high velocity oxy fuel thermal spray. *Surface and Coatings Technology*, 432, 128063. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128063>
- Getu, H., Spelt, J. K., Papini, M. (2012). Conditions leading to the embedding of angular and spherical particles during the solid particle erosion of polymers. *Wear*, 292, 159-168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.017>
- Guduru, R. K., Dixit, U., Kumar, A. (2022). A critical review on thermal spray based manufacturing technologies. *Materials Today: Proceedings*, 62(13), 7265-7269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.107>
- Hadavi, V., Arani, N. H., Papini, M. (2019). Numerical and experimental investigations of particle embedment during the incubation period in the solid particle erosion of ductile materials. *Tribology International*, 129, 38-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.013>
- Hadavi, V., Papini, M. (2015). Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials. *Wear*, 342, 310-321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.09.008>
- Karaoglanli, A. C. (2023). Structure and durability evaluation of blast furnace slag coatings and thermal barrier coatings (TBCs) under high temperature conditions. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129087. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129087>
- Li, M., Christofides, P.D. (2009). Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18, 753-768. doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9309-2>
- Molinari, J. F., Ortiz, M. (2002). A study of solid-particle erosion of metallic targets. *International Journal of Impact Engineering*, 27(4), 347-358. doi: [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00055-0)
- Odabas, O., Ozgurluk, Y., Ozkan, D., Binal, G., Calis, I., Karaoglanli, A.C. (2022). Investigation of vermiculite infiltration effect on microstructural properties of thermal barrier coatings (TBCs) produced by electron beam physical vapor deposition method (EB-PVD). *Surface and Coatings Technology*, 443, 128645. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128645>
- Ozgurluk, Y. (2022). Investigation of oxidation and hot corrosion behavior of molybdenum coatings produced by high-velocity oxy-fuel coating method. *Surface and Coatings Technology*, 444, 128641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128641>
- Ozkan, D. (2023). Structural characteristics and wear, oxidation, hot corrosion behaviors of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr hardmetal coatings. *Surface and Coatings Technology*, 457, 129319. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129319>
- Özkan, D., Erdoğan, G., Özgurluk, Y., Binal, G., Yılmaz, S. E., Karaoglanli, A. C. (2023). YSZ seramik üst kaplamaya sahip termal bariyer kaplamaların (TBCs) katı partikül erozyon (SPE) davranışlarının incelenmesi. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 4(1), 100-115. doi: <https://doi.org/10.55546/jmm.1232869>
- Pradeep, D. G., Venkatesh, C. V., Nithin, H. S. (2022). Review on Tribological and Mechanical Behavior in HVOF Thermal-sprayed Composite Coatings. *Journal of Bio and Tribo Corrosion*, 8, 30. doi: <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00631-x>
- Prashar, G., Vasudev, H. (2022). A review on the influence of process parameters and heat treatment on the corrosion performance of Ni-based thermal spray coatings. *Surface Review and Letters*, 29(01), 2230001. doi: <https://doi.org/10.1142/S0218625X22300015>
- Ramesh, M. R., Prakash, S., Nath, S. K., Sapra, P. K., Venkataraman, B. (2010). Solid particle erosion of HVOF sprayed WC-Co/NiCrFeSiB coatings. *Wear*, 269(3-4), 197-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.019>

- Sidhu, H. S., Sidhu, B. S., Prakash, S. (2006). Comparative characteristic and erosion behavior of NiCr coatings deposited by various high-velocity oxyfuel spray processes. *Journal of materials engineering and performance*, 15, 699-704. doi: 10.1361/105994906X150713
- Sidhu, H. S., Sidhu, B. S., Prakash, S. (2007). Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite-6 coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(2), 232-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.035>
- Sundararajan, G., Roy, M. (1997). Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures. *Tribology international*, 30(5), 339-359. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(96\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(96)00064-3)
- Swain, B., Mantry, S., Mohapatra, S. S., Mishra, S. C., Behera, A. (2022). Investigation of Tribological Behavior of Plasma Sprayed NiTi Coating for Aerospace Application. *Journal of Thermal Spray Technology* 31, 2342-2369. doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01452-7>
- Tan, J. C., Looney, L., Hashmi, M. S. J. (1999). Component repair using HVOF thermal spraying. *Journal of Materials Processing Technology*, 92, 203-208. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00113-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00113-2)
- Tewari, U. S., Harsha, A. P., Häger, A. M., Friedrich, K. (2003). Solid particle erosion of carbon fibre-and glass fibre-epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 63(3-4), 549-557. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00210-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00210-5)
- Thakur, L., Arora, N. (2013). Solid particle erosion behavior of WC-CoCr nanostructured coating. *Tribology Transactions*, 56(5), 781-788. doi: <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.797532>
- Vicenzi, J., Marques, C. M., Bergmann, C. P. (2008). Hot and cold erosive wear of thermal sprayed NiCr-based coatings: influence of porosity and oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 202(15), 3688-3697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.01.010>
- Wang, Y. F., Yang, Z. G. (2008). Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*, 265(5-6), 871-878. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.014>
- Yılmaz, S. E. (2023). HVOF tekniği kullanılarak üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların katı partikül erozif aşınma davranışlarının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın.
- Zhang, H., Dong, X., Chen, S. (2017). Solid particle erosion-wear behaviour of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating on Ni-based superalloy. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(3), 1-9. doi: 10.1177/1687814017694580