



SELÇUK  
ÜNİVERSİTESİ

T.C.  
SELÇUK ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC)  
KATI PARTİKÜL EROZYONU, SICAK  
KOROZYON VE TERMAL ÇEVİRİM  
DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mustafa KAPLAN

DOKTORA TEZİ

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim  
Dalı

Mayıs-2017  
KONYA  
Her Hakkı Saklıdır

## TEZ KABUL VE ONAYI

Mustafa KAPLAN tarafından hazırlanan "Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Katı Partikül Erozyonu, Sıcak Korozyon ve Termal Çevrim Davranışlarının İncelenmesi" adlı tez çalışması 23/05/2017 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

### Jüri Üyeleri

#### Başkan

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

#### Danışman

Prof. Dr. Mesut UYANER

#### Üye

Prof. Dr. Mustafa ACARER

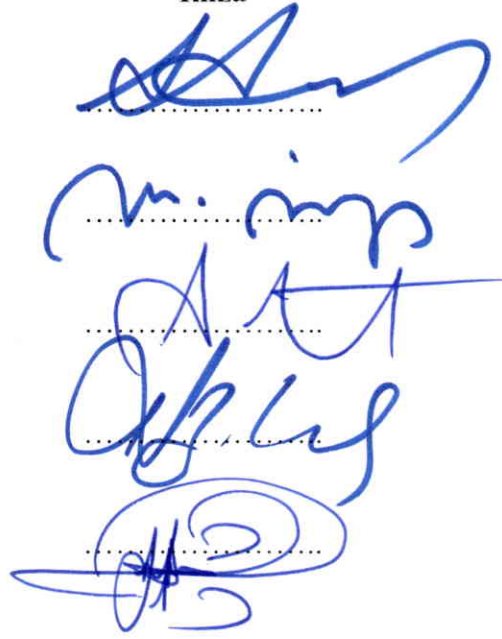
#### Üye

Yrd. Doç. Dr. Hakan Burak KARADAĞ

#### Üye

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

### İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Mustafa YILMAZ  
FBE Müdürü

\*Bu tez çalışması TÜBİTAK tarafından 113R049 nolu proje ve SÜBAP tarafından 15201071 nolu proje ile desteklenmiştir.

\*\*Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI bu tez çalışmasının ikinci danışmanıdır.

## TEZ BİLDİRİMİ

Bu tezdeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edildiğini ve tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

## DECLARATION PAGE

I hereby declare that all information in this document has been obtained and presented in accordance with academic rules and ethical conduct. I also declare that, as required by these rules and conduct, I have fully cited and referenced all material and results that are not original to this work.



Mustafa KAPLAN

Tarih: 23.05 2017

# ÖZET

## DOKTORA TEZİ

### TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN (TBC) KATI PARTİKÜL EROZYONU, SICAK KOROZYON VE TERMAL ÇEVİRİM DAVRANIŞLARININ İNCELENMESİ

Mustafa KAPLAN

Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü  
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Prof. Dr. Mesut UYANER

2. Danışman: Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI

2017, 156 Sayfa

Jüri

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Prof. Dr. Mesut UYANER

Prof. Dr. Mustafa ACARER

Yrd. Doç. Dr. Hakan Burak KARADAĞ

Yrd. Doç. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ

Bu çalışmada, CoNiCrAlY bağ ve YSZ ( $ZrO_2+Y_2O_3$ ) üst kaplama içeriğine sahip olan termal bariyer kaplama (TBC) sistemleri incelenmiştir. TBC'lerin üretimi, Ni esaslı Inconel 718 süper alaşım altlık malzeme üzerine atmosferik plazma sprej (APS) tekniği kullanılarak metalik bağ ve seramik üst kaplamaların biriktirilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Üretilen TBC'ler 1150 °C sıcaklıkta termal çevrim ve 1000 °C sıcaklıkta sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. TBC'lerin erozif aşınma testleri ise farklı partikül çarpma açılarında (30°, 60° ve 90°) katı partiküllerin gönderilmesi ile gerçekleştirilmiştir. Termal çevrim testleri sonucunda TBC'ler 40 çevrim ardından ve sıcak korozyon testleri sonucunda ise 48 çevrim ardından hasara uğramıştır. Katı partikül erozyonu testlerinde en yüksek erozyon oranı 60°'lik çarpma açısında gerçekleşmiş olup yarı-gevrek/yarı-sünek davranış gözlenmiştir. Termal çevrim, sıcak korozyon ve katı partikül erozyonu testleri sonucunda TBC'lerde meydana gelen hasar mekanizmalarının tespiti ve ayrıntılı değerlendirilmelerinin yapılabilmesi amacıyla, taramalı elektron mikroskobu (SEM), elementel-haritalama (EDX), enerji dağılım spektrometresi (EDS), X-ışınları difraksiyonu (XRD), 3D optik profilometre analizleri ve ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, literatürde yapılan güncel çalışmalarla karşılaştırılarak ayrıntılı olarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Atmosferik Plazma Sprej (APS), Katı Partikül Erozyonu, Sıcak Korozyon, Termal Çevrim, Termal Bariyer Kaplamalar (TBC)

## **ABSTRACT**

### **Ph.D. THESIS**

# **INVESTIGATION OF THERMAL BARRIER COATINGS (TBC) OF SOLID PARTICLE EROSION, HOT CORROSION AND THERMAL CYCLE BEHAVIORS**

**Mustafa KAPLAN**

**THE GRADUATE SCHOOL OF NATURAL AND APPLIED SCIENCE OF  
SELÇUK UNIVERSITY  
THE DEGREE OF DOCTOR OF PHILOSOPHY IN METALLURGICAL AND  
MATERIALS ENGINEERING**

**Advisor: Prof. Dr. Mesut UYANER  
2nd Advisor: Assist. Prof. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI**

**2017, 156 Pages**

#### **Jury**

**Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN  
Prof. Dr. Mesut UYANER  
Prof. Dr. Mustafa ACARER  
Assist. Prof. Dr. Hakan Burak KARADAĞ  
Assist. Prof. Dr. Mehmet Turan DEMİRCİ**

In this study, thermal barrier coating (TBC) systems with CoNiCrAlY bond and YSZ ( $ZrO_2+Y_2O_3$ ) top coating were investigated. The production of TBCs was accomplished by depositing metallic bond and ceramic top coatings on Ni-based Inconel 718 superalloy substrate by using atmospheric plasma spray (APS) technique. The produced TBCs were subjected to thermal cycling at 1150 °C and hot corrosion tests at 1000 °C. The erosive abrasion tests of the TBCs were carried out by delivering solid particles at various particle impingement angles (30°, 60° and 90°). TBCs damaged with 25% cracking of top coat after 40 cycles and 48 cycles in the thermal cycle and hot corrosion tests, respectively. The maximum erosion rates occurred at 60° impingement angle which is an indication of semi-ductile/semi-brittle erosion behavior. After thermal cycling, hot corrosion and solid particle erosive wear tests, analyzes and measurements were carried out with scanning electron microscopy (SEM), elemental-mapping (EDX), energy dispersive spectrometry (EDS), X-ray diffraction (XRD), and 3D optical profilometer in order to detect and make comprehensive assessments of failure mechanisms occurring in TBCs. The obtained results were evaluated in comparison with recent studies in the literature.

**Keywords:** Atmospheric Plasma Spraying (APS), CoNiCrAlY, Hot Corrosion, Solid Particle Erosion (SPE), Thermal Barrier Coatings (TBC), Thermal Cycling, Thermally Grown Oxide (TGO), Yttria Stabilized Zirconia (YSZ)

## ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında en çok emeği geçen, çok değerli yardım ve yönlendirmelerini eksik etmeyen, her türlü destek ve tecrübelerini esirgemeyerek, çalışmalarım esnasında karşılaştığım sorunları sabırla dinleyen ve çözüm yolları hususunda yön veren başta doktora tez danışmanlarım Prof. Dr. Mesut UYANER ve Yrd. Doç. Dr. Abdullah Cahit KARAOĞLANLI 'ya ve doktora tez komitesi üyeleri Prof. Dr. Mustafa ACARER ve Yrd. Doç. Dr. Hakan Burak KARADAĞ' a teşekkürü bir borç bilirim.

Deneysel çalışmalarımın önemli bir bölümünü oluşturan erozif aşınma testlerinin gerçekleştirilmesinde her türlü yardımı ve bilgiyi esirgmeden benimle paylaşan Kocaeli Üniversitesi öğretim üyelerinden Yrd. Doç. Dr. Egemen AVCU ve Arş. Gör. Yasemin YILDIRAN AVCU'ya ve çalışma arkadaşlarımız Okan YETİK ve Berzah YAVUZYEGİT'e teşekkürü bir borç bilirim.

Bartın üniversitesinde yaptığım çalışmalarımda değerli katkılarından dolayı çalışma arkadaşlarım Arş. Gör. Kadir Mert DÖLEKER, Arş. Gör. Yasin ÖZGÜRLÜK ve Arş. Gör. Mecit ÖGE'ye teşekkür ederim.

Hayatım boyunca her türlü fedakârlıkla bir an bile kaçınmayan ve bu güne gelmemde büyük emekleri olan saygı değer peder ve valideme sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

En büyük destekçim olan ve tüm sıkıntılarımı paylaşarak desteğini her zaman bana hissettiren, her türlü sıkıntıları üzerine almak suretiyle bana çalışma imkânı sunan, hayat arkadaşım, sevdiceğim, canım refika-i hayatıma minnettar olduğumu ifade eder, bu tezin ortaya konmasında anlayışından, desteğinden ve fedakârlığından dolayı şükranlarımı sunarım. Tez çalışmalarım süresince uzak kaldığım zamanlarda “gel baba gel baba” diye kendi lisanıyla babasını çağıran canım oğlum Ahmed Said'e de ayrıca teşekkür ederim.

Bu çalışma TUBİTAK tarafından 113R049 nolu proje ve Selçuk Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü tarafından 15201071 nolu proje ile desteklenmiştir.

Mustafa KAPLAN  
KONYA-2017

# İÇİNDEKİLER

<b>ÖZET .....</b>	<b>iv</b>
<b>ÖNSÖZ .....</b>	<b>vi</b>
<b>İÇİNDEKİLER .....</b>	<b>vii</b>
<b>SİMGELER VE KISALTMALAR .....</b>	<b>x</b>
<b>1. GİRİŞ .....</b>	<b>1</b>
1.1 Genel Hedefler ve Çalışmanın Amacı .....	3
<b>2. TERMAL SPREY KAPLAMALAR.....</b>	<b>5</b>
2.1 Termal Sprey Kaplama Teknikleri .....	5
2.1.1 Plazma sprej kaplamalar .....	8
2.1.2 Yüksek hız-oksi asetilen yakıt (HVOF) kaplamalar .....	13
2.1.3 Termal sprej kaplama yöntemlerinin karşılaştırılması.....	15
<b>3. TERMAL BARIYER KAPLAMALAR (TBCs) .....</b>	<b>17</b>
3.1. TBC Sistemi ve Bileşenleri.....	17
3.1.1 Altık malzemeleri .....	18
3.1.2 Bağ kaplama .....	19
3.1.3 Üst kaplama .....	20
3.2 TBC'lerin Hasar Mekanizmaları .....	22
3.2.1 Termo-mekanik hasar .....	24
3.2.2 Kimyasal hasar.....	25
3.2.3 Sıcak korozyon hasarı.....	26
3.2.4. Termal çevrim hasarı .....	30
3.2.5 Katı partikül erozyonu hasarı.....	31
<b>4. MATERYAL VE YÖNTEM.....</b>	<b>34</b>
4.1 Amaç.....	34
4.2 Toz ve Altık Malzemelerin Karakterizasyonu.....	35
4.3 Toz Malzemelerin Partikül Boyutu Dağılımı Analizleri.....	36
4.5 Toz Malzemelerin Mikroyapısal Karakterizasyonu .....	36
4.6 Altık Malzemelerin Kimyasal Kompozisyonu .....	38
4.7 TBC'lerin Üretilmesi .....	38
4.8 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri .....	39

4.9 Altlık ve Kaplamaların Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri .....	40
4.10 Bağ ve Üst Kaplamaların Üretilmesine Kullanılan Sprey parametreleri.....	40
4.11 TBC'lerin Karakterizasyonu.....	41
4.12 Sıcak Korozyon Testleri .....	42
4.13 Termal Çevrim Testleri.....	45
4.14 TBC'lerin Katı Partikül Erozyonu Testleri.....	48
4.14.1 Katı partikül erozyonu test düzeneği .....	49
4.15.2 Katı partikül erozyonu oranının hesaplanması .....	51
4.14.3 Yüzey pürüzlülük değerleri ve topografyasının incelenmesi .....	51
4.15 TBC'lerin Yüzey Morfolojilerinin SEM İle İncelenmesi.....	53
<b>5. DENEYSSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA .....</b>	<b>54</b>
5.1 APS Yöntemi İle Üretilen TBC'lerin Mikroyapısal Karakterizasyonu.....	54
5.1.1 TBC'lerin porozite içerikleri .....	57
5.1.2. Bağ ve Üst Kaplamaların XRD Analizleri .....	58
5.4 TBC'lerin Sıcak Korozyon Davranışları .....	59
5.4.1 Sıcak korozyon deneyinde kullanılan TBC'lerin mikroyapısal karakterizasyonu .....	60
5.4.2 TBC'lerin sıcak korozyon sonrası mikroyapısal özellikleri .....	61
5.4.3 TBC'lerin sıcak korozyon sonrası XRD analizleri .....	86
5.5 TBC'lerin Termal Çevrim Davranışları.....	87
5.5.1 TBC'lerin termal çevrim testi sonrası mikroyapısal özellikleri.....	87
5.5.2 TBC'lerin termal çevrim testi sonrası XRD analizleri .....	91
5.6 TBC'lerin Katı Partikül Erozyonu Davranışları .....	92
5.6.1 Eroziyon aşınma oranının değişimi .....	92
5.6.2 Yüzey pürüzlülük değerleri ve topografyasının analizi.....	94
5.6.3 Çizgisel pürüzlülük değerlerinin değişimi .....	95
5.6.4 Alansal pürüzlülük değerlerinin değişimi.....	97
5.6.5 Üç boyutlu (3B) yüzey topografyalarının değişimi .....	99
5.6.6 TBC'lerin katı partikül erozyonu sonrası mikroyapısal incelemeleri.....	102
5.5. TBC'lerin Sıcak Korozyon Sonrası Mikroyapısal Davranışların İrdelenmesi .....	109



5.6. TBC'lerin Termal Çevrim Testi Sonrası Mikroyapısal Değişim, TGO Oluşum ve Büyüme Davranışlarının İrdelenmesi .....	115
5.7. TBC'lerin Katı Partikül Erozyonu Testleri Sonrası Eroziyon Davranışlarının İrdelenmesi.....	119
<b>6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER .....</b>	<b>127</b>
6.1 Genel Sonuçlar.....	127
6.2 Öneriler .....	131
<b>KAYNAKLAR .....</b>	<b>132</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ .....</b>	<b>141</b>



## SİMGELER VE KISALTMALAR

### Simgeler

Al	:	Alüminyum
Ar	:	Argon
cm	:	santimetre
Ce	:	Seryum
Co	:	Kobalt
Cr	:	Krom
°C	:	Derece Selsiyus
DC	:	Doğru akım
dk	:	dakika
E	:	Erozyon oranı
°F	:	Derece Fahrenheit
GPa	:	Giga Pascal
H	:	Hidrojen
h	:	Derinlik
He	:	Helyum
Hf	:	Hafniyum
k	:	Kübik faz
K	:	Kelvin
La	:	Lantan
m	:	Monoklinik faz
mm	:	milimetre
mm/s	:	milimetre/saniye
MPa	:	Mega paskal
m <sub>e</sub>	:	Aşındırıcı kütlesi (mg)
Ni	:	Nikel
O	:	Oksijen
Rz	:	Yüzey profilinin pürüzlülük değeri
Ra	:	Yüzey profilinin ortalama pürüzlülüğü
Rv	:	Yüzey profilindeki maksimum çukur derinliği
Rp	:	Yüzey profilinin maksimum pürüz yüksekliği
Sa	:	Yüzey alanının ortalama pürüzlülüğü

Sv	:	Yüzey alanının maksimum çukur derinliği
Sp	:	Yüzey alanının maksimum pürüz yüksekliği
S	:	Kükürt
sn	:	Saniye
slpm	:	Standart litre/dakika
T	:	Sıcaklık
t	:	Tetragonal faz
t	:	Zaman
Th	:	Toryum
Ti	:	Titanyum
Tp	:	Numune yüzeyindeki sıcaklık
Tz	:	Numune merkezindeki sıcaklık
V	:	Volt
V	:	Partikül çarpma hızı ( $\text{ms}^{-1}$ )
V	:	Vanadyum
Y	:	Yitriyum
Zr	:	Zirkonyum
$\mu\text{m}$	:	Mikrometre
$\dot{m}$	:	Aşındırıcı partikülün kütleli debisi (g/s)
$\Delta m$	:	Örnek numunenin kütle kaybı (mg)
$\gamma$	:	Gama
$\beta$	:	Beta
$\alpha$	:	Alfa
$\theta$	:	Teta
$\alpha$	:	Isıl genleşme katsayısı
$\sigma$	:	Gerilme

#### **Kısaltmalar**

APS	:	Atmosferik Plazma Sprey
ASTM	:	Amerikan malzeme test birliği
BC	:	Bağ kaplama
BSE	:	Back Scatter Electrons (Geri Saçılan Elektron)
CGDS	:	Soğuk gaz-dinamik sprej

CMAS	:	CaO-MgO-Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -SiO <sub>2</sub>
CoNiCrAlY	:	Kobalt-Nikel-Krom-Alüminyum-Yitriya
CSZ	:	Serya ile stabilize edilmiş zirkonya
D-Gun	:	Detonasyon Tabancası
DIN	:	Alman Standartlar Enstitüsü
EB-PVD	:	Elektron-ışını fiziksel buhar biriktirme
EDS	:	Enerji Dağılım Spektrometresi
EDX-mapping	:	Elementel haritalama
FCT	:	Fırın çevrim testi
HMK	:	Hacim Merkezli Kübik
HPPS	:	Yüksek güç plazma sprej
HVOF	:	Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme
LPPS	:	Düşük Basıncılı Plazma Sprej
MCrAlY	:	Metal Krom Alüminyum İttriya
OM	:	Optik mikroskop
PS	:	Plazma sprej
PVD	:	Fiziksel buhar biriktirme
SE	:	Secunder Electrons (İkincil Elektron)
SEM	:	Taramalı elektron mikroskobu
Sermet	:	Seramik + metal
TBC	:	Termal bariyer kaplama
TC	:	Üst kaplama
TGO	:	Termal olarak büyüyen oksit tabaka
XRD	:	X-ışınları difraksiyonu
VPS	:	Vakum Plazma Sprej
YMK	:	Yüzey Merkezli Kübik
YSZ	:	Yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya

## 1. GİRİŞ

Yüzey mühendisliği alanında son yıllarda büyük ilerlemeler kaydedilmiştir. Hammadde, enerji sorunu ve kaynakların kısıtlı olması bu ilerlemeleri daha da önemli hale getirmiştir. Endüstriyel uygulamalarda aşınmanın ve korozyonun yol açtığı doğrudan ve dolaylı maliyetleri düşürmede yüzey mühendisliği ve uygulamalarının rolü büyüktür. Bu amaçla kullanılan yüzey işlemleri, malzemelere yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma, korozyon, sürünme ve yorulma dayanımı sağlama, tasarım esnekliği kazandırma gibi birçok olumlu etkilerinden dolayı endüstriyel birçok alanda uygulanmaya gelmiştir.

Günümüzde teknolojinin hızla ilerlemesiyle ağırlaşan çalışma koşullarında kullanılan daha çok metal ve alaşımlardan imal edilen makina yapı elemanları özellikle oksidasyon, termal çevrim, erozif aşınma, korozyon, yorulma ve yüksek sıcaklığa dayanım gibi konulardaki talepleri karşılamakta yetersiz kalmaktadır.

Korozyon, özellikle metal ve alaşımlarında büyük ekonomik kayıplara yol açmaktadır. Bunun yanı sıra metal cevherlerinin yeryüzünde kullanımı da azalmaktadır. Metaller alternatif olarak plastik, kompozit seramik gibi malzemelerin kullanımı gündeme gelse de hala metal ve alaşımlarının kullanımından vazgeçilemeyen alanlar vardır. Yüksek sıcaklık ve basınçta çalışan enerji makinelerinde özellikle süper alaşım metalleri kullanılmaktadır. Bu malzemelerinin performansını artırmak ve kullanıldıkları motor, türbin gibi makine parçaların yüksek sıcaklıkta verimlerini artırmak için bu malzemelere seramik esaslı malzemeler kaplanmaya başlanmıştır.

Genellikle mühendislikte kullanılan malzemelerden; iletkenlik, yarı iletkenlik, süper iletkenlik, yalıtkanlık, manyetik, optik, biyo-uyumluluk ve ısıl özellikler gibi yüzey özelliklerin yanında, malzemenin kullanım süresi ile ilgili olarak aşınma, erozyon, yorulma, sürünme ve korozyon dayanımı gibi özellikler de istenmektedir. Yukarıda sayılan özelliklerin tümünü bir malzemenin beklemek ekonomik olmaz. Bu yüzden tasarlanan parça için kullanılması düşünülen malzemenin harcıâlem bir malzemenin olması bu malzemenin karşılaması beklenen diğer özellikleri de yüzeylerinin kaplaması suretiyle temin edilmesi en uygun çözümdür.

Mühendislik malzemelerinin tasarım aşamasında; kütleli özelliklerinin yanında, aynı zamanda yüzey karakteristiklerini de dikkate almak gerekmektedir. Özellikle aşınmaya dirençli parçaların tasarımında önem arz eden malzeme yüzeyi, agresif çalışma ortamında çeşitli mühendislik fonksiyonlarını yerine getirmelidir. Sonuçta; bir

malzemenin davranışlarının çoğunlukla malzeme yüzeyine, yüzey temas alanına ve malzemenin çalıştığı ortama bağlı olduğunu söylemek mümkündür (Nicholls, 2000).

Hali hazırda kullanılan kaplama teknolojileri arasında termal sprey kaplama teknolojisi; endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmakla birlikte çok sayıda farklı yöntemin oluşturduğu bir kaplama teknolojisinin genel bir ismidir. Termal sprey kaplama teknolojisinin genel olarak uygulanma amacı; metal ve alaşım yüzeylerinde ince koruyucu değeri yüksek ve aşınmaya dayanıklı bir kaplama tabakası meydana getirmektir (Dusa, 1997; Tucker, 2002). Seramik esaslı malzemelerin, metalik malzemelere göre düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip olması, oksitlenme ve korozyona karşı daha yüksek dirence sahip olması sebebiyle kaplamalarda denenmesi gündeme gelmiş ve TBC'lerin keşfi gerçekleşmiştir. TBC'ler uzay ve havacılık endüstrisinde, yüksek sıcaklığa maruz kalan parçalara uygulanan ve son yıllarda giderek yaygınlaşan bir kaplama teknolojisidir.

Özellikle uzay ve havacılık endüstrisinde malzemelerin yüksek sıcaklık çalışma koşulları altında oksitlenme, sürünme ve korozyon dirençlerini iyileştirmek ve erozif aşınma dayanımlarını artırmak büyük önem arz etmektedir. Meydana gelen sıcaklık artışı oksitlenme, sıcak korozyon, sürünme ve termal yorulma gibi koşullara dayanıklı malzeme arayışını da beraberinde getirmektedir. Örneğin, günümüz gaz türbinlerinde kullanılan türbin bıçağı ve kanatçıkları gibi parçaların yüksek sıcaklık etkilerinden korunmasının sağlanması ve türbin verimliliğinin artırılması amacıyla Termal Bariyer Kaplama (TBC) sistemleri geliştirilmiştir (Karaoglanli, 2015). TBC'ler yaygın olarak uçak endüstrisinde de gaz türbin bıçaklarında, vanalarda ve motorların yanma odalarında uygulanmaktadır (Lugscheider ve ark., 2000).

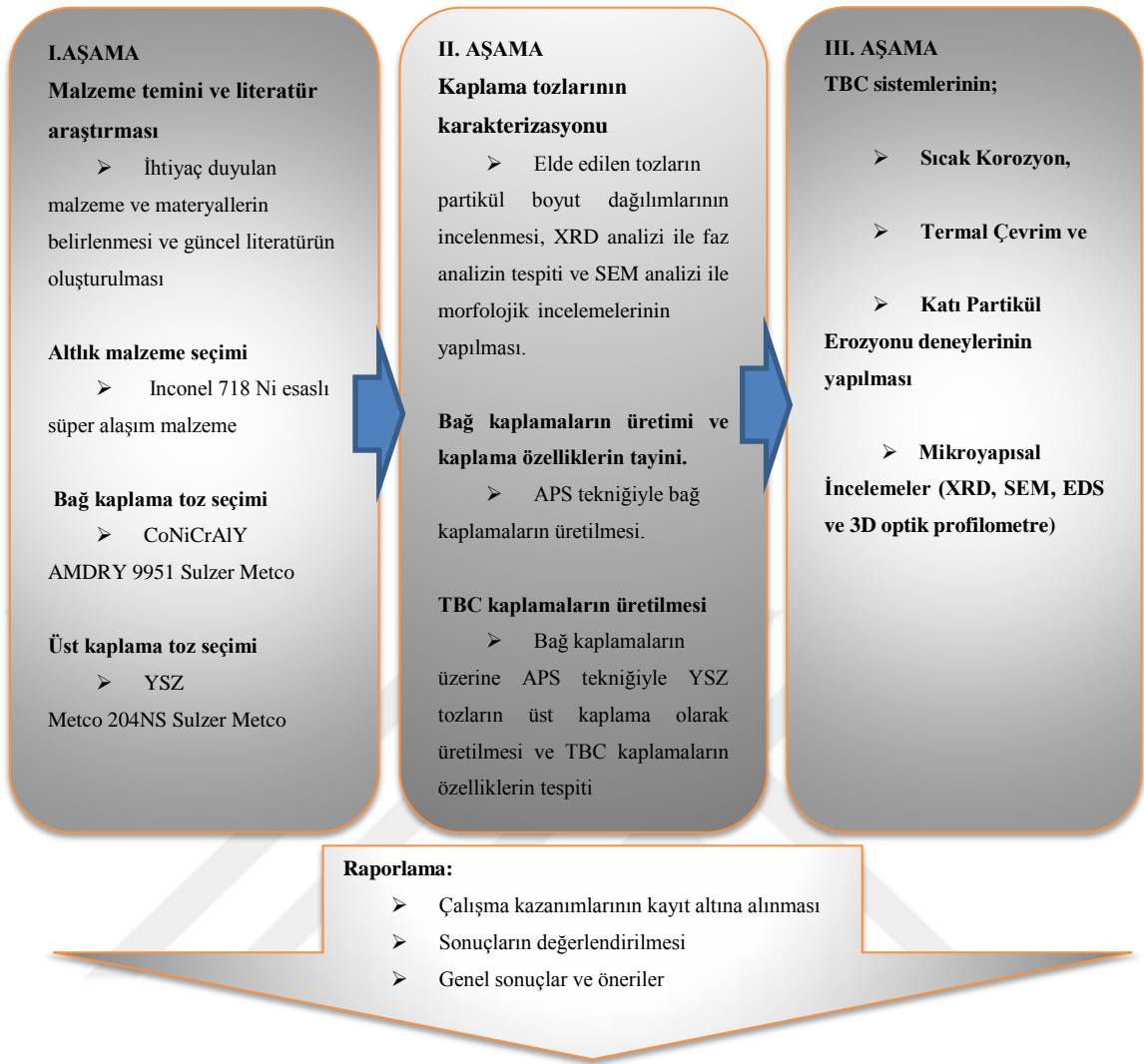
TBC'ler yüksek sıcaklığa maruz kalan iş parçalarının yüzeyden itibaren sıcaklığını düşürürler. Dolayısıyla motor performanslarında artış sağlamaktadırlar (Osorio ve ark., 2012). TBC'ler daha çok Ni esaslı süperalaşım altlık, bağ tabaka, bağ tabaka ile üst tabaka ara yüzeyinde oluşan TGO yapısı ve seramik üst kaplamadan meydana gelir. TBC'ler ısı yalıtım sağlayan üst kaplamada yaygın olarak yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ), YSZ + Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> veya serya ile stabilize edilmiş zirkonya (CSZ) gibi seramik içerikli malzemeler kullanılmaktadır (Wang ve ark., 2014; Kakuda ve ark., 2015; Karaoglanli ve ark., 2015).

## 1.1 Genel Hedefler ve Çalışmanın Amacı

Bu tez çalışması kapsamında, Nikel esaslı süper alaşım Inconel 718 altlık üzerine, termal sprey kaplama yöntemlerinden Atmosferik Plazma Sprey (APS) tekniği kullanılarak metalik bir bağ kaplama ve bu bağ kaplamanın üzerine aynı teknik ile seramik üst kaplamalar üretilerek TBC'ler elde edilmiştir.

Inconel 718 altlık üzerine yaklaşık 100 µm kalınlığında CoNiCrAlY bağ kaplamalar ve üretilen bağ kaplamaların üzerine ise yaklaşık 300 µm kalınlığında yitriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) üst kaplamalar biriktirilerek TBC'lerin üretimleri gerçekleştirilmiştir. TBC'lerin; SEM, EDX-elementel/haritalama, EDS ve XRD testleri sonrasında mikroyapısal özellikleri belirlenerek birbirleriyle karşılaştırmaları yapılmıştır.

Doktora tez çalışması kapsamında, TBC'lerin ilk olarak 1000°C sıcaklıkta sıcak korozyon testleri, 1150 °C sıcaklıkta termal çevrim testleri ve son olarak ise 30°, 60° ve 90° partikül çarpma açılarında erozif aşınma başka bir deyişle katı partikül erozyonu testleri gerçekleştirilmiştir. Tez çalışması kapsamında izlenen yöntem ve çalışma planı Şekil 1.1'de verilmiştir.



**Şekil 0.1.** Tez çalışması kapsamında izlenen yöntem ve çalışma planı



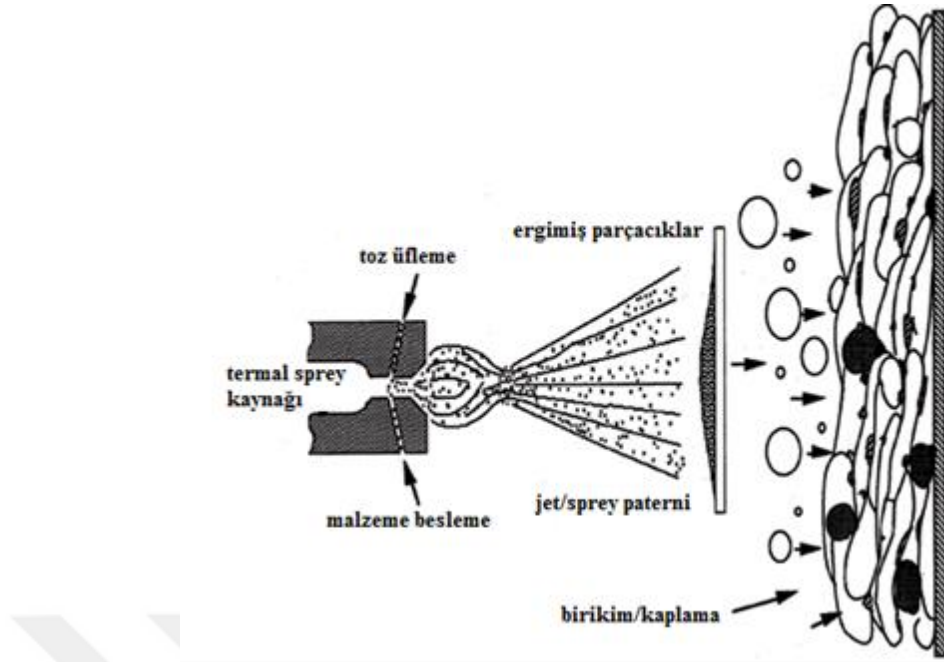
## 2. TERMAL SPREY KAPLAMALAR

### 2.1 Termal Sprey Kaplama Teknikleri

Günümüzde yüksek sıcaklıkta çalışan makina parçalarının; oksidasyon, sürünme, korozyon, erozif aşınma gibi özelliklerin iyileştirilmesi servis ömürlerinin artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Servis sırasında meydana gelen sıcaklık artışı oksidasyon, sıcak korozyon, sürünme ve termal yorulma gibi agresif çevre koşullarına karşı dayanımı olan malzeme arayışını da beraberinde getirmiştir. Bununla birlikte gaz türbinlerinde kullanılan türbin bıçağı ve kanatçıkları gibi parçalara yüksek sıcaklığın vermiş olduğu olumsuz etkiye karşı koruma sağlanması ve türbin verimliliğinin artırılması amaçlanmış ve TBC sistemleri geliştirilmiştir (Karaoglanlı, 2015).

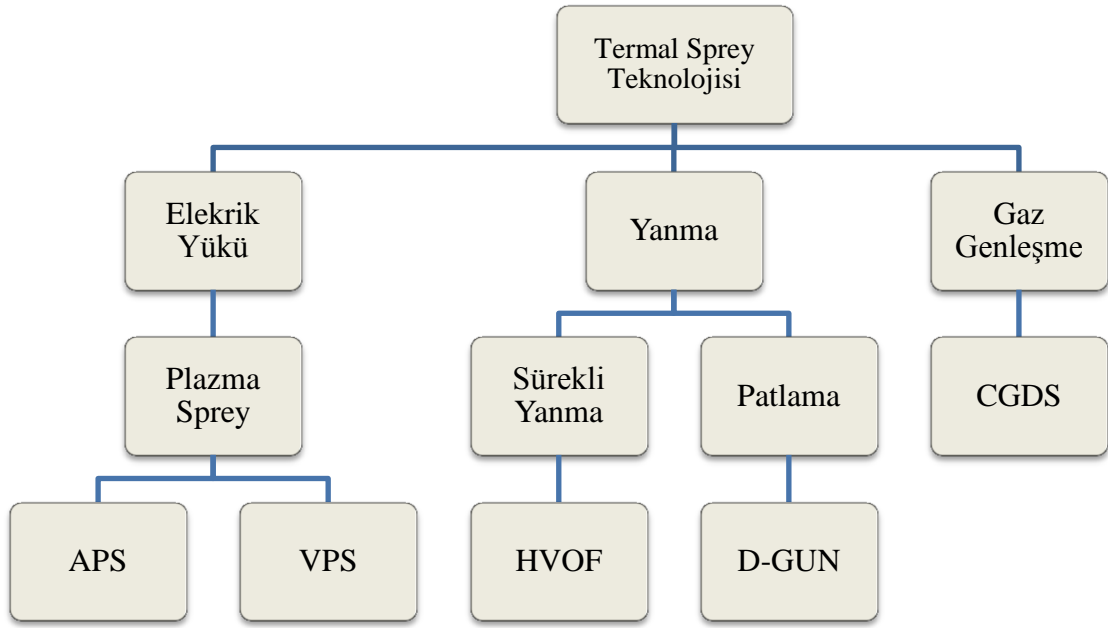
Kaplamalar; yüzeylerin aşınma, korozyon, termal bozunma ve diğer hasar mekanizmalarına karşı mühendislik çözümleri getirmektedir. Genellikle kabul edilebilir bir kaplamanın altlık malzemeye en iyi şekilde yapışması, altlıkla uyum sağlaması ve kaplama sonrası düşük gözenek ve oksit içeriği gibi özelliklere sahip olması beklenen en temel gereksinimlerdir (Hua ve ark., 2012).

Termal sprej teknolojisi, kaplama ile altlık arasındaki bu gereksinimleri önemli ölçüde karşılayabilen ve son zamanda artan oranda gelişme göstermiş olan farklı karakteristiklerdeki kaplama proseslerine verilen isimdir. Termal sprej kaplama prosesi ısı kaynağının vermiş olduğu etki ile altlık yüzeyine yüksek ısı ve/veya kinetik enerjiye sahip, erimiş veya yarı erimiş toz parçacıkların hazırlanmış yüzeye gönderilmesi esasına dayanmaktadır (Davis, 2004). Kaplama malzemesi çok yüksek bir enerji kaynağı ile erimiş veya yarı erimiş hale getirilerek kaplamanın yapılacağı altlık malzemesine biriktirilmesiyle kaplamanın üretimi gerçekleştirilmiş olur (Bose, 2007; Barton, 2016). Şekil 2.1'de kaplama tozlarının altlık yüzeyine ergiyerek çarpması sonucu oluşan birikme mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 0.1. Termal sprey işlem akışı ve katman birikimi şematik gösterimi (Bosscher, 2008)

Termal sprey teknolojisi ilk olarak alev sprey kaplamalar ile başlamıştır. İlk önceleri nispeten daha basit olan metal ve alaşımları kullanılarak şaft mili ve rulo gibi silindirik parçaların bakım ve onarımında uygulanmıştır. Termal sprey kaplama teknolojisi 1950'lerin ortalarından itibaren plazma sprey ve detonasyon tabancası uygulamaları ile önemli ilerlemeler göstermiştir. Termal sprey kaplamaların, proses için gerekli olan termal ve kinetik enerjileri elde etme yöntemlerine göre sınıflandırılması Şekil 2.2'de verilmektedir.



**Şekil 2.2.** Termal sprej kaplamaların, proses için gerekli olan termal ve kinetik enerjileri elde etme yöntemlerine göre sınıflandırılması (Pawlowski, 2008; Gupta, 2015)

1960'ların başında plazma arkı püskürtme ve elektrik ark sprej uygulamaları ile yaygın bir şekilde endüstriyel sanayide ticari olarak uygulanır hale gelmiştir. Termal sprej, demir ve çelik kaplamalardan çoğu metalleri içine alan, alaşımlar, seramikler, kompozitler, sermetler, polimerler ve nano malzemeler gibi birçok farklı malzeme türünde kullanılmaktadır. Petro-kimya endüstrisinden savunma, uzay ve havacılığa kadar birçok sektörde uygulanmaktadır. Cerrahi medikal aletler, tıbbi implant malzemeler, protez, tıbbi teşhis, türbin motoru kısımları, döküm ve kalıplama, kağıt yapım makineleri, baskı silindirleri, petrokimya ekipmanları, iletişim, elektronik aygıtlar gibi bir çok uygulama alanlarında kullanım alanı bulan bir kaplama teknolojisidir (Davis, 2004; Pawlowski, 2008; Yong Hu, 2012). Termal sprej kaplamaların üretimi üç ana aşamada gerçekleştirilmektedir.

Bu aşamalar;

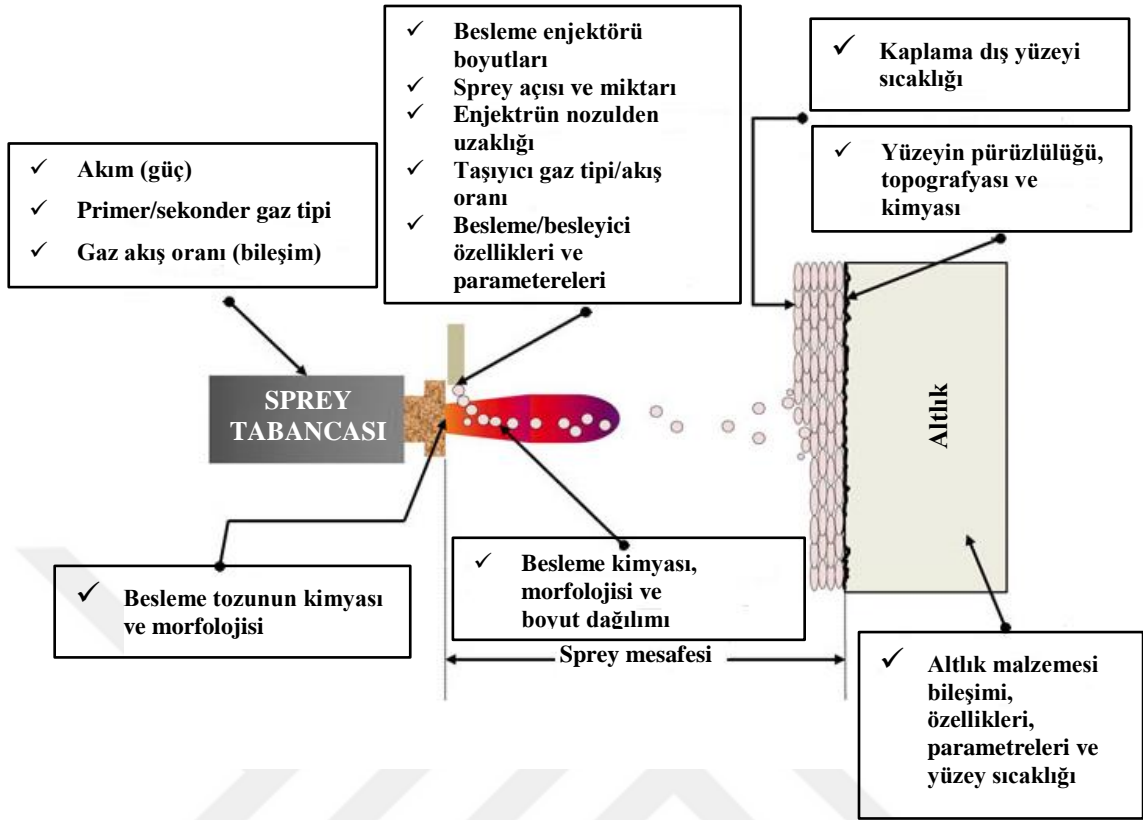
- i. Amaca en uygun kompozisyona sahip kaplama malzemesinin tedarik edilmesi, (Kaplama malzemesi olarak genelde toz form tercih edilirken tel veya çubuk formlar da kullanılmaktadır.)

- ii. Uygun kaplama sistem ve parametrelerin belirlenerek, kaplama malzemesinin eritilmesi,
- iii. Erimiş kaplama malzemesinin kaplanacak yüzeye püskürtülerek kaplamanın üretilmesi olarak gerçekleşmektedir (Funke ve ark., 1997).

### **2.1.1 Plazma sprej kaplamalar**

Termal sprej kaplama teknolojilerinden biri olan plazma sprej prosesi bu kaplama teknolojisinin en kapsamlı ve çok geniş ürün bileşenine sahip bir üyesidir. Geniş bir yelpazede bakıldığında özellikle buharlaşmayan ve ergime sıcaklıkları çok yüksek metalik ve seramik esaslı malzemeler rahatlıkla bu yöntem ile kaplama malzemesi olarak uygulanabilmektedir (Sulzer, 2015). Bu prosesin temel enerji kaynağı olan plazma, literatürde ifade edildiği gibi maddenin dördüncü hali olarak kabul görmeye birlikte, bu plazma sprej prosesindeki plazma bünyesinde bulunan eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon sayesinde yüksek enerji seviyesine yükseltgenmiş bir gaz buharı şeklinde açıklanmaktadır (Sarıkaya, 2007).

Plazma sprej birçok parametrelerin etkin olduğu bir prosesdir. Prosesin verimliliğinde ve devam etmesinde bu parametrelerin kontrolü önem arz etmektedir. Bu parametrelerin kontrol edilmesinde ve gözlenmesinde çeşitli nedenlerden dolayı zaman zaman güçlük yaşanabilmektedir. Örneğin elektrotların aşınmasını engellemek, ortamın nemini sürekli aynı seviyede tutmak gerçekten zordur. Literatürde yukarıda bahsi geçen birçok parametrelerin plazma sprej prosesi boyunca kontrol edilmesi, en uygun seviyenin belirlenmesi ve meydana gelen olumsuz etkilerin çözümü adına bir çok çalışma yapılmıştır (Gupta, 2015). Şekil 2.3'te plazma sprej prosesinde etkin parametreler verilmiştir.



Şekil 2.3. Plazma sprej prosesinde etkin parametreler (Gupta, 2015)

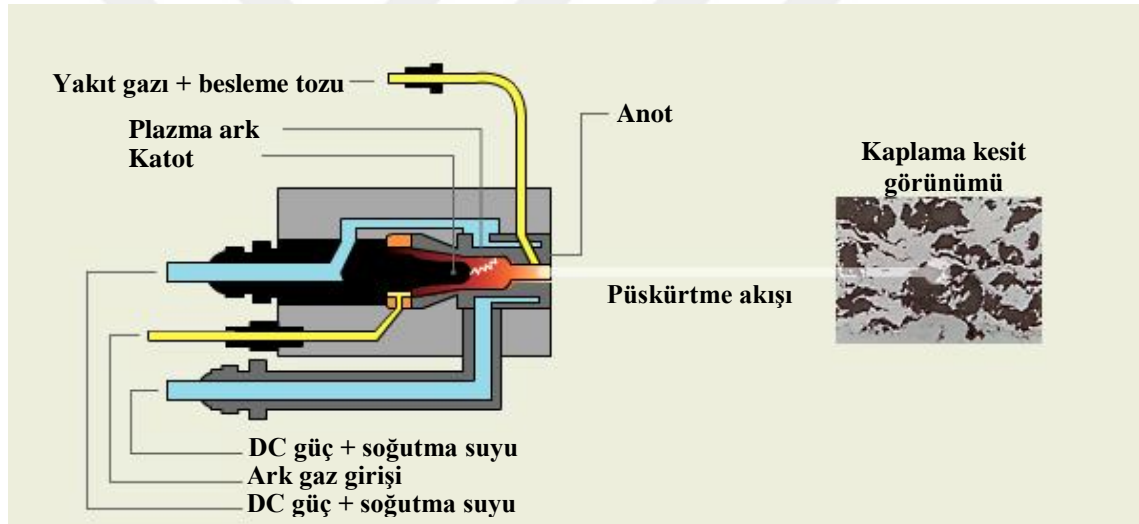
Plazma ortamında iki elektrot arasında tipik olarak argon/hidrojen veya argon/helyum gazlarının iyonize edilmesiyle oluşan yüksek ısı ve basınç etkisiyle beslenen toz malzemenin eritilmesi ve aynı anda altık yüzeye yüksek hızla püskürtülmesi esasına dayanmaktadır.

Gaz karışımı ortamdaki gazların ısınmasıyla birlikte gazlar pozitif iyonlara, elektronlara ve nötr atomlara ayrışır. Böylelikle elektronlar ile pozitif iyonlar arasında çekiminin verdiği kuvvet ile elektronlar ve iyonlar birleşerek ısı açığa çıkarır ve yüksek sıcaklıkta plazma ortamı oluşur. Böylelikle örneğin 40-220 kW gücünde olabilen plazma sprej tabancaları 15000-20000 K sıcaklıkta bir plazma oluşturabilmektedirler. Buna karşın altık malzemenin sıcaklığı 150-500 °C arasında tutulabilmektedir. Bunun yanında sprej tabancasının püskürtme hızı ise 2000 m/sn'lere kadar çıkarılabilmektedir (Kovarık ve ark., 2015).

Şekil 2.3'te gösterildiği gibi sistemin en önemli bileşeni plazma sprej tabancasıdır. Plazma sprej tabancasının işlevi; elektrik arkı ile gaz karışımını plazma alevine dönüştürülerek toz halindeki besleme malzemesini eritmesi ve kaplanacak altık yüzeye yüksek hızla püskürterek yüzeyi kaplamaktır.

Plazma sprej tabancası içinde meydana gelen arkı katot malzemesi (elektrot) oluşturmaktadır. Bu katot malzemesi ise; % 0,9-4,2 toryum oksit ( $\text{ThO}_2$ ), % 0,3-0,6 zirkonyum oksit ( $\text{ZrO}_2$ ), % 0,9-1,2 lantan oksit ( $\text{LaO}_2$ ), veya seryum oksit ( $\text{CeO}_2$ ), katkılı tungsten elektrotlardan imal edilmektedir. Böylelikle bu oksit katkıları ile hem arkın tutuşma performansı iyileştirilmiş ve hem de elektrotun daha yüksek akımlarda yüklenmesi sağlanarak elektrotların kullanım süreleri artırılmış olur.

Anot malzemesi olarak çeliğe kıyasla saf bakırın oda sıcaklığında beş katı ve  $1000^\circ\text{C}$ 'de ise on beş katı daha fazla ısı iletkenliğe sahip olması bakır tercih sebebi kılınmıştır. Bununla birlikte bakırın bu özelliği plazma gazının iyonize olmasıyla sprej tabancası içinde oluşan yüksek ısının tabancayı eritmemesi için içerdeki ısının soğutma suyuna iletilmesini sağlayarak sistemin soğutulmasında da rol alır. Şekil 2.4'te plazma püskürtme tabancasının kesiti verilmektedir.



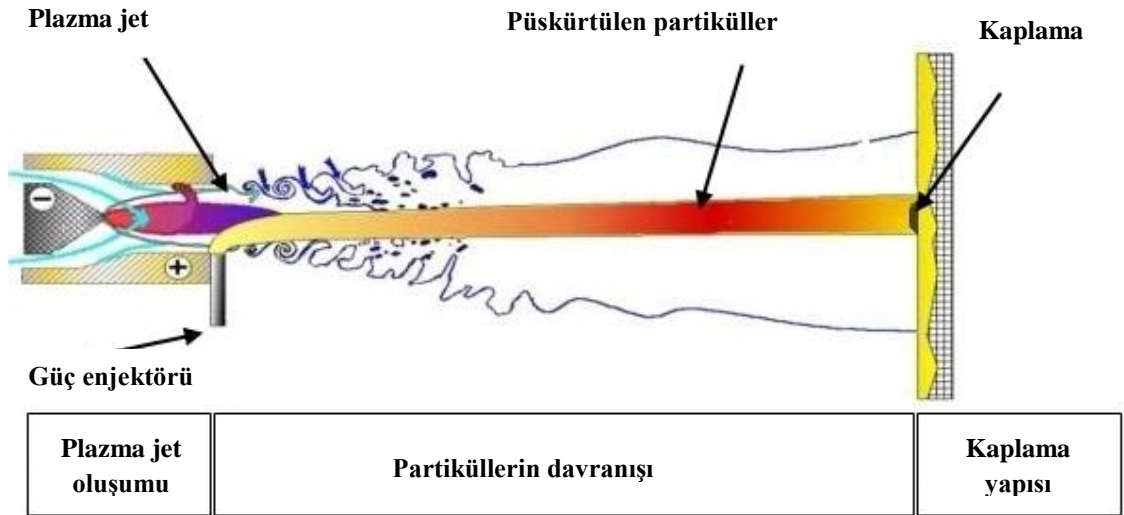
Şekil 2.4. Plazma püskürtme tabancasının kesiti (Barton, 2016)

Plazma sprej tekniği ile aşınma, korozyon, erozyon odaklı türbin yanma odaları ve türbin bıçakları, ortopedik implantlar ve baskı merdaneleri gibi uygulamalarda yüksek kalitede seramik kaplamalar üretilebilmektedir (Struers, 2016).

Genel olarak plazma sprej teknolojisinde; kaplamanın ve sistemin kaliteli, mükemmel olması ve uygulanabilirliğin devamı için birçok parametrenin bir arada bulunması gerekmektedir. Bu parametreleri şu şekilde sıralamak mümkündür; plazma sprej parametrelerinin uzun vadede istikrarlı, en az 3000-4000 Hz aralığında olması, elektrotların en az erozyonu, en uygun toz besleme ve enjeksiyon, yüksek biriktirme verimliliği, nispeten bakımı kolay, düşük yatırım ve bakım maliyetleridir (Schneider ve ark., 2006).

Plazma sprej teknolojisi diğer termal sprej kaplama proseslerine kıyasla çok yüksek sıcaklıklara çıkması ve üretilen ısının kaplama malzemesine mükemmel bir şekilde transfer edilmesiyle bu prosesi daha cazip hale getirmektedir. Plazma sprej açık atmosfer ortamında uygulanabildiği gibi kontrollü atmosfer altında da uygulanabilmektedir. Dolayısıyla atmosfere açık ortamda yapılan, atmosferik plazma sprej (APS); vakum altında yapılan ise vakum plazma sprej (VPS) adı verilmektedir. Aynı zamanda vakum plazma sprej; düşük basınç plazma sprej (LPPS) ve yüksek basınç plazma sprej (HPPS) tekniklerinin de ortak adıdır. Şekil 2.4’de görüldüğü gibi geleneksel bir atmosferik plazma sprej prosesi üç temel fonksiyonel bileşenden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi plazmanın oluşumu ve hava ile etkileşimi ikincisi toz enjeksiyonu ve üçüncüsü ise splat (yassı tanecik) ve kaplama oluşumudur.

Plazma kaynağını doğru akımdan (DC) alan APS prosesinde plazma yakıt olarak kullanılan gazlar (Ar, He, H<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> vb.) tekli, ikili ve üçlü karışım şeklinde uygulanabilmektedir. Elektrotlar arasından akan gaz karışımı oluşan ark ile birlikte 12000-14000 K’de plazma meydana gelir ve atmosferik basınç altında plazma jet püskürtme hızı ise 600-2200 m/s’dir (Concordia, 2016). Şekil 2.5’te geleneksel bir atmosferik plazma sprej işleminin şematik gösterimi verilmiştir.

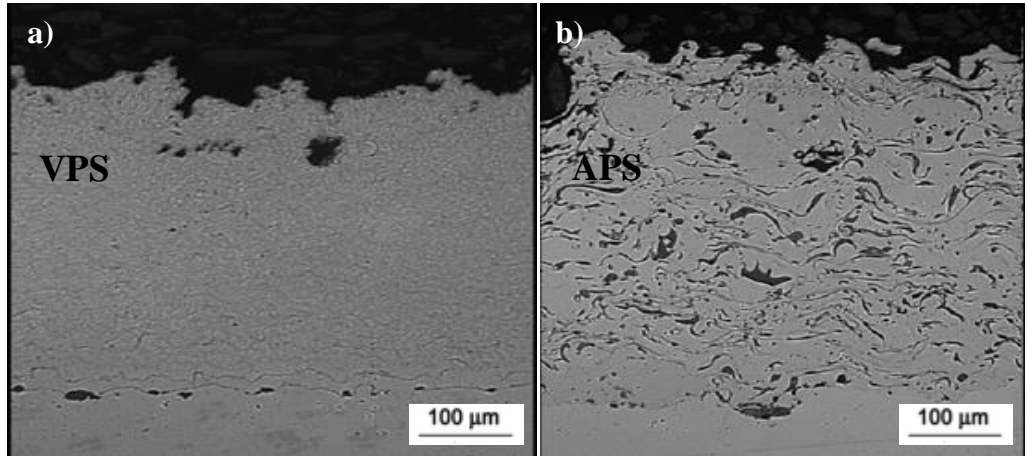


Şekil 2.5. Geleneksel bir atmosferik plazma sprej işleminin şematik gösterimi (Concordia, 2016)

APS yöntemi yüksek ısının bir fonksiyonu olarak işlev gördüğü için bunun paralelinde yüksek kalitede ve geniş bir besleme malzeme ağında kaplamalar üretmek mümkündür. Şöyle ki; prosesin gereği yüksek sıcaklıklarda besleme malzemesinin tamamı eridiği için yüzeye yapışma performansı da son derece üst seviyede

gerçekleşmektedir. Dolayısıyla yüksek yapışma oranında ve düşük gözenek oranına sahip kaplamaların üretimi mümkündür. Diğer termal spreyci kaplama teknikleri ile kıyaslandığında APS tekniğini daha ucuz ve kolay bir işlem olmakla birlikte püskürtme esnasında püskürtülen tanecikler hava ile temas etmesi sonucunda meydana gelmesinden dolayı kaplamada istenmeyen oksit kalıntıları ve kusurlara karşı hassastır. APS kaplama yönteminde besleme malzemesinin seçiminde yüksek sıcaklıkta ergimesinin yanında ye karşı daha az hassasiyeti olan malzeme grubuna yönelmek daha doğru olacaktır.

LPPS (50-200 mbar basınçlarda) ve HPPS (200 mbar'dan daha yüksek basınçlarda) vakum plazma spreyci kaplama yöntemleri kapalı ortamda düşük basınç altında uygulanabileceği gibi vakum veya özel tasarlanmış odalarda uygulanabilirliği mümkündür. Bu şekilde özellikle mükemmel metalik kaplamalar üretilmektedir. Proses özelliğinin bir sonucu olarak kaplamada oluşan oksit kalıntısı hemen hemen sıfıra indirgenmektedir. Buna karşın özel şartlar gerektirmektedir ve yatırım maliyetleri yüksektir. CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaların kesit SEM görüntüleri Şekil 2.6a' da VPS yöntemiyle üretilen bir kaplamanın kesit görünümü ve Şekil 2.6b'de APS yöntemiyle üretilen bir kaplamanın kesit görünümü verilmiştir (Di Ferdinando ve ark., 2010).



**Şekil 2.6.** CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamaların kesit SEM görüntüsü; a) VPS yöntemiyle üretilen bir kaplamanın kesit görünümü, b) APS yöntemiyle üretilen bir kaplamanın kesit görünümü (Di Ferdinando ve ark., 2010)

Şekil 2.6'da görüldüğü gibi VPS ve APS yöntemi ile üretilen CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamalarda oluşan oksit kalıntıları miktarlarının farkı açıkça



görülmektedir. VPS yöntemi ile üretilen bağ kaplamada nerdeyse hiç oksit oluşmazken, APS yöntemi ile üretilen bağ kaplamanın tamamında oksitler görülmektedir.

### 2.1.2 Yüksek hız-oksi asetilen yakıt (HVOF) kaplamalar

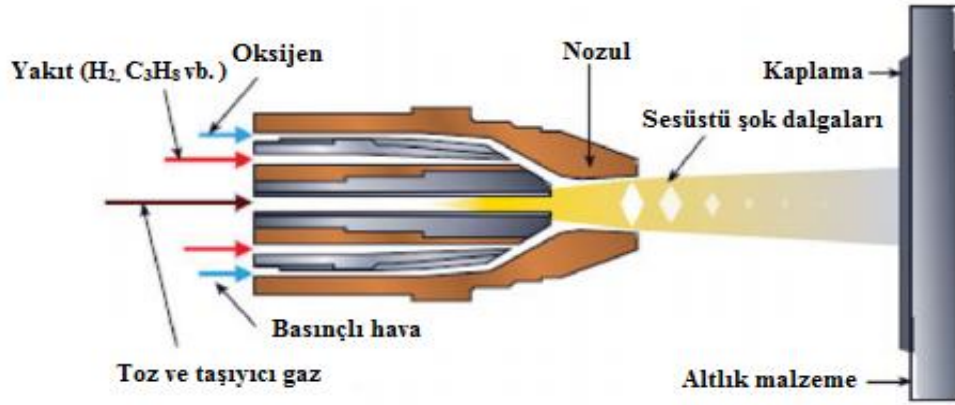
Termal sprey kaplama tekniklerinden biri olan Yüksek Hız-Oksi Asetilen Yakıt (HVOF) kaplama sistemi mühendislik malzeme yüzeylerini; yüksek sıcaklık, korozyon ve erozif ortamlardan korumak amacıyla uygulanmaktadır. HVOF kaplama sisteminin karakteristik kaplama özelliklerinden olan; kalınlık, metalürjik, elementel kompozisyon ve morfolojisi mühendislik uygulamaları için önemli bir rol oynamaktadır (Boudi ve ark., 2004).

HVOF kaplama tekniğinde gerekli enerji hidrojen, propan, propilen, asetilen gibi yakıtların karışımının yanması sonucu elde edilmektedir. HVOF kaplama tekniğinin yanma odasında yüksek basınç altında oksijen ateşlenir ve çok yüksek parçacık hızı ile ses üstü (süpersonik) jet oluşturmak için gaz karışımları nozul boyunca hızlandırılır. Böylece bu sprey prosesi ile son derece yoğun, yüksek yapışma oranı ve iyi bağlanmış kaplamalar üretmek mümkündür.

Genellikle uçakların türbin bıçakların bağ kaplamalarının üretilmesinde uygulanan WC/Co veya Cr<sub>2</sub>C<sub>3</sub>/NiCr veya MCrAlY (M=Ni ve/veya Co) gibi sert sermet kaplamalar, HVOF kaplama tekniği ile gerçekleştirilmektedir (Richer ve ark., 2010).

HVOF kaplama teknolojisi, özellikle TBC bağ kaplama uygulamalarında yoğun kaplamaların oluşturulabilmesi yanında sistem sıcaklığının düşük olması sebebiyle daha düşük oksit oranı içermesi bu tekniğin daha fazla ilgi görmesine sebep olmuştur. Bu durumu aynı zamanda bu tekniğin bir başka avantajı olarak değerlendirmek mümkündür.

Diğer yandan APS kaplama prosesi ile karşılaştırıldığında çok düşük işlem sıcaklığına sahip olduğu görülmektedir, bu nedenle HVOF kaplama tekniğinde kaplama işlemine bağlı oksit oluşumu gibi sıcaklığa bağlı sorunlar nispeten daha düşük seviyededir. Şekil 2.7’de HVOF kaplama sistemine ait kesit görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.7. HVOF kaplama sistemine ait kesit görüntüsü (Sulzer, 2015)

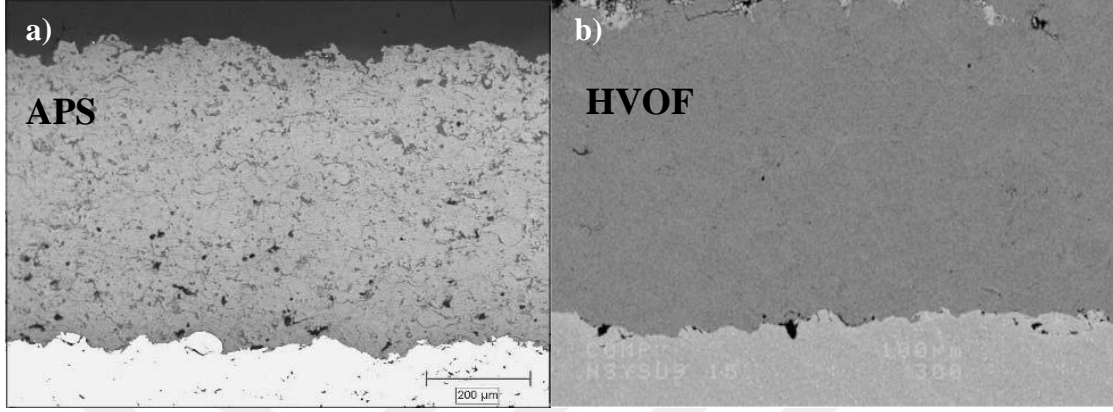
HVOF sprey kaplamalar Şekil 2.2’de verildiği gibi detonasyon tabancası yöntemiyle aynı grupta yer almaktadır. Aynı şekilde gerekli olan enerji hidrojen, propan, asetilen gibi yakıtlardan elde edilmektedir. Yanma odasında yüksek basınç altında karşılaşan oksijen ve yakıt gazları yanarak genişir. Genleşen bu gaz karışımı nozulden çıkarken 1825 m/sn gibi sesüstü (süpersonik) yüksek hızlara ulaşabilmektedir. Dolayısıyla bu sesüstü hız HVOF prosesine özgü olan nozul önünde şok dalgalarının oluşmasına sebep olmaktadır.

HVOF prosesinde alev sıcaklığı 2300-3000 °C’lere kadar çıkarılabilmektedir. Soy bir gaz (He, N<sub>2</sub> vb.) yardımıyla sisteme yatay veya dikey olarak beslenerek kaplama tozu termal ve kinetik enerjiye sahip olur. Daha sonra erimiş veya yarı erimiş formdaki seramik tozlar, elmas şeklinde oluşan şok dalgaları sayesinde yüksek hızlarla altlık malzeme yüzeyine plastik deformasyona uğrayarak yapışır. Sonuç olarak kaplama gerçekleşmiş olur.

HVOF kaplama prosesini diğer TBC’lerden ayıran en önemli özelliği sahip olduğu yüksek hızdır. Bu yüksek hız aynı zamanda seramik veya metalik kaplama tozların altlık yüzeye çok yüksek hızlarla çarpması ve yüzeyde birikmesi anlamına gelir. Diğer yandan toz partiküllerinin nozulden çıkışı ile kazanmış oldukları yüksek hız sayesinde yapışma yüzeyine kadar olan mesafeyi kısa sürede kat etmektedirler.

Dolayısıyla hava ile temas süreleri en aza inmektedir. Bunun sonucu olarak da porozite ve oksit oranı daha düşük seviyede gerçekleşmektedir. Böylece sistemin getirdiği yüksek çarpma hızı sayesinde kaplamanın porozite oranı % 1’lerin altına kadar çekilebilmektedir. Buna ilaveten yapışma mukavemeti de yüksektir. Bütün bu oluşumların sonucunda yoğun ve sert sermetler üretilebilmektedir. Ancak sistemin

nispeten daha düşük sıcaklıklarda çalışması ergime sıcaklığı yüksek olan seramikler için uygun olmamaktadır. Şekil 2.8’de APS ve HVOF prosesleri ile üretilen sırasıyla NiCoCrAlY ve CoNiCrAlY içerikli kaplamaların mikroyapı görüntüleri verilmiştir (Bolcavage ve ark., 2004; Tsai ve ark., 2013).



**Şekil 2.8.** a) NiCoCrAlY içerikli APS yöntemiyle üretilen bir kaplamanın mikroyapı görünümü, b) CoNiCrAlY içerikli HVOF yöntemiyle üretilen bir kaplamanın mikroyapı görünümü (Bolcavage ve ark., 2004; Tsai ve ark., 2013)

Mikroyapılardan da anlaşılacağı gibi atmosferik koşulların ve partikül hızının bir fonksiyonu olarak APS yöntemi ile üretilen kaplamadaki oksit ve porozite miktarının önemli ölçüde HVOF yöntemi ile üretilen kaplamaya kıyasla daha yüksek olduğu açıkça görülmektedir. Aynı zamanda; yanma odasındaki gaz karışımı, oksijen oranı ve sıcaklık kaplama kalitesine direkt etki eden diğer parametrelerdir (Richer ve ark., 2010; Osorio ve ark., 2012).

### 2.1.3 Termal sprey kaplama yöntemlerinin karşılaştırılması

Termal sprey kaplamalarda kaplama kalitesi, hız ve maliyet gibi parametreler dikkate alındığında her yönden üstün bir yöntem mümkün değildir. Örneğin yüksek bağ mukavemeti için yüksek parçacık hızlarına ulaşmak gerekmekte veya yüksek bağ mukavemeti için yüksek parçacık hızlarına ulaşmak gerekmektedir. Dolayısıyla yöntem seçimi yapılırken; kaplamanın yapılma amacı, istenen özellik, beklenen çalışma ömrü ve maliyet faktörleri gibi etkenler dikkate alınmalıdır. Ayrıca önemli bir parametre olan gözenek oranı kimi durumlarda istenirken kimi durumlarda ise dezavantajlı olabilir. Çizelge 2.1’de APS ve HVOF proseslerine ait işlem parametreleri ve kaplama özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 2.1.** APS ve HVOF proseslerine ait işlem parametreleri ve kaplama özellikleri (Karaoğlanlı, 2013)

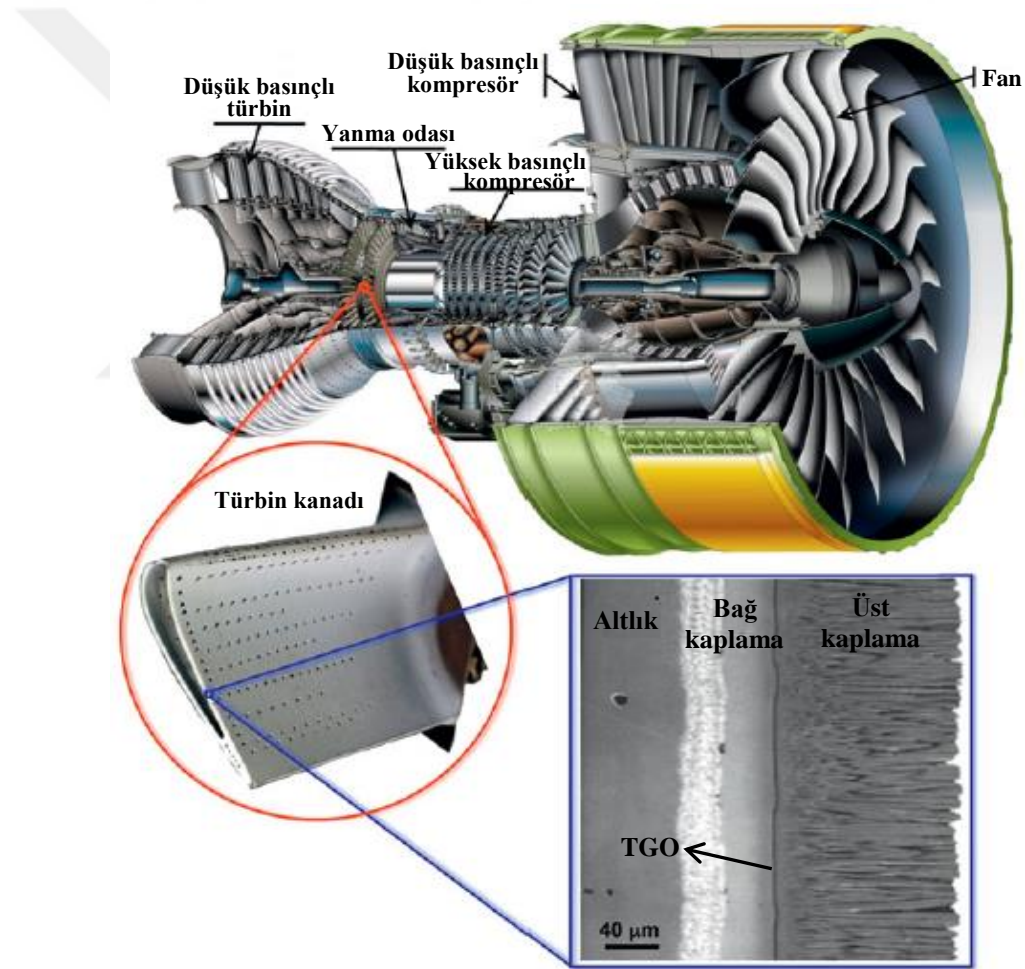
Özellikler	APS	HVOF
Parçacık Sıcaklığı	3800 °C	3300 °C
Parçacık Hızı	200-800 m/sn	200-1000 m/sn
Porozite	% 1-% 40	(<% 1) - % 5
Yapışma Mukavemeti	10-45 MPa	68-83 MPa
Oksit Miktarı	Yüksek ve iri yapıda	Düşük ve dağınık yapıda

Çizelge 2.1’de Termal sprej kaplamalar da kullanılan jet sıcaklığı, parçacık hızı gibi işlem parametreleri ile yapışma mukavemeti, gözenek miktarı ve oksit içeriği gibi kaplama özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

### 3. TERMAL BARIYER KAPLAMALAR (TBC)

#### 3.1. TBC Sistemi ve Bileşenleri

TBC'ler; uzay ve havacılık gibi birçok endüstriyel alanlarda ısı yalıtım amacıyla uygulanmaktadır. Bununla birlikte özellikle gaz türbin motorlarının yanma odaları ve türbin kanatçıkları gibi yüksek sıcaklığa maruz kalan parçalarda sıklıkla tercih edilmektedir. Şekil 3.1'de ticari bir uçak motoru olan Engine Alliance GP7200'ın şematik kesit görüntüsü, TBC ile kaplanmış türbin kanadı ve kesit mikroyapı görüntüsü verilmiştir (David Clarke R. ve ark., 2012).

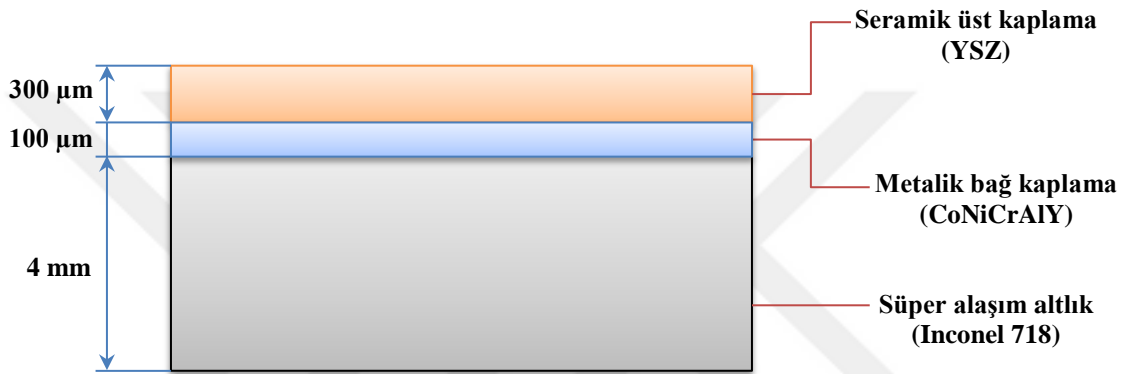


Şekil 3.1. Gaz türbin motorunun kesit görüntüsü, türbin kanadı ve kesit mikroyapı görüntüsü (David Clarke R. ve ark., 2012)

TBC'ler, makina parçalarının servis sırasında yüksek sıcaklık gibi agresif çevre koşullarının neden olduğu olumsuz etkiler sonucu meydana gelebilecek oksidasyon,

termal çevrim, sıcak korozyon ve aşınma odaklı hasarlara karşı bu maruziyeti en aza indirmek amacıyla koruyucu bir kalkan görevi üstlenmektedirler.

Bu amaçla TBC'ler servis koşullarında yüksek sıcaklık dayanımına sahip olan genellikle süper alaşım bir altlık malzeme, oksitlenme direncine sahip metalik bir bağ kaplama, % 6-8  $Y_2O_3$  ile stabilize edilmiş  $ZrO_2$  içeriğine sahip seramik üst kaplama ve servis sırasında bağ kaplama ile üst seramik kaplama ara yüzeyinde oksitlenme sonucu gerçekleşen "termal büyüyen oksit" (TGO) tabakasından oluşmaktadır. Bundan sonraki alt bölümlerde bahsi geçen TBC'lerin genel yapısı geniş bir şekilde açıklanacaktır. Şekil 3.2'de TBC'lerin tipik olarak yapısal bütünlüğü verilmiştir.



Şekil 3.2. TBC'lerin tipik yapısal bütünlüğü

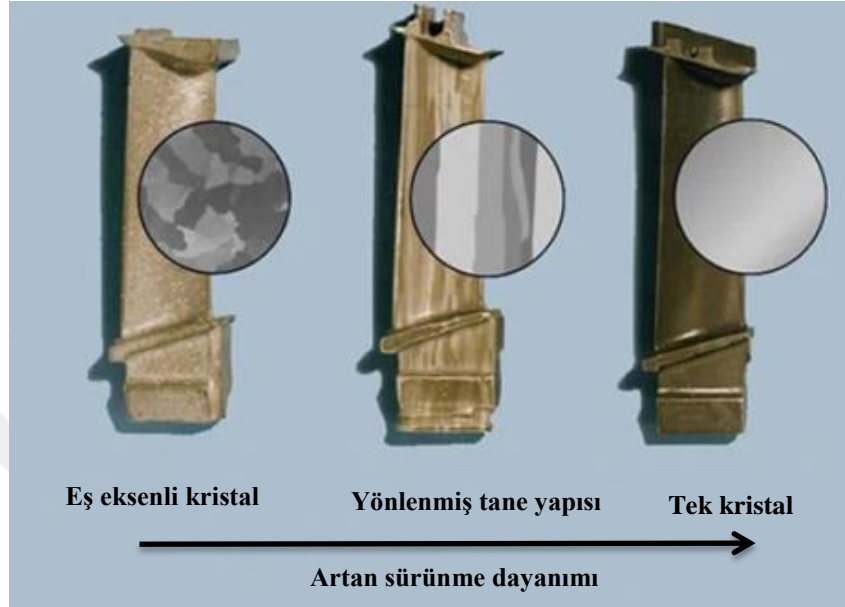
TBC'lerin temel hedefi; 1200-1300 °C'lere kadar çıkan çalışma ortam sıcaklığından ana malzemenin etkilenmesi önlenmektir. Ana malzemeye iletilen ısı en az seviyeye çekilerek parçanın kimyasal ve mekanik hasara uğraması geciktirilmiş ve böylelikle servis ömrü uzatılmış olur. Dolayısıyla ana parçanın maruz kalacağı sıcaklık düşürülerek, oda sıcaklığındaki özellikleri de korunmuş olmaktadır.

### 3.1.1 Altlık malzemeleri

TBC sisteminde yer alan ve ağır çalışma ortamında korunması hedeflenen temel bileşen altlık malzemesidir. Genellikle gaz türbinlerinde olduğu gibi çalışma sıcaklığının yüksek olduğu ortamlarda ısı dayanımı yüksek olan Ni esaslı süper alaşımlar kullanılmaktadır. Nikel esaslı süper alaşımların 1100 °C gibi yüksek sıcaklıklarda mukavemetinin yüksek olması bu malzeme grubunu bu ortamlarda tercih edilir kılmıştır (Donachie ve Donachie, 2002; Bose, 2007).

Bununla birlikte süperalaşımların tane sınırlarından kaynaklı hasarları en aza indirmek amacıyla yönlendirilmiş taneler veya tek kristalin şeklinde üretimi mümkündür.

Böylelikle yüksek sıcaklıklarda sürünme dayanımı gibi performansları artırılmış olmaktadır. Günümüzde yüksek sıcaklık uygulamalarında Ni ve/veya Ti esaslı süperalaşımalar geniş bir kullanım potansiyeline sahiptir (Bose, 2007; Saman, 2011). Şekil 3.3'te farklı kristal yapısına sahip türbin bıçakları verilmiştir.



Şekil 3.3. Farklı kristal yapısına sahip türbin bıçakları (Camp, 2016)

Gaz türbin bıçaklarında yüzey merkezli kübik (YMK) yapıya sahip  $\gamma$  fazından oluşan Ni esaslı süperalaşımalar kullanılmaktadır. Günümüz endüstrisinde özellikle yüksek sıcaklıklarda çalışan ve süper alaşımlardan imal edilmiş türbin bıçakları ve kanatçıklarının performanslarını ve servis ömürlerini daha da artırmak amacıyla aynı zamanda kaplamalar da uygulanmaktadır. Bunun yanında aynı amaç doğrultusunda katmanlı kaplamalar (multi-layer) da günümüzde popülerliğini sürdürmektedir (Monceau ve ark., 2010; Dwivedi ve ark., 2013).

### 3.1.2 Bağ kaplama

TBC sistemindeki bağ kaplama yapısının iki temel fonksiyonu vardır. Bunlardan birincisi seramik üst kaplamanın altlık ile yapışmasını sağlamaktır. Diğer önemli görevi ise içerdiği alüminyum sayesinde kısmen oksitlenerek daha önce bahsi geçen bir TGO yapısını oluşturmasıdır. Böylece altlık malzemeye oksijenin nüfuziyeti engellenmiş olmaktadır. Bu TGO yapısının oluşumu esnasında meydana gelen oksitlenme olayı bir hasar gibi düşünülmesinin yanında aslında oksijenin altlığa kadar nüfuz etmesini

engelleyen koruyucu bir oksit katman görevi görmesi yönüyle pozitif bir etkisinin olduğunu söylemek mümkündür (Karaoglanli ve ark., 2012).

Bu arada özellikle bağ kaplamanın yüksek verimlilik ile çalışması ve bu verimliliğin devam ettirilmesi düşünüldüğünde; termal genişleme kat sayısı en uygun aralıkta olan bağ kaplama malzemesinin seçimi önemlidir. Dolayısıyla sistemin sürekli ısınma ve soğuma rejiminde çalıştığı göz önünde bulundurulursa altlık malzeme ile üst seramik kaplama arasında meydana gelebilecek termal gerilmeler en aza indirilmiş olacaktır.

TBC sisteminde yer alan bağ kaplama ile altlık malzemenin yüksek termal genişleme katsayısına sahip olması ve buna karşın seramik üst kaplamanın düşük termal genişleme katsayısına sahip olmasından dolayı ortaya çıkan termal genişleme katsayı farkının düşürülmesi hedeflenmektedir (Soboyejo ve ark., 2010).

Gaz türbinlerinde uygulanan ve TBC sistemindeki bağ kaplama alaşımları tipik olarak MCrAlX kaplamalar şeklinde oluşmaktadır. Burada;

M: Ni ve/veya Co,

X: Y, Hf ve/veya Si'dir.

Nikel ilavesi oksitlenme direncini artırırken Kobalt ilavesi de korozyon direncini artırmaktadır. Alüminyum servis sırasında oksitlenmeye karşı koruma sağladığı ve yavaş büyüyen  $\alpha$ -alüminyum yapısındaki TGO'yu harekete geçirmekle birlikte devam etmesini sağladığı için bağ kaplama yapısına ilave edilir. Alüminyum diğer oksitlere kıyasla daha düşük termal difüzyon özelliğine ve daha iyi yapışma mukavemetine sahiptir. Bu yönüyle alüminyum tercih edilmektedir. Diğer yandan oksitlenme ve korozyon direncini geliştirmek için ise krom ilavesi yapılmaktadır (Gupta, 2015).

### 3.1.3 Üst kaplama

Üst kaplama ortamın ağır çevresel etkisine ve yüksek sıcaklığına direkt maruz kalan TBC sisteminin en üst tabakasıdır. Üst kaplama tabakası birçok özelliği bünyesinde barındırmakla birlikte, kaplama yapısı içindeki temel işlevi bağ kaplama tabakası ile altlık malzemeye ısı yalıtım sağlamaktır.

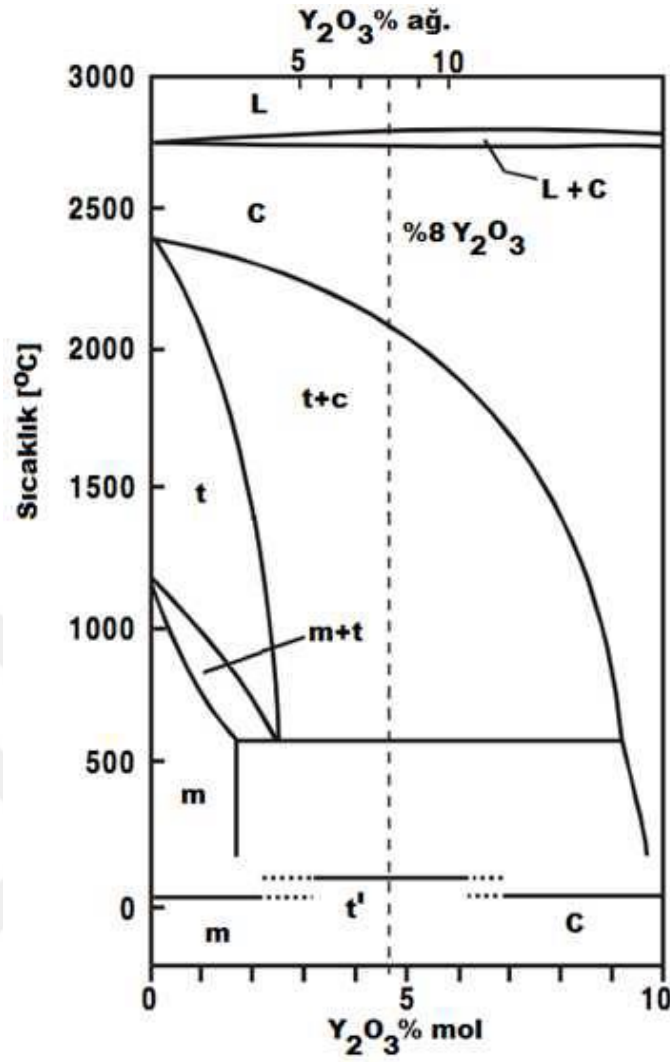
Üst kaplama servis ortamında bulunan yüksek sıcaklığa ve sıcak gazların etkisine direkt maruz olması nedeniyle üst kaplamayı oluşturan malzeme grubunun



ergime sıcaklığı yüksek olmalıdır. Böylece kaplamanın ortam sıcaklığına karşı hassasiyeti en aza indirgenmesi sağlanmış olmaktadır. TBC'lerde ısıl yalıtım görevini üstlenen üst kaplama tabakasının düşük termal iletkenlikte olması istenmektedir. Aynı zamanda termal çevrim ortamında ısınma/soğuma rejimi sırasında kaynaklanan olumsuzlukları engellemek ve en aza indirmek amacıyla üst kaplama ile alt katmanlar arasında termal genleşme kat sayıları yakın olmalıdır (Bose, 2007).

Servis şartları hem atmosfere açık olmasından hem de yüksek sıcaklığa sahip olan ortamın oksijen ve diğer gazları içermesinden dolayı kaplamalardan oksidasyon ve korozyona karşı dayanımının yüksek olması genelde istenen bir durumdur. Bununla birlikte servis sırasında toz bulutu, kül vs. den kaynaklanan ve aşındırıcı etkiye sahip olan parçacıkların aşındırıcı etkisine karşı başka bir deyişle katı partikül erozyonuna karşı maruz kalan üst kaplamanın dirençli olması gerekir (Koolloos ve Houben, 2000; Cao ve ark., 2004).

Üst kaplama tabakası yitriya ile stabilize edilmiş t-zirkonyadan (YSZ) oluşmaktadır. Oda sıcaklığında t-zirkonya 1170 °C'de faz dönüşümüne uğramaktadır. Diğer bir ifadeyle bu sıcaklıkta tetragonal faz yapısı monoklinik faz yapısına dönüşmektedir. Bu dönüşüm sonucu yapıda yaklaşık % 4 civarında bir hacim değişikliğine meydana gelir. Bu hacim değişikliği yapı içerisinde gerilmelere sebebiyet vermektedir. Bu hacim değişikliğine neden olan faz dönüşümünden mümkün oldukça kaçınmak gerekmektedir. Dolayısıyla bu tetragonal faz yapısından monoklinik faz yapısına dönüşümü engellemek amacıyla başka bir ifadeyle tetragonal faz yapısının yarı kararlı hale gelmesi amacıyla zirkonyaya yitriya ilavesi yapılır. Böylece zirkonya yarı kararlı tetragonal faz yapısına sahip olması sağlanır. Sonuç olarak tetragonal faz yapısı düşük sıcaklıklarda bile dengelenmiş olur. Bu yarı kararlı tetragonal faz yapısı yüksek sıcaklıklarda monoklinik faz yapısına dönüşümü baskılanmış olmaktadır. Şekil 3.4'te görüldüğü gibi zirkonyanın bu stabilizasyonu üzerine yapılan çalışmalarda zirkonyaya % 6,5-9 arasında  $Y_2O_3$  ilavesi ile yüksek sıcaklarda tetragonal faz yapısı elde edilmiştir (Miller, 1997; Koolloos, 2001; Park ve ark., 2003).



Şekil 3.4.  $ZrO_2$ - $Y_2O_3$  faz diyagramına ait bir bölümün gösterimi (Koolloos, 2001)

Sonuçta;  $Y_2O_3$  ilavesinin en uygun olduğu yüksek sıcaklıklarda gerçekleştirilen dönüşüm testleri sonucunda % 6-8 oranında bir yitriya ilavesi ile mümkün olabileceği görülmüştür (Miller, 1997).

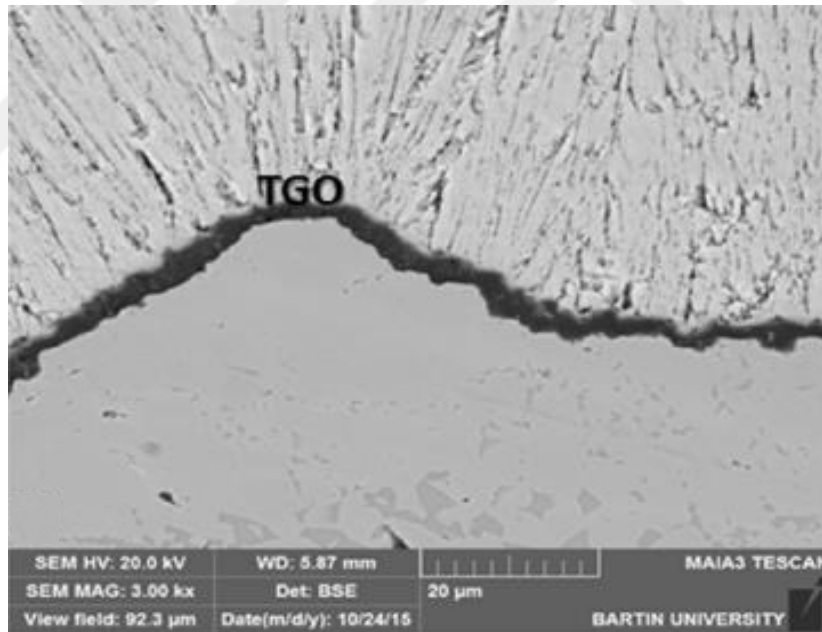
### 3.2 TBC'lerin Hasar Mekanizmaları

TBC'lerin hâlihazırda türbin bıçaklarında ve yeni nesil motor parçalarında kullanımı önemli bir yer teşkil etmektedir. TBC'ler makina ve parçalarını ortamın bir çok agresif şartlarına karşı koruyucu kalkan görevi görerek korumakla birlikte birtakım sınırlamaları da beraberinde getirmektedir. Şöyle ki; TBC'lerin kullanım ömürleri kesin olarak bilinmemekle birlikte tahmin edilebilir. Dolayısıyla böyle bir durumda servis

sırasında TBC'lerde meydana gelebilecek hasarlar hakkında güvenilir bir tahmin yürütebilmek için hasar mekanizmaların anlaşılması hayati önem taşımaktadır.

TBC sistemleri agresif servis ortamında hasara sebep olabilecek birçok etken bulunmaktadır. TBC sistemleri bu etkenlerden tek birinin sebep olabileceği bir hasara uğrayabilirken, birden fazla etkenin bir araya gelmesiyle de hasara uğrayabilmektedirler. TBC'lerde meydana gelen ve servis ömrünü kısaltan başlıca hasarlar şunlardır; termo-mekanik hasarlar, kimyasal hasarlar, termal çevrim sonucu oluşan hasarlar, sıcak korozyon sonucu oluşan hasarlar, katı partikül erozyonu, bağ kaplamanın oksidasyonu sonucu oluşan hasarlar, üst kaplamanın sinterlenmesi sonucu oluşan hasarlar ve CMAS ( $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ ) etkisi hasarlarıdır.

Tez çalışmasının bu bölümünde; termo-mekanik hasarlar, kimyasal hasarlar, sıcak korozyon, termal çevrim ve katı partikül erozyonu odaklı hasarlar ayrıntılı olarak açıklanacaktır. Şekil 3.5'te süperalaşım üzerine EB-PVD tekniği ile YSZ biriktirilmiş TBC'deki TGO oluşumunun kesit görünümü verilmiştir.



**Şekil 3.5.** Süperalaşım üzerine EB-PVD tekniği ile YSZ biriktirilmiş TBC'deki TGO oluşumunun kesit görünümü (Doleker ve Karaoglanli, 2016)

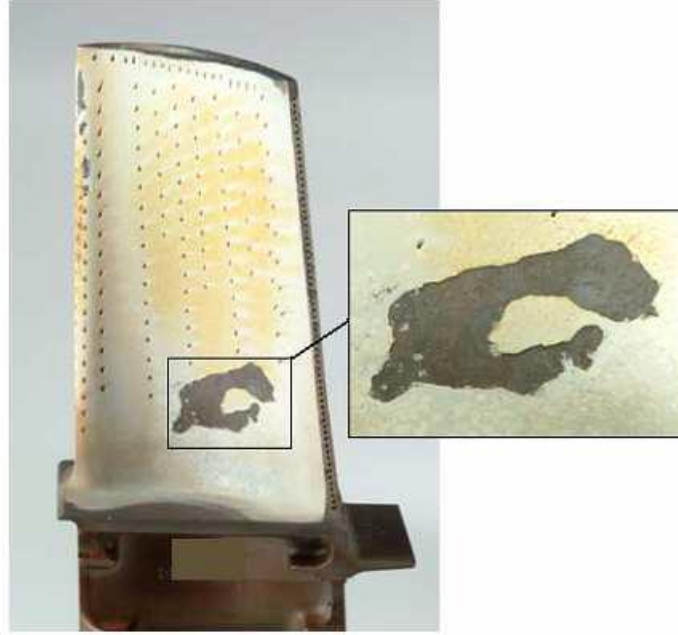
TBC sisteminde kimyasal bozunma odaklı gerçekleşen hasar mekanizmalarının çıkış noktası ve en etkin rol oynayanı TGO ya bağlı olarak gerçekleşen oluşumlardır. Bu hasar mekanizmaları yüksek sıcaklığın etkisi ile üst kaplama tabakasında meydana gelen mekanik özellik kaybı, ısıl genleşme uyumsuzlukları, ısıl genleşme katsayısındaki değişimler ve çalışma ortamında bulunan gazların yüzeye etki ederek kimyasal

etkileşime sebebiyet vermesiyle TBC'leri hasara uğratmaktadır (Verbeek, 1992; Jing, 2004; Evans ve ark., 2006; Aygun, 2008; Wellman ve Nicholls, 2008).

TBC'lerde bir diğer hasar mekanizması ise mekanik olarak gerçekleşmektedir. Bu tür hasar daha çok erozyon aşınması türünde meydana gelmektedir. Termal bariyer kaplı parçaların servis ortamının katı parçacıklar ihtiva etmesi ve bu parçacıkların nispeten yüksek hızlarda ve muhtelif açılarda kaplama yüzeylerine çarpmaları neticesinde erozif aşınma gerçekleşir.

### **3.2.1 Termo-mekanik hasar**

Termo-mekanik hasar mekanizması açıklanırken TBC'lerin maruz olduğu termal etkiye bağlı olarak değişimini göz önünde bulundurmak gerekmektedir. Bu ısıl değişimler izotermal olarak gerçekleşebilmekte veya ısıtma-soğuma rejimi ile diğer bir ifadeyle termal çevrimler ile gerçekleşebilmektedir. TBC'lerdeki bu değişim termal çevrim şeklinde olduğu durumlarda TGO yapısı büyürken yapı içerisinde büzülmeleri de meydana getirmektedir. Bu durumda hangi mekanizmanın baskın olabileceğini ise çalışan makina ve bileşenlerin çalışma şartları belirlemektedir. Örneğin havacılık sektöründe karşılaşılan türbin bileşenlerinde izotermal bir durumdan ziyade termal çevrim baskındır. Yani sürekli bir ısınma ve soğuma rejimine maruz kalma söz konusudur. Bu durumda kaplama yapısında özellikle bağ ve seramik üst kaplama ara yüzeyinde büzülme ve gerilmeler sonucunda kaplamada çatlama, pullanma ve kalkmalarla karşılaşmak kaçınılmaz olmaktadır. Şekil 3.6'da TBC'lerde sıklıkla karşılaşılan tipik bir servis hasarı verilmiştir. TBC sistemlerinde türbin bıçaklarında tipik olarak görülen seramik üst kaplama tabakasının pullanarak kalkması (spallation) sıklıkla karşılaşılan bir hasardır.



Şekil 3.6. TBC'lerde sıklıkla karşılaşılan tipik bir servis hasarı (Dalkılıç, 2007)

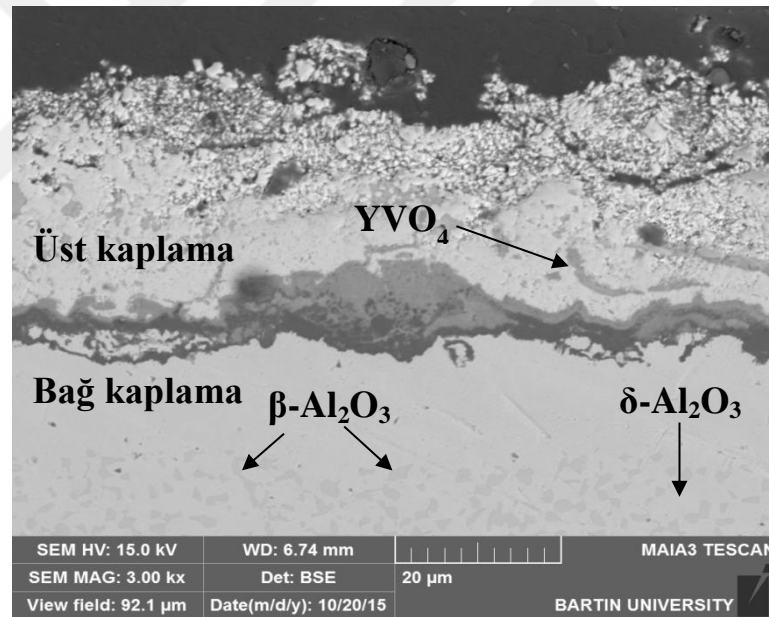
Genelde TBC'lerde hasarlar bağ kaplama ve seramik üst kaplama ara yüzeyinde başlamaktadır. Diğer bir ifade ile TGO yapısının büyüme stratejisi bu BC/TBC ara yüzey morfolojisinin etkisi altında ve paralelinde gelişme göstermektedir. Özellikle ara yüzeyde var olan pürüzlülük ve yükselti farkından dolayı gerilmelerin de artması açıktır. Çünkü ara yüzeyin böyle bir potansiyel yapı teşkil etmesi sonucu TGO yapısının da büyümesiyle hacimsel değişime neden olmaktadır. Bu hacimsel değişiklik de BC/TBC ara yüzeyinde gerilmelere sebep olacaktır ve hasarla sonuçlanacaktır. Bunun yanında özellikle seramik üst kaplamada yer alan mikro çatlakların birleşip ara yüzey boyunca ilerleyerek seramik kaplama tabakasının üzerindeki basma yükleri oluşturmasıyla kaplamanın kalkmasına ve hasara uğramasına neden olmaktadır. Bu çalışmada söz konusu TBC'lerin üretiminde kullanılan APS tekniği ile üretilen kaplamalarda hasarların oluşumunu tetikleyen kaplama yapısında yer alan ve üniform bir dağılım gösteren mikro çatlakların ve gözeneklerin varlığı yadsınamaz bir gerçektir.

### 3.2.2 Kimyasal hasar

TBC sistemlerinde karşılaşılan hasarlardan kimyasal hasar odaklı bozunmaların temelinde TBC'yi oluşturan bağ kaplama tabakasının oksidasyona uğraması yatmaktadır. Özellikle APS tekniği ile üretilen TBC'lerde üst seramik kaplama yapısının gözenekli oluşu ve kaplamada mikro çatlakların varlığı bu oksitlenmeyi daha

da tetiklemektedir. Genel anlamda seramik üst kaplama tabakasında bulunan gözenek ve mikro çatlaklardan nüfuz eden oksijen bağ kaplamaya kadar ulaşır ve burada kaplamayı oluşturan metalik grup oksidasyona uğrar.

MCrAlY bağ kaplama sisteminde bulunan Al, oksijen ile reaksiyon vermek suretiyle  $\alpha$ -alümina şeklinde TGO yapısını oluşturur. Bu şekilde  $\beta$ -fazında bulunan Al da TGO yapısına difüze olur. Bu difüzyonun devam etmesiyle alüminyumca zengin olan bölgede Al'nin azalmasıyla  $\beta$ -fazı kaybolmaya başlar. TGO yapısında yer alan  $\alpha$ -alümina oluşumu  $\beta$ -fazındaki Al'nin tükenmesine kadar devam eder. Ancak bağ kaplama yapısında Al'nin tükenmesinin ardından o ana kadar alüminadan oluşan TGO yapısına Cr ve Co gibi farklı metallerin de oksitlenmesiyle farklı oksitler de katılarak karışık oksitler oluşmaktadır. Bu oksit yapısı TGO da yer alan  $Al_2O_3$  ile kıyaslandığında daha açık siyah (gri) renkli gözlenmektedir. Şekil 3.7'de APS yöntemiyle üst kaplaması üretilen TBC'nin sıcak korozyon testi sonra enine kesit görüntüsü verilmiştir.



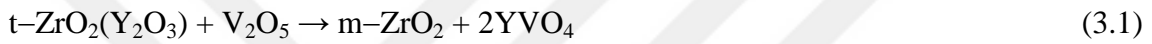
Şekil 3.7. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilen TBC'nin sıcak korozyon testi sonra enine kesit görüntüsü (Özgürlük, 2016)

### 3.2.3 Sıcak korozyon hasarı

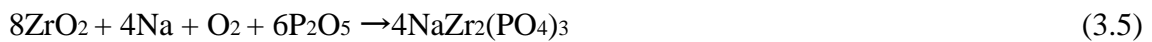
Sıcak korozyon hasarı tipik olarak metal yüzeyinde erimiş tuzların birikmesiyle gerçekleşen bir hasar durumudur. Bunun yanında TBC sisteminde karşılaşılan sıcak korozyon hasarı, ortamda  $Na_2SO_4$ ,  $NaCl$  ve  $V_2O_5$  gibi tuzlarının varlığından kaynaklanan korozyon türü olarak da tanımlamak mümkündür. Bununla birlikte  $SO_3$  ve

NaCl arasında gerçekleşen reaksiyon sonucu yüzeyde  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tuzunun birikmesi ile meydana gelmektedir (Landolt, 2007). Sıcak korozyon hasarına, bu tuzlardan ortamda yalnız biri bulunması ile sebep olabileceği gibi ikili veya üçlü gruplar halinde de sıcak korozyonun oluşmasına sebep olabilirler.

TBC sisteminde üst kaplama tabakasından kaynaklanan sıcak korozyon hasarı; erimiş tuzların üst kaplama tabakasından yer alan mikro çatlaklar ve gözeneklerden nüfuz etmesi sonucu gerçekleşir. Bu tür hasar servis sırasında vanadyum, sodyum, kurşun vb. elementlerin; YSZ üst kaplama tabakasının yapısını değiştirmesi sonucu meydana gelir. Üst tabakanın yapısının bozunması ve hasara uğraması tipik olarak iki şekilde gerçekleşmektedir (Jones, 1997). Birinci durum Denklem 3.1 ve Denklem 3.4 arasında verilen benzer reaksiyonlar ile meydana gelir.

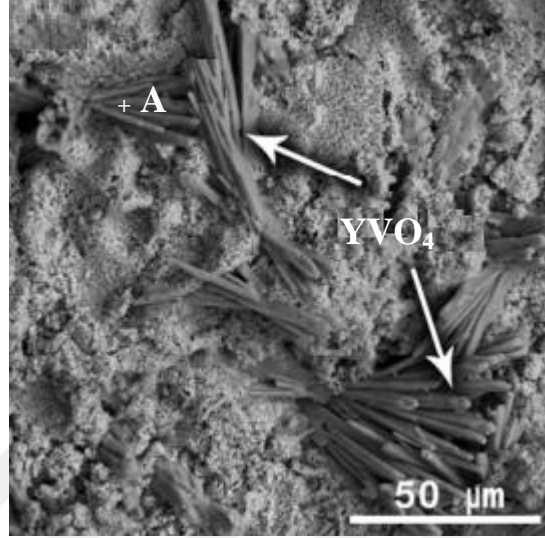


Yakıt kirliliğinin sebep olduğu sodyum, sülfür, fosfor, vanadyum gibi elementler yapıda var olduğunda  $\text{Y}_2\text{O}_3$  fazı ile reaksiyona girer.  $\text{Y}_2\text{O}_3$  fazının artık gerçekleşmemesi durumunda ise, tetragonal  $\text{ZrO}_2$  fazının stabilizasyonu mümkün olmadığı için tetragonal-monoklinik faz dönüşümü gerçekleşir. Bu dönüşüm hacim değişikliğine sebep olarak üst tabakanın bütünlüğünü bozmaktadır. İkinci durumda ise fosfor ve sodyumun yakıt kirliliğinden dolayı ortamda bulunması ve zirkonya ile reaksiyona girmesi sonucunda gerçekleşir. Bu durumda reaksiyonlar Denklem 3.5'te gösterildiği gibi meydana gelmektedir.

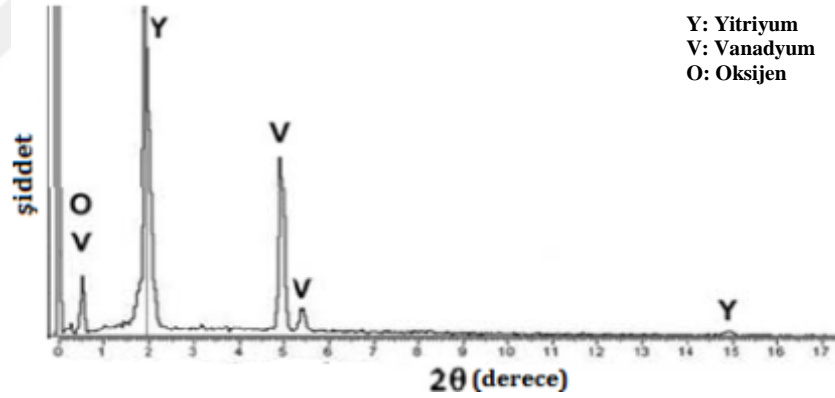


Kullanılan yakıtın istenen kalitede olmaması (yakıtta sodyum (Na), fosfor (P), vanadyum (V) ve kurşun (Pb) gibi elementlerin varlığı) veya servis koşullarından kaynaklanan olumsuz durumlarda yukarıda verilen korozyon mekanizmalarının gerçekleşmesiyle üst tabakanın bütünlüğünü bozularak kaplama hasara uğramaktadır.

Literatürdeki yapılan çalışmalarda YSZ’de hasara yatkın olan kısmın stabilazör olan Y olduğu belirtilmiştir (Eliaz, 2002; Afrasiabi ve ark., 2008a). Şekil 3.8.a)’da Sıcak korozyon sonrası YSZ içerikli plazma sprej kaplamanın üst yüzey SEM görüntüsü ve Şekil 3.8.b)’de A noktasından alınan EDX analizi verilmiştir.



a)

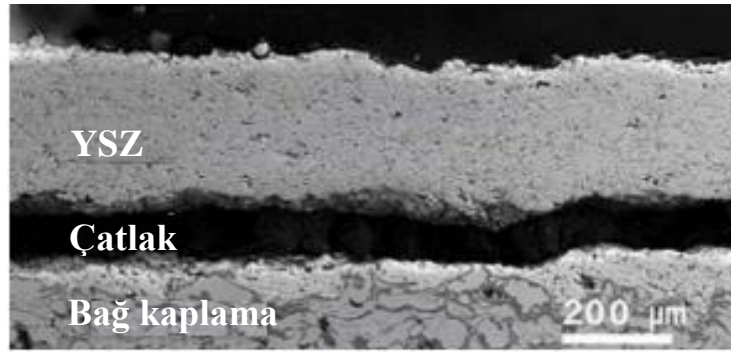


b)

Şekil 3.8. a) Sıcak korozyon sonrası YSZ içerikli plazma sprej kaplamanın üst yüzey SEM görüntüsü ve b) A noktasından alınan EDX analizi (Saremi M., 2007)

Şekil 3.9’da Sıcak korozyon sonrası YSZ içerikli plazma sprej kaplamanın kesit SEM görüntüsü verilmiştir.





**Şekil 3.9.** Sıcak korozyon sonrası YSZ içerikli plazma sprey kaplamanın kesit SEM görüntüsü (Saremi M., 2007)

TBC'lerde agresif çalışma ortamından kaynaklı olarak meydana gelen hasar mekanizmalarından biri olan sıcak korozyon, hasar oluşum sıcaklığına göre kendi içinde Tip I ve Tip II sıcak korozyon olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Bu iki sıcak korozyon türü; başlıca kirlenici kompozisyonu, ortam sıcaklığı, ortamdaki gazların bileşimi gibi parametrelerin etkisi altında ilerlemektedir. Bu arada her ne kadar sıcak korozyonun oluşumu alaşımın bileşimine bağlı olsa da, ortam sıcaklığı yüksek sıcaklık korozyonunu tetikleyen en önemli etkenlerden birisidir (Eliaz, 2002).

Tip I sıcak korozyonunun oluşum aralığı 800°C-950°C olarak kabul görmektedir. Türbin bıçak ve kanatçıkları yüksek sıcaklıklarda çalıştılarından dolayı Tip I sıcak korozyonuna maruz kalmaktadır. Bu sıcaklıklarda düşük yakıt kalitesinden kaynaklı emrüteler ve ortamda bulunan alkali tuzların erimesiyle Tip I sıcak korozyon hasarını da beraberinde getirmektedir. Öncelikle metalik veya süperalaşım esaslı çalışma parçası yüzeyinde açık havanın da etkisi ile oksit tabakası meydana gelir. Bununla birlikte en önemli kaynağı olan ve bünyesinde  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{NaCl}$  gibi tuzları barındıran deniz suyundan gelen  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  tuzu yüksek sıcaklıklarda termodinamik kararlılığa sahiptir. Yanmanın gerçekleştiği sırada sodyum ve sülfürün tepkimesi sonucu oluşan sodyum sülfat; yakıtta karışarak daha sonra oluşacak hasara zemin hazırlar. Havadan veya yakıttan gelen vanadyum, fosfor ve kurşun gibi emrüteler sodyum sülfatla birleşerek daha düşük sıcaklıklarda eriyen tuz karışımlarını oluştururlar. Tip I sıcak korozyon hasarının oluşumu dört evrede gerçekleşir.

Birinci evrede; düşük yüzey pürüzlülüğüne paralel olarak oluşan oksit tabakasında yer yer bozunma meydana gelir. Ancak yüzey bütünlüğünde herhangi bir değişim söz konusu değildir.

İkinci evrede; oksit tabakasının ilerlemesiyle yüzeyde bozunmalar ve kırılmalar artmaktadır. Bunun sonucu olarak yüzey pürüzlülüğünde büyük ölçüde artışa sebep olmaktadır.

Üçüncü evrede; oksitlenme artık kritik eşiğe ulaşmıştır. Malzeme bütünlüğünü kaybetmiştir ve işlevini yitirmiştir.

Dördüncü evrede; artık geri dönüşü olmayan sıcak korozyon hasar durumu söz konusudur. Sıcak korozyon hasarı, çalışma parçasının yüzeyinden daha derinlere ulaşmıştır.

Tip II sıcak korozyonun oluşum aralığı ise genel olarak 670°C-750°C olarak kabul görmüştür. Tip II korozyonu yüksek çalışma sıcaklığına sahip türbin bıçaklarında ve kanatçıklarında nadiren görülen bir korozyon türüdür. Ancak daha düşük çalışma sıcaklıklarına sahip deniz endüstrisinde ve endüstriyel gaz türbinlerinde sıklıkla rastlanmaktadır. Tip II sıcaklık sıcak korozyonu  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{CoSO}_4$  karışımının ötektik ergime sıcaklığı olan 540 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda genelde karıncalanma (pitting) şeklinde meydana gelmektedir.  $\text{CoSO}_4$  ise, Co esaslı alaşımlardan üretilmiş türbin bıçak ve kanatçıkların yüzeyinde yanan gazların bir ürünü olan  $\text{SO}_3$  ile etkileşimi sonucu oluşmuş olan reaksiyonun bir tür korozyon ürünüdür. Benzer şekilde  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ - $\text{NiSO}_4$  ikilisinin ötektik dönüşümü Ni esaslı süper alaşımlarda da görülmektedir.

Sonuç olarak gaz fazında bulunan  $\text{SO}_3$ 'ün kısmi gaz basıncı, meydana gelecek olan Tip I sıcaklık sıcak korozyonu ile Tip II sıcak korozyonunu karşılaştırırken göz önünde bulundurulmalıdır. Genelde Tip II sıcak korozyonunda Tip I sıcak korozyonunun aksine herhangi bir kuluçka evresi gerçekleşmez (Eliaz, 2002).

#### **3.2.4. Termal çevrim hasarı**

TBC'lerin termal çevrim davranışların test edilmesi, TBC'lerin gelişim süreci adına önem arz etmektedir. Uzay ve havacılık endüstrisinde gaz türbin bıçak ve kanatçıklarının seramik üst kaplamalarının üretilmesinde atmosferik plazma sprey yöntemi sıklıkla kullanılmaktadır. Seramik üst kaplamanın mikroyapısı, TBC'lerin servis sürelerini ve performansını etkileyen en önemli parametrelerden birisidir. APS yönteminin karakteristik özelliği gereği kaplama yapının splatlardan oluşması, lameller arası boşlukların varlığı ve yüzeyde porozite ve çatlakların olması; TBC sistemlerinin termal çevrim davranışları ve performansı üzerinde direkt etkilidir.

APS yöntemi kullanılarak üretilen seramik üst kaplamaların yaklaşık % 3-20 oranında yüksek gözenek içermesi kaplamada termal iletkenliği azaltmakta ve önemli bir avantaj sağlamaktadır. Şöyle ki; kaplamadaki bu gözenek miktarı arttıkça kalıntı gerilme miktarı azalmaktadır. YSZ içerikli seramik üst kaplamada meydana gelen kalıntı gerilmeler metal ve seramik arasındaki termal genişleme farkından ileri gelmektedir. Aynı zamanda APS tekniği ile üretilen seramik üst kaplama yüzeyinde hızlı soğuma sonucu oluşan mikro çatlakların kümelenerek artış göstermesi termal çevrim ömrünün olumsuz yönde etkilenmesine sebep olmaktadır.

Sonuçta; TBC sistemlerindeki gözenek, farklı açılarda yönlenmiş mikro çatlaklar ve belli bölgelerde mikro çatlakların yoğunlaşmış olması; termal çevrim ömrünün etkileyen temel bileşenlerdir. Bu bileşenlerin oluşum mekanizmaları ve birbirleriyle etkileşimleri iyi analiz edilmesi TBC'lerin termal çevrim odaklı hasar mekanizmasına karşı göstereceği dayanım açısından son derece önem arz etmektedir.

Uzay ve havacılık endüstrisinin en önemli parçalarından olan türbin bıçakları ve kanatçıkları APS tekniği kullanılarak seramik üst kaplamalar üretilmektedir. Bu yöntem ile üretilen parçaların kullanıldığı yüksek termal yüklenme koşullarında kullanılabilmesi için yüksek termal çevrim direncine karşı hassasiyetlerinin minimum seviyede olması istenir.

APS yöntemi ile üretilen kaplamalar, termal çevrim prosesi esnasında oluşan gerilme enerjisi sebebiyle, daha çok üst kaplamanın yüzeyden ayrılarak kalkması sonucunda hasara uğramaktadır. Biriken bu gerilmenin minimum seviyelere çekilebilmesi için getirilen yaklaşımlardan biri de gözenekli kaplamaların kullanılmasıdır. Çünkü kaplamalardaki mikro çatlak ve gözenek içeriğinin gerilmenin bir kısmını kendi bünyesinde hapsedebilecek özelliğe sahiptir. Dolayısıyla APS ile üretilen kaplamalardaki termal çevrim testleri sonucu oluşan hasar mekanizmasının anlaşılabilmesi, gerilme seviyelerinin incelenmesi sonucu mümkün hale gelmektedir.

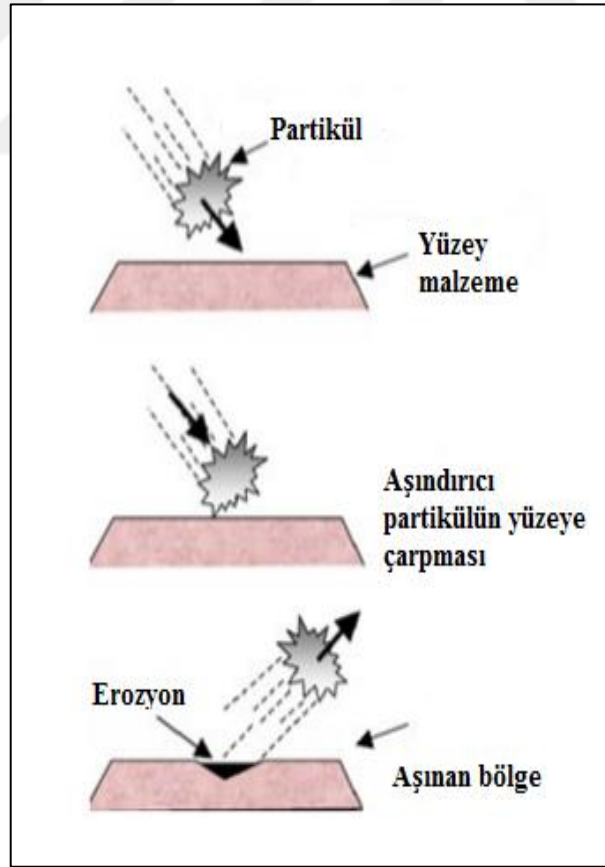
### **3.2.5 Katı partikül erozyonu hasarı**

Savunma, otomotiv, enerji, uzay, havacılık, gemi ve denizcilik gibi birçok endüstriyel alanda, katı partikül erozyonu kaynaklı hasarlar bileşenlerin kullanım koşulları altında ömürlerini azaltıcı yönde etki etmektedir. Katı partikül erozyonu, aşındırıcı partiküle ve aşınan yüzeyin özelliklerine bağlı olarak değişen farklı parametrelerin etkisi altında gerçekleşmektedir. Bu sebepten dolayı malzemelerin

tasarım ve imalat aşamalarında, katı partikül erozyonuna bağlı malzeme yüzeyinde meydana gelebilecek erozyon oranının en aza indirilmesine yönelik önleyici tedbirler alınmaktadır (Kaplan, 2016).

Tribolojik sistemin elemanları arasında karşılıklı zorlanmalar sonucunda meydana gelen aşınma, birçok mühendislik sisteminin performansını etkilemesine rağmen genellikle tasarım aşamasında ihmal edilen bir faktördür. Çoğu zaman ciddi tamirler veya yenileme maliyeti ile karşı karşıya kalınır ve makina parçalarının servis ömürlerini düşürür. Bu sebeplerden dolayı aşınma, tasarım sürecinde ele alınması gereken önemli bir süreçtir (Harsha ve ark., 2003; John Rajesh ve ark., 2004).

Mühendislik malzemelerinde meydana gelen aşınma, mühendislik malzemelerin performansını belirleyen önemli parametrelerden birisidir. Aşınma olayı genelde malzemenin yüzeyinde oluşan izafi bir hareket ve mekanik bir etkileşim sonucu oluşan malzeme kaybı olarak ifade edilmektedir (Cai ve ark., 2016). Şekil 3.10'da katı partikül erozyonu mekanizması gösterilmektedir.



Şekil 3.10. Katı partikül erozyonu mekanizması (Vipul, 2014)

Şekil 3.10’da katı partikül erozyonu mekanizmasında gösterildiği gibi makine parçaları abrasif bir ortamda katı partiküllerin taarruzuna uğramaktadır. Böylelikle malzeme yüzeyi bir aşındırıcı ve aşınan malzemeye bağlı olarak farklı parametreler altında erozif aşınmaya uğramaktadır.

Katı partikül erozyonu diğer aşınma süreçlerinde olduğu gibi birçok farklı parametrelerin etkisi altında gerçekleşen karmaşık bir olaydır. Katı partikül erozyonu odaklı hasarlarda, malzeme yüzeyine farklı açılarla ve belirli bir hızla çarpan sert ve aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyini aşındırması sonucu yüzeyde bir malzeme kaybı gerçekleşir. Dolayısıyla katı partikül erozyonu sonucu birçok mühendislik uygulamalarında malzeme kayıplarıyla karşılaşmaktadır (Mann, 1999; Bose ve ark., 2005; Bousser ve ark., 2014).

Servis sırasında aşındırıcı bir ortamda mühendislik malzemeleri birçok zararlı dış etkiye maruz kalmaktadır. Çalışma ortamının katı partikül içermesi ve ağır çalışma şartları altında katı partiküllerin yüksek hızlarda ve farklı açılarda tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarpmaları sonucunda erozif aşınma meydana gelmektedir (Avcu ve ark., 2013). Bu erozif aşınma sonucu malzeme yüzeyinde malzeme kaybı meydana gelmekte ve çalışan malzeme hasara uğramaktadır. Erozif aşınma ile ilgili ilk çalışmalar 1950’lerde başlayıp, gelişerek günümüze kadar gelmiştir. Bu tarihten günümüze metalik/metalik olmayan malzemelerin, kompozit malzemelerin, kaplanan yüzeylerin vb. mühendislik malzemelerinin katı partikül erozyonu davranışları üzerine çok sayıda çalışma yapılmıştır (Bhushan, 2001; Sinmazcelik ve Sari, 2009).

Literatürde gerçekleştirilen çalışmaların büyük bir çoğunluğu bu süreç sonucunda meydana gelen erozyon oranının en aza indirilmesine ve önlenmesine yönelik yapılan çalışmalardır. Bu nedenle konu ile ilgili yapılan birçok çalışma farklı mühendislik malzemelerinin farklı parametreler altında katı partikül erozyonu sonucu göstermiş oldukları davranışlarının anlaşılmasına yönelik gerçekleştirilmektedir (Gupta ve ark., 2014).

## 4. MATERYAL VE YÖNTEM

### 4.1 Amaç

Gerçekleştirilen çalışmada nikel esaslı süper alaşım malzeme olan Inconel 718 altlık üzerine APS termal spreyci kaplama tekniği kullanılarak CoNiCrAlY metalik bağ kaplama üretimi ve YSZ seramik üst kaplamaların üretimi gerçekleştirilmiştir. CoNiCrAlY tozu kullanılarak üretimleri gerçekleştirilen bağ kaplama tabaka kalınlığı yaklaşık olarak 100 µm ve YSZ (ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) içerikli seramik üst kaplama tabaka kalınlığı ise yaklaşık 300 µm olarak belirlenmiştir. Üretilen TBC'ler, özellikle türbin bıçak ve kanatçıkların servis kullanım koşullarında karşılaşılan üç ayrı hasar testine tabi tutulmuştur. Uygulanan üç ayrı hasar testlerinden sonra TBC'lerin sergilemiş oldukları davranışları gözlenmiştir.

Öncelikle üretimi gerçekleştirilen TBC'lerin servis sıcaklığı olan 1150 °C'de termal çevrim deneyleri yapılmıştır. Deneyin sonunda TBC'lerde oluşan TGO oluşum yapısı ve büyüme davranışı incelenmiştir.

Ayrıca TBC'lerin 1000 °C'de dörder saatlik çevrimler ile her çevrimin ardından Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> toz karışımları numune yüzeyine uygun bir şekilde serilerek sıcak korozyon testine tabi tutulmuştur. Sıcak korozyon testi öncesinde, sonrasında ve test sırasında yapılan karakterizasyon çalışmaları ile birlikte numunelerde meydana gelen faz yapı değişimleri incelenmiştir.

Son olarak TBC'lerin katı partikül erozyonu aşınma testleri; erozif aşınma deneyleri için özel olarak tasarlanan erozif aşınma test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Erozyon aşınma test düzeneğinde; numune fikstürü, kumlama tabancası, kumlama kabini basınçlı hava kompresörü ve elemanları yer almaktadır. Katı partikül erozyonu deneyi sonrası mikroyapısal karakterizasyonları gerçekleştirilmiş ve TBC'lerin göstermiş oldukları davranışlar incelenmiştir.

Sonuçta; yapılan üç ayrı hasar testlerinden elde edilen veriler ve sonuçlar literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak karşılaştırmalı olarak incelenerek değerlendirilmiş ve açıklanmıştır.

Kaplamaların üretimi, karakterizasyonu, termal çevrim, sıcak korozyon ve katı partikül erozyonu deneyleri; Bartın Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü laboratuvarlarında, Kocaeli Üniversitesi Ford Otosan İhsaniye Otomotiv

Meslek Yüksekokulu, Mekanik Yüzey İşlemleri Laboratuvarı ve Kocaeli Üniversitesi Aslan Bey Meslek Yüksekokulu laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

Farklı yöntemlerle bağ kaplama üretimleri yapılmış olan TBC'lerin, mikroyapı ve mekanik özellikleri incelenmiş ve birbirleriyle karşılaştırmaları yapılmıştır. Bu kapsamda üretilen TBC'lerin; sıcak korozyon, termal çevrim ve katı partikül erozyon testleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra gerçekleştirilen bu testlerden elde edilen sonuçlar, her bir test için literatürdeki çalışmalar ile kıyaslanarak açıklamalar getirilmiştir.

#### 4.2 Toz ve Altık Malzemelerin Karakterizasyonu

Deneysel çalışmalarda, altlık malzeme olarak Ni esaslı süper alaşım Inconel 718 kullanılmıştır. Bağ kaplamaların üretilmesinde kullanılan tozlar CoNiCrAlY ve üst kaplamaların üretilmesinde kullanılan tozlar ise  $ZrO_2-8\%Y_2O_3$  (YSZ)'den oluşturmaktadır. Her iki toz malzemenin üretici firmaları ve firmaların vermiş olduğu partikül boyut aralıkları Çizelge 4.1'de gösterilmektedir.

Çizelge 4.1. Toz malzemelere ait özellikler

Toz kompozisyonu (% Ağ.)	Partikül boyut aralığı ( $\mu m$ )	Üretici firma
CoNiCrAlY	5-37	Sulzer Metco
YSZ, $ZrO_2+Y_2O_3$	20-45	Sulzer Metco

TBC sistemini oluşturan bağ ve üst kaplamalar ile servis koşulları altında oluşan TGO tabakasına ait fiziksel malzeme özellikleri Çizelge 4.2'de belirtilmektedir.

Çizelge 4.2. TBC sistemine ait malzeme özellikleri (Evans, 2001)

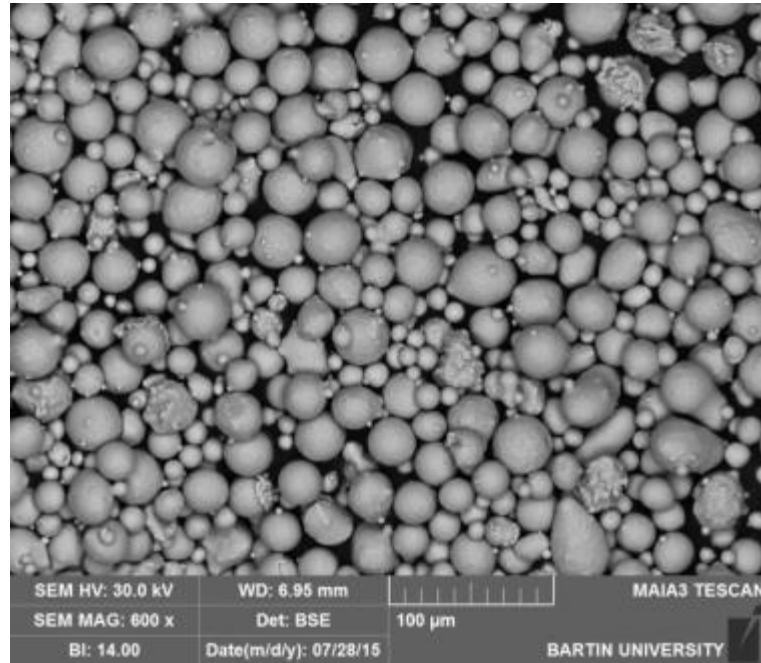
Kaplama yapıları	Young modülü, $E_o$ (GPa)	Termal genleşme katsayısı, ( $10^{-6}K^{-1}$ )
TGO ( $Al_2O_3$ )	350-400	8-9
Bağ kaplama (CoNiCrAlY)	200	13-16
Üst kaplama (YSZ, $ZrO_2+Y_2O_3$ )	0-100	11-13

### 4.3 Toz Malzemelerin Partikül Boyutu Dağılımı Analizleri

Kaplamalarda kullanılan toz malzemelerin lazer ile partikül boyut dağılımı analizleri Microtrack S3500 (ISO 13320-1) marka cihaz kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bağ ve üst kaplamalarda kullanılan toz malzemelere ait partikül boyut dağılımları sırasıyla 31.75  $\mu\text{m}$  ve 33.69  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.

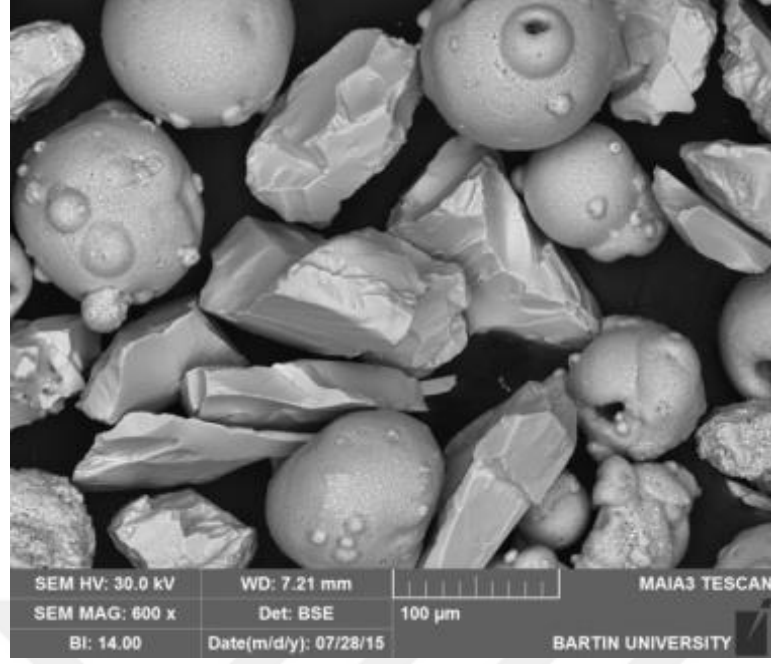
### 4.5 Toz Malzemelerin Mikroyapısal Karakterizasyonu

Toz ve altlık malzemelerin karakterizasyonu MAIA3 TESCAN marka SEM cihazı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda kullanılan bağ kaplama tabakasının üretiminde ticari CoNiCrAlY (Amdry 9951, Sulzer Metco) esaslı kaplama toz malzemesi, seramik üst kaplamaların üretiminde ise ticari YSZ ( $\text{ZrO}_2/\text{Y}_2\text{O}_3$ , GTV) esaslı kaplama toz malzemesi kullanılmıştır. Şekil 4.1'de CoNiCrAlY tozlarına ait morfoloji verilmiştir. Şekil 4.1'den CoNiCrAlY tozlarının küresel morfolojiye sahip olduğu görülmektedir. Şekil 4.2'de YSZ kaplama tozuna ait toz morfolojisi gösterilmektedir. Bu SEM görüntüsünde küresel olanlar yitriya olup küresel olmayanlar zirkonya tanecikleridir.



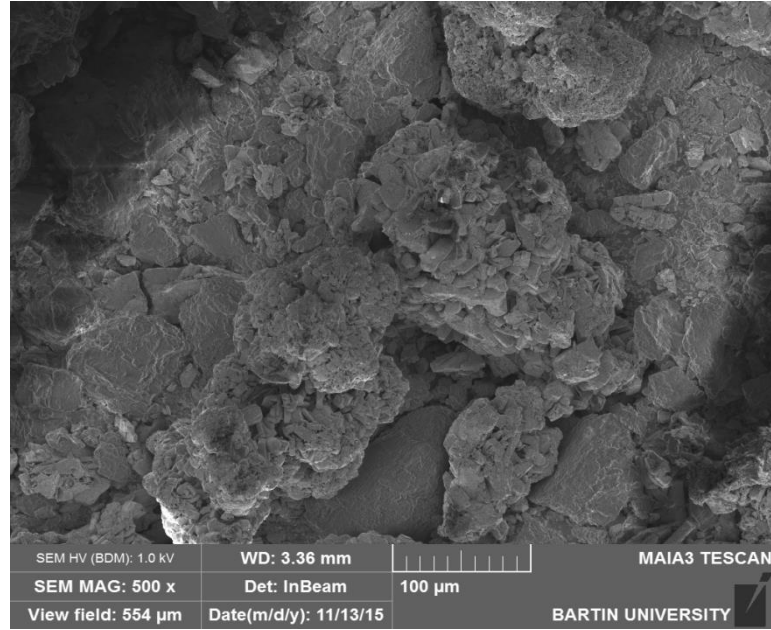
Şekil 4.1. CoNiCrAlY kaplama toz morfolojisine ait SEM görüntüsü





Şekil 4.2.  $ZrO_2-8\%Y_2O_3$  kaplama toz morfolojisine ait SEM görüntüsü

Şekil 4.3'te ise sıcak korozyon testinde kullanılan tuz karışımının ( %50  $Na_2SO_4$  + %50  $V_2O_5$  ) SEM görüntüsü verilmiştir. Bu tuzların sırasıyla Şekil 4.1'de ve 4.2'de verilen CoNiCrAlY ve YSZ tozları gibi tanecikli yapıda olmadığı görülmektedir.

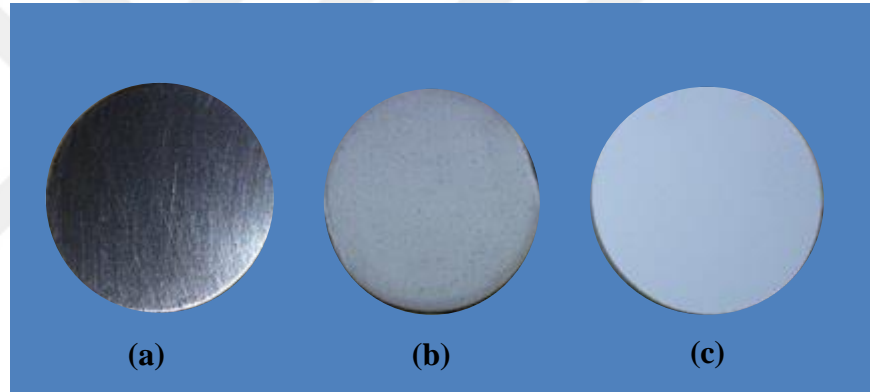


Şekil 4.3. Tuz karışımının (%50  $Na_2SO_4$  + %50  $V_2O_5$ ) SEM görüntüsü

#### 4.6 Altlık Malzemelerin Kimyasal Kompozisyonu

Deneysel çalışmalarda altlık malzeme olarak kullanılan Inconel 718, genel olarak yüksek korozyon direnci ve sürünme dayanımına sahip olan, havacılık ve uzay endüstrisinde yüksek sıcaklık uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılan bir alaşımdır. Bu sebeple deneysel çalışmalarda altlık malzeme olarak Inconel 718 seçilmiştir.

Inconel 718 malzeme önce tel erozyon yöntemiyle kesilmiş ve 25,4 mm çapında ve 4 mm kalınlığında yuvarlak kesite sahip parçalar üretilerek hasar deneylerinde kullanılacak numuneler hazır hale getirilmiştir. Şekil 4.4'te testlerde kullanılan Inconel 718 süper alaşım altlığın; (a) kaplanmamış, (b) bağ kaplama yapılan ve (c) üst kaplama yapılan üst yüzey resimleri verilmektedir.



**Şekil 4.4.** Testlerde kullanılan Inconel 718 süper alaşım altlığın; (a) kaplanmamış, (b) bağ kaplama yapılan ve (c) üst kaplama yapılan üst yüzey resimleri

#### 4.7 TBC'lerin Üretilmesi

Inconel 718 süper alaşım altlıkların üzerine yapılan bağ kaplamaların üretilmesinde HVOF yöntemi ve üst kaplamaların üretilmesinde ise APS yöntemi kullanılmıştır. Kaplama prosesleri öncesi deneysel çalışma numunelerine, yüzeylerin istenmeyen kalıntılardan (yağ, toz, kalıntı metal) temizlenerek belli bir pürüzlük değerine ulaşması ve kaplamanın yapışma mukavemetinin artmasının sağlanması amacıyla kumlama prosesi uygulanmıştır. Kumlama prosedürü olarak, yaklaşık 10 cm'lik mesafeden yüzeye 75°'lik açı yapacak şekilde altlık malzemeler için 2,5 bar, üst kaplama öncesi bağ kaplamalar için 1-1,5 bar değerindeki basınçlı hava yardımı ile toz boyutu 250 µm olan Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozları püskürtülmüştür. Kaplama proseslerinin sağlıklı

olarak yürütülebilmesi için, yüzey pürüzlülük ölçüm işlemi sonrasında ve kaplama proseslerinden önce numune yüzeyleri etil alkol içerisinde ultrasonik temizleme yöntemi ile temizlenerek kaplama proseslerine hazır hale getirilmiştir.

Kaplama prosesinde kullanılacak her bir numune grubundan referans numuneler alınarak, numunelerin belirli noktaları işaretlendikten sonra yüzey kalınlıkları  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüş ve kaplama prosesindeki ortalama kalınlık değişimleri saptanmıştır. Kaplama sprej koşulları, literatürde bu alandaki çalışmalar incelenmiş, sprej ekipmanı ve toz üreticisi tarafından sağlanan standart koşullar olarak belirtilen referanslar ve bu alandaki deneyimleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

Kaplama sprej proseslerinde kullanılan numunelerin bağ ve üst kaplama tozu ve kalınlıkları yaklaşık olarak sırasıyla 100  $\mu\text{m}$  kalınlığa sahip CoNiCrAlY içerikli bağ ve 300  $\mu\text{m}$  kalınlığa sahip  $\text{ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$  seramik üst kaplamadan oluşmaktadır. Katı partikül erozyonu, sıcak korozyon ve termal çevrim deneylerinde kullanılan TBC'lerin altlık ve kaplama tabakalarına ait şematik gösterim ile bağ ve üst kaplamaların üretilmesinde kullanılan sprej tabancası ve toz özellikleri Çizelge 4.3'de verilmektedir.

**Çizelge 4.3.** Bağ ve üst kaplamalara ait sprej tabancası ve toz özellikleri

Kaplama Türü	Sprej tabancası		Toz malzeme özellikleri	
	Yöntem	Üretici	Toz üreticisi	Nominal partikül boyutu ( $\mu\text{m}$ )
Bağ Kaplama	APS	F6-GTV Germany	CoNiCrAlY, Amdry 9951, (Sulzer Metco)	5-37
Üst Kaplama			$\text{ZrO}_2\text{-8\%Y}_2\text{O}_3$ (Sulzer Metco)	20-45

#### 4.8 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Kaplama öncesi kumlama yapılan altlık malzeme, bağ ve üst kaplamalara ait yapılan yüzey pürüzlülük ölçüm değerleri DIN EN ISO 3274 standart normuna göre, Contact Stylus Instrument Hommelwerke marka cihaz kullanılmıştır. Standart gereğince her bir numunenin üzerinde 6 ile 8 arasında değişen farklı noktalarından olmak üzere ölçüm yapılmış ve ortalama yüzey pürüzlük değerleri elde edilmiştir.

#### 4.9 Altlık ve Kaplamaların Yüzey Pürüzlülük Ölçümleri

Kumlama sonrası altlık malzeme, bağ kaplamalara ve üst kaplamalara ait ortalama yüzey pürüzlülük değerleri Çizelge 4.4'te verilmektedir.

**Çizelge 4.4.** Deneysel numunelerin yüzey pürüzlülük değerleri

Malzeme ve Kaplamalar	Ra ( $\mu\text{m}$ )	Rz ( $\mu\text{m}$ )
Inconel 718 (Kumlama yapılmış)	5,38	33,26
APS- Bağ kaplama	7,34	48,32
APS-Üst kaplama	5,15	35,21

#### 4.10 Bağ ve Üst Kaplamaların Üretilmesine Kullanılan Sprey parametreleri

APS tekniğiyle üretilen bağ kaplamaların ve üst seramik kaplamaların üretilmesinde kullanılan kaplama üretim parametreleri Çizelge 4.5'te verilmiştir.

**Çizelge 4.5.** Bağ ve üst kaplama üretiminde kullanılan proses parametreleri

<b>APS-Bağ Kaplama</b>			
Ark akımı	Elektriksel güç	Argon akış oranı	Hidrojen akış oranı
600 A	40 kW	65 slpm	14 slpm
Toz besleme oranı	Kaplama Mesafesi		
30 g/dk	140 mm		
<b>APS-Üst Kaplama</b>			
Ark akımı	Ark voltajı	Elektriksel güç	Argon akış oranı
630 A	65 V	40 kW	44 slpm
Hidrojen akış oranı	Toz Besleme oranı	Kaplama Mesafesi	
13 slpm	25 g/dk	90 mm	

#### 4.11 TBC'lerin Karakterizasyonu

Termal çevrim ve sıcak korozyon testlerinin yapılmasının ardından TBC'ler metalografik numune hazırlama işlemlerinden geçirilmiştir. Metalografik olarak numunelerin bakalite yerleşecek şekilde hazırlanması için belirli ebatlarda olması gerektiğinden dolayı, disk şeklindeki her bir numune hassas kesme cihazı ile dört eşit parçaya kesilmiştir. Termal çevrim ve sıcak korozyon testlerine tabi tutulan TBC'lerin oda sıcaklığına yakın derecelere soğumasından hemen sonra hassasiyetlerinin bozulmaması için soğuk olarak bakalite alınmışlardır.

Daha sonra soğuk bakalite alınan numuneler sırasıyla 120, 240, 320, 400, 600, 800, 1000 ve 2000 mesh SiC disk zımparalar kullanılmıştır. Bununla birlikte her zımparalama işlemine yaklaşık beş dakika devam edilmiştir. Zımparalama işleminin ardından zımparalama işlemi tamamlanan numunelere 0,25 µm, 1 µm ve 3 µm'lik elmas aşındırıcı içeren solüsyonlar kullanılarak parlatma işlemi uygulanmıştır. TBC numuneleri metalografik çalışmanın ardından SEM incelemesi için vakum altında, yaklaşık 100 °C sıcaklıkta ve yaklaşık 30 dakika bekletilerek fiziksel suyun uzaklaştırılması sağlanmıştır. Bu işlemden sonra TBC'lerdeki üst seramik kaplama tabakası seramik esaslı YSZ ihtiva etmesinden dolayı SEM görüntüleme cihazında numunelerden istenen iletkenliğin sağlanması için altınla kaplanmışlardır. TBC'lerin SEM incelemeleri için TESCAN ve FEI Model Quanta 450 FEG-EDS SEM cihazı kullanılmıştır.

Bu cihazlar ile TBC'ler SEM, EDX-elementel ve haritalama incelemelerine tabi tutulmuştur. Şekil 4.5'te SEM'de görüntü almadan önce hazırlık aşamasında termal çevrim ve sıcak korozyon testleri sonrası TBC'lerin soğuk bakalite alınmış hali görülmektedir.



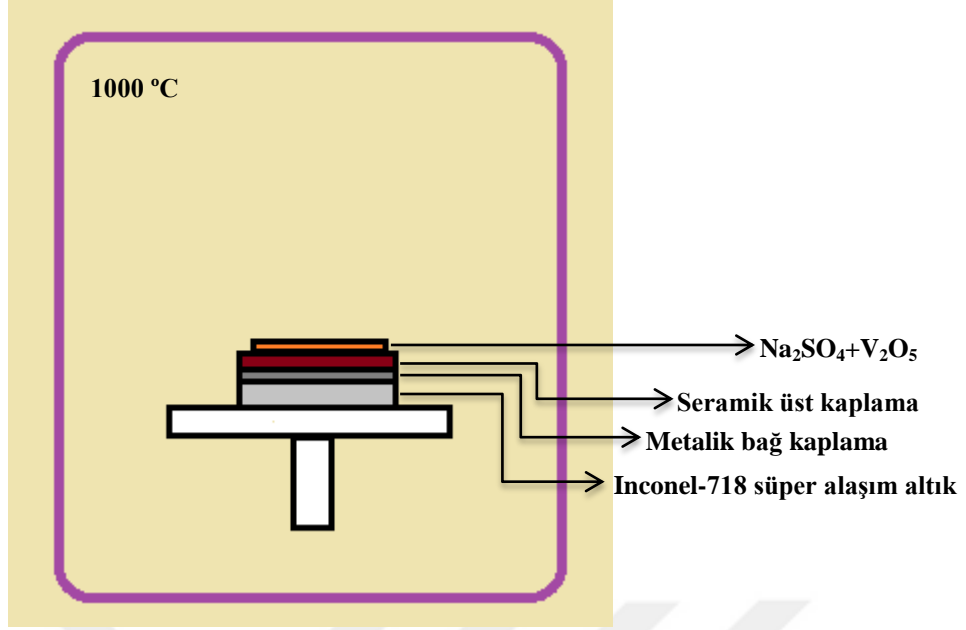
**Şekil 4.5.** SEM’de görüntü almadan önce hazırlık aşamasında termal çevrim ve sıcak korozyon testleri sonrası TBC’lerin soğuk bakalite alınmış hali

#### 4.12 Sıcak Korozyon Testleri

Sıcak korozyon testleri farklı yöntemlerle yapılabilmektedir. Bu yöntemlerden ilki daldırma veya batırma olarak bilinen sıcak korozyon testidir. Bir diğer sıcak korozyon testi ise, tuz kaplama metodudur, yani test edilecek numunenin tamamının veya yüzeyinin bir kısmının tuzla kaplanmasıdır. Bu yöntem akademik çalışmalarda korozyon mekanizmasını analiz etmek için en yaygın kullanılan metottur (Eliaz, 2002; Young, 2008).

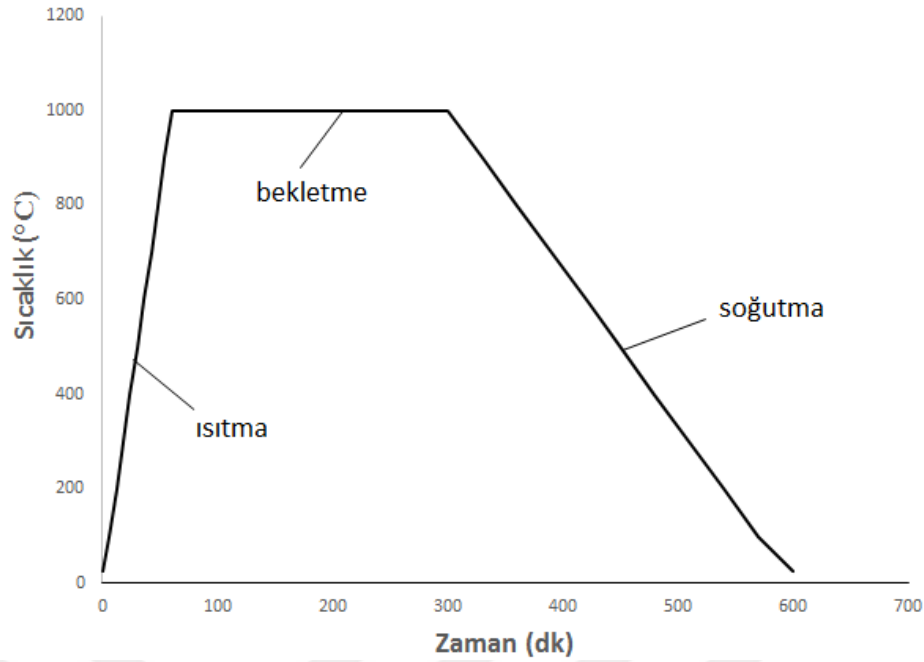
CoNiCrAlY ve YSZ kaplamalar sırasıyla Inconel 718 altlık üzerine APS tekniği ile uygulanmıştır. Bu kaplamaların kalınlıkları sırasıyla yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  ve 300  $\mu\text{m}$  dur. TBC numuneleri üretimin ardından sıcak korozyon testine tabi tutulmuştur.

Sıcak korozyon testleri Protherm markalı yüksek sıcaklık fırınında gerçekleştirilmiştir. Aynı zamanda sıcak korozyon testlerinde Merck marka  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  (%99 saflıkta) ile Acros Organics marka sahip  $\text{V}_2\text{O}_5$  (%98 saflıkta) tuzların karışımı kullanılmıştır. Bu karışım her iki tozun  $\frac{1}{2}$  oranında karıştırılması ile elde edilmiştir. Şekil 4.6’da sıcak korozyon testi verilmiştir.



Şekil 4.6. Sıcak korozyon testi

Sıcak korozyon deneyleri Protherm markalı yüksek sıcaklık fırınında 1000°C’de dörder saatlik çevrimler şeklinde yapılmıştır. Fırın atmosfere açık bir ortamda çalışmaktadır. Şekil 4.5’te görüldüğü gibi karışım tozu yüksek sıcaklıkta oluşan kenar etkiden kaçınmak amacıyla TBC numunesinin kenar kısımlarına gelmeyecek şekilde serilmiştir. Fırın içerisinde 1000 °C’de dört saat boyunca sıcak korozyon testinden sonra TBC numuneleri fırın içerisinde oda sıcaklığına kadar beklenir. TBC’ler oda sıcaklığına kadar soğuduktan sonra fırından çıkartılmış ve karakterizasyon testleri gerçekleştirilmiştir. Bu karakterizasyon testleri makro fotoğraf görüntüleme, XRD ve SEM/EDX analizlerinden oluşmaktadır. Böylece bu çevrim ve sonundaki karakterizasyon testleri numunenin bozulmasına kadar devam etmiştir. Sıcak korozyon testleri, kaplamalardaki bozunma % 25 olduğunda sonlandırılmıştır. Isınma, bekleme ve soğuma süreleri toplam on saati bulmaktadır. Şekil 4.7’de sıcak korozyon testinde kullanılan çalışma çevrimi verilmiştir.



Şekil 4. 7. Sıcak korozyon testinde kullanılan çalışma çevrimi

Literatürde yapılan çalışmalarda sıcak korozyon testi için numune üzerine farklı toz karışımları ve farklı toz oranlarında konduğu belirtilmektedir. Bajpai ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada YSZ seramik üst kaplamaya sahip TBC numunesinin 750 °C’de ve 24-76 saatlerde yapılan sıcak korozyon testinde MgO’nun inhibitör etkisinin araştırılması amacıyla Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+MgO toz karışımı kullanılmıştır (Bajpai ve ark., 2015). Ghasemi ve arkadaşlarının yapmış oldu bir çalışmada ise % 45 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + % 55 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tuz karışımı kullanılmıştır. 910 °C’lik fırın sıcaklığında 30 saat süre sonunda YSZ üst kaplamada bozunmaların meydana geldiği belirtilmiştir (Ghasemi ve ark., 2014). Çizelge 4.6’da sıcak korozyon ortamında bulunan korozif tuzlar ve özellikleri verilmiştir.

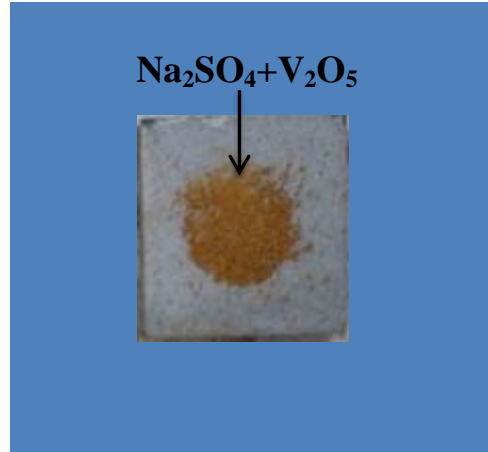
Çizelge 4.6. Sıcak korozyon deneyinde kullanılan korozif tuzların fiziksel özellikleri

Tuz türü	Ergime Noktası (°C)	Yoğunluk (gr./cm <sup>3</sup> )
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	884	2,7
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	690	3,3

Doktora tez çalışmasında ise; % 50 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + % 50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> oranında tozlar karıştırılarak sıcak korozyon deneylerinde kullanılmıştır. TBC numunesinin yüzey bu toz karışımdan 10 mg/cm<sup>2</sup> olacak şekilde serilmiştir. Bu bağlamda TBC numunesinin



yüzey alanı hesaplanarak konulacak toz karışımın miktarı belirlenmiştir. Şekil 4.8’de sıcak korozyon testi öncesi fırına verilmek üzere hazırlanmış TBC numunesinin görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.8. Sıcak korozyon testi öncesi fırına verilmek üzere hazırlanmış TBC numunesi

#### 4.13 Termal Çevrim Testleri

Termal çevrim testleri farklı yöntemleri ile TBC’lerin gelişimi, performanslarının artırılması ve özelliklerinin incelenmesi amacıyla, özellikle havacılık ve gaz türbin endüstrisinde uygulanmaktadır. TBC’ler türbin bıçak ve kanatçıklarından oluşan gaz türbin parçaları çoğunlukla yüksek ısı maruziyet altında kullanılmaktadır.

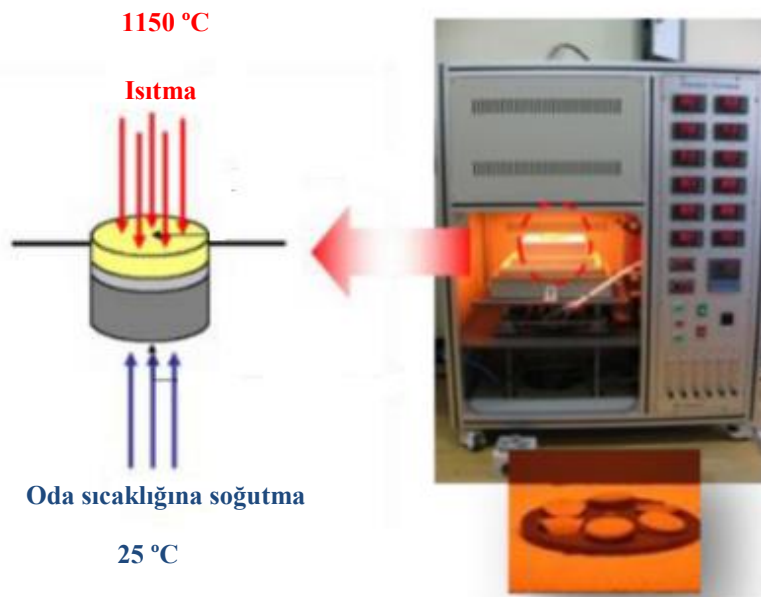
Bu tez çalışmasında kullanılan ve ayrıca havacılık endüstriyel uygulamalarında da sıklıkla kullanılan yöntemlerden biri fırın çevrim testleri (FCT)’dir. Bu test yöntemi fırın ortamında gerçekleştirilmekle birlikte, termal çevrim ve çevrimsel şartlar altında TGO büyümesine bağlı olarak ilerleyen gerilmeler sonucunda bağ/seramik kaplama ara yüzeyinde gerilmeler oluşmaktadır. Bu fırın çevrim testleri servis şartlarını çok iyi yansıttığından dolayı gerçek motor kondisyon davranışlarını en iyi bir şekilde aktarmaktadır. Çünkü bu fırın deney prosesi TBC’lerde çevrimsel gerilmeler oluşturmasının yanında aynı zamanda şiddetli oksitlenme sonucu bağ kaplamanın da bozunmasına sebep olmaktadır. Termal çevrim test koşullarında, TBC’lerin uzun süreli yüksek sıcaklıklara maruz kalması sonunda bağ kaplamanın oksitlenmesi sağlanmaktadır.

Bu fırın çevrim testleri sisteminde TBC numuneleri genelde 1000–1200 °C sıcaklık aralıklarında oksidasyona tabi tutulmaktadır. Daha sonra çevrimli süreçlerle

oda sıcaklığına soğutulmaktadır. TBC'lerde oluşan ısıl değişim, ısıtma ve soğutma rejimi esnasında oluşmaktadır. Isıtma işlemi fırın içerisinde, hava soğutması ise açık havada beklemek suretiyle veya fan vb. bir donanım ile gerçekleştirilmektedir. Havacılık endüstrisinde motor türbin parçaları için bir çevrim hemen hemen 60 dakikalık süreçlerde gerçekleşmekte ve bu sürenin 45–50 dakikalık bir periyodu yükselen sıcaklıklarda, kalan 10–15 dakikalık diğer periyot ise soğutma (hızlı soğutma gerçekleştirilirse) esnasında harcanmaktadır. Termal çevrim testler, 1050–1135 °C ile oda sıcaklığı arasında değişen sıcaklık aralıklarında gerçekleştirilmektedir.

Endüstriyel gaz türbinlerinde ise, yüksek sıcaklıklarda kalma sürelerinin uzatılması amacıyla tipik olarak 24 saatlik çevrimler kullanılmaktadır. Bu çevrimlerin 23 saatlik bir periyodu yükselen sıcaklıklarda harcanmakta, kalan 1 saatlik periyodu ise soğutma esnasında kullanılmaktadır. Testlerde kullanılan sıcaklık aralıkları ise 1080 °C-1135 °C ile oda sıcaklığı arasında değişmektedir.

Termal çevrim testlerinde genelde disk şeklinde ve 25,4 mm ölçüye sahip numuneler kullanılmaktadır. Bunun yanında hasar kriteri olarak numunenin yüzeyinden itibaren yaklaşık olarak % 20'lik bir dökülme oranı esas alınmaktadır (Ruud ve ark., 2001; Tolpygo ve Clarke, 2003; Bolcavage, 2004; Spitsberg ve ark., 2005). Şekil 4.9'da TBC'lerin termal çevrim testlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan, FCT test düzeneği verilmiştir (Zhe, 2013).



**Şekil 4.9.** TBC'lerin termal çevrim testlerin gerçekleştirilmesinde kullanılan FCT test düzeneği (Zhe, 2013)

Bu tez çalışmasında Inconel 718 süperalaşım altlık malzeme üzerine, APS termal sprey kaplama yöntemi kullanılarak üretilen metalik bir bağ kaplama ve seramik üst kaplamaya sahip TBC sistemlerinin termal çevrim testleri, Ukrayna ulusal bilim akademisi bünyesinde faaliyet gösteren E. O. Paton Elektrik Kaynak Enstitüsünde bulunan ve özel tasarlanmış bir termal çevrim test düzeneğinde gerçekleştirilmiştir. Şekil 4.10'da deneysel çalışmalarda kullanılan termal çevrim deney düzeneği verilmiştir.

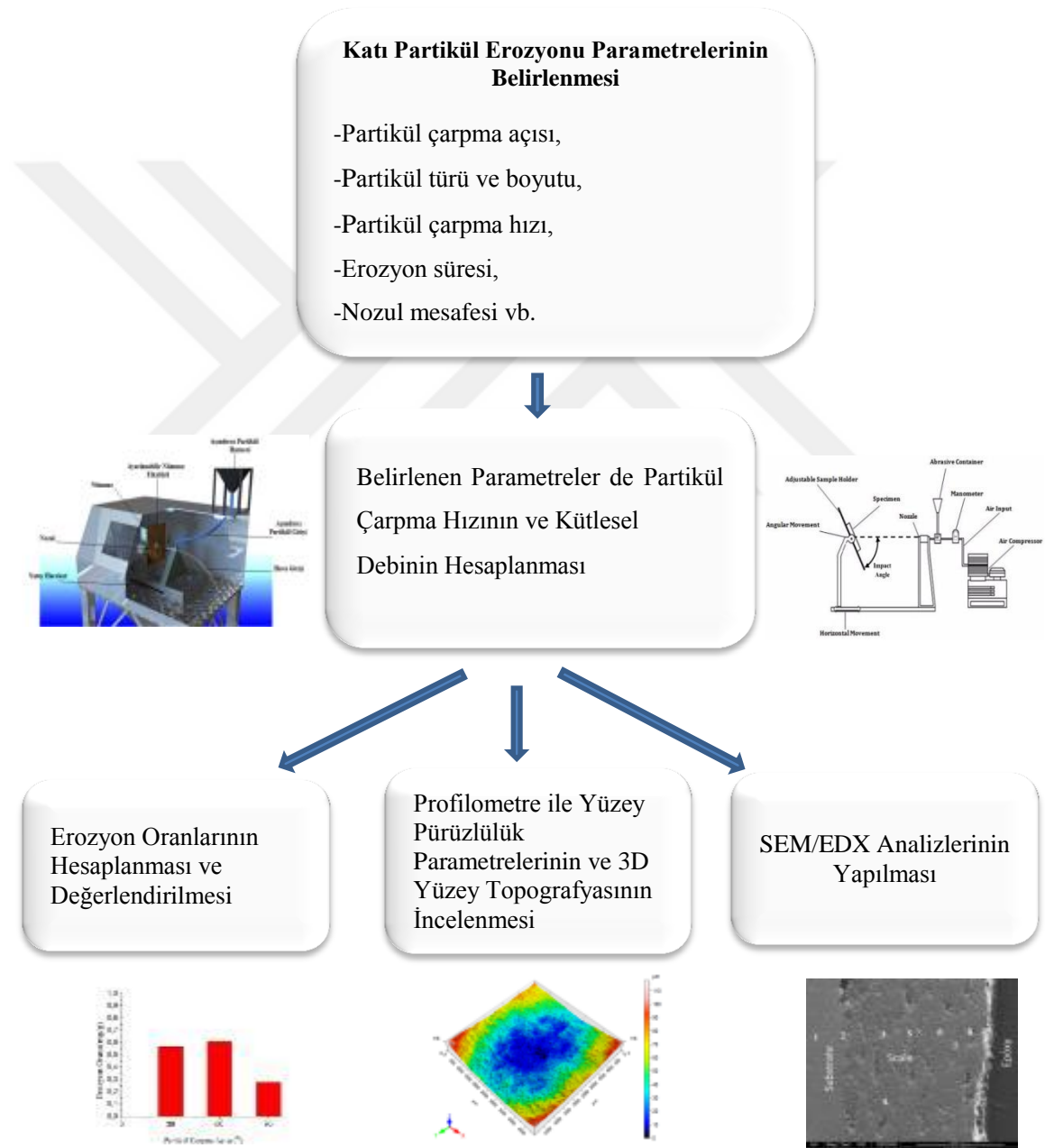


**Şekil 4.10.** Deneysel çalışmalarda kullanılan termal çevrim deney düzeneği

TBC'lerin termal çevrim testlerinin ardından TGO oluşum ve büyüme davranışları incelenmiştir. Termal çevrim testleri özel tasarlanmış fırında TGO oluşum ve büyümesinin belirgin bir şekilde ortaya koyulabilmesi amacıyla 1150 °C sıcaklıkta termal çevrim testleri eşit sürelerde gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte her çevrim 8 dakika ısıtma ve 45 dakika 1150 °C'de tutma ardından da 7 dakika soğutma prosesinden oluşmaktadır. Sonuç olarak TBC numuneleri hasara uğrayana kadar bu şekilde çevrimlere devam edilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen TBC'lerin termal çevrim deneyleri sonrası; mikroyapısal karakterizasyonları ve mekanik deneyleri yapılarak, özellikleri belirlenmiş ve literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırmalı olarak açıklanmıştır. Aynı zamanda TGO oluşum ve büyüme yapısı, karakterizasyon (SEM, EDX-elementel haritalama, XRD) analizleri ile incelenip açıklanmaya çalışılmıştır.

#### 4.14 TBC'lerin Katı Partikül Erozyonu Testleri

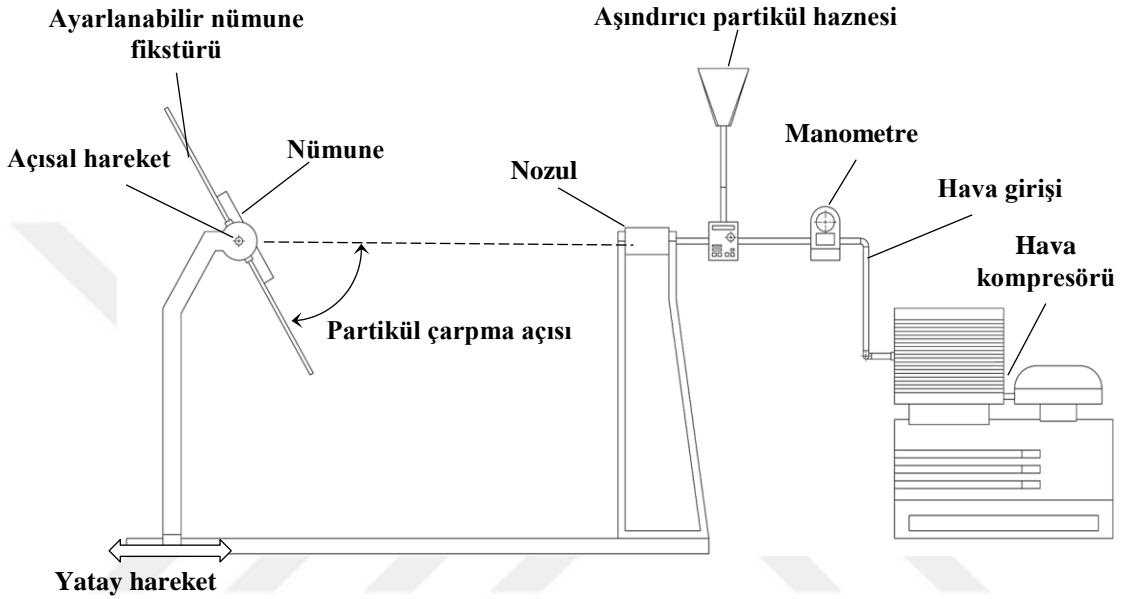
Üretilen TBC'lerin katı partikül erozyonu davranışlarını görmek amacıyla kaplamalar katı partikül erozyonu testlerine tabi tutulmuştur. Şekil 4.11'de kaplamaların katı partikül erozyonu davranışlarının incelenmesinde takip edilen adımlar akış şeması halinde verilmiştir.



Şekil 4.11. Kaplamaların katı partikül erozyonu davranışı akış şeması

#### 4.14.1 Katı partikül erozyonu test düzeneği

Katı partikül erozyonu test düzeneği Şekil 4.12’de verilen bileşenlerden oluşmaktadır. Kompresörden sağlanan basınçlı hava ile hızlandırılan aşındırıcı partiküller yüksek hızlarda tekrarlı bir şekilde malzeme yüzeyine çarparak erozif aşınmayı meydana getirir.



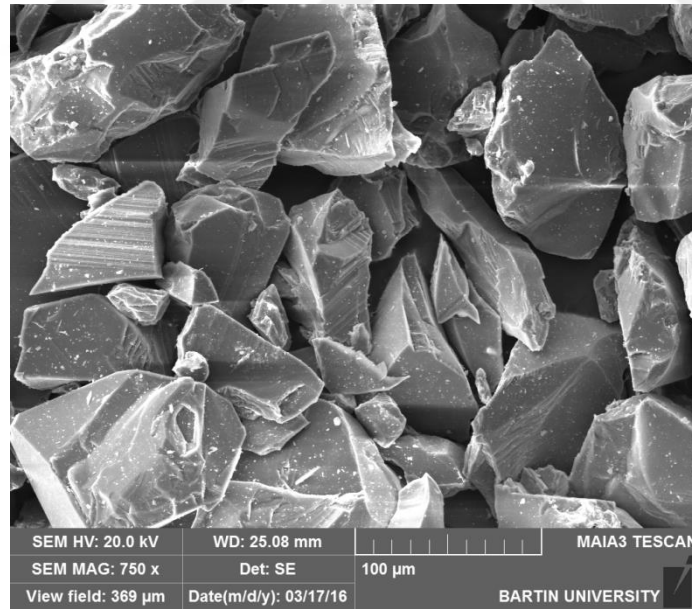
Şekil 4.12. Katı partikül erozyonu test düzeneği

Erozif aşınma test düzeneğinin ihtiyacı olan basınçlı hava hava kompresöründen sağlanmaktadır. Aynı zamanda hava kompresöründen çıkan havanın kurutulmasını sağlayan bir ünite de hava kompresörünün yanında mevcuttur. Bu üniteye havanın aşırı nemi giderilmekte ve böylelikle aşındırıcı partiküllerin nozula kadar olan yolunda nemden kaynaklı herhangi bir olumsuz durum ortadan kaldırılmış olur. Sonuçta aşındırıcı partiküllerin topaklanması ve aşındırıcı partikül taşıma sisteminin tıkanması engellenerek, aşındırıcı partiküllerin ideal bir akışkanlık ile fikstüre kadar rahatlıkla ulaşması temin edilmektedir. Çizelge 4.7’de katı partikül erozyonu aşınma test düzeneğinde kullanılan parametreler verilmiştir.

**Çizelge 4.7.** Katı partikül erozyon testlerinde kullanılan parametreler

Katı Partikül Erozyonu Parametreleri						
Aşındırıcı partikül cinsi	Partikül boyutu (mesh)	Basınç (bar)	Kütle debisi (g/sn)	Partikül çarpma açısı (derece)	Nozul mesafesi (mm)	Erozyon süresi (sn)
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (Alümina)	180	1,5	13	30 / 60 / 90	10	20

Çizelge 4.7'den de anlaşılacağı gibi aşındırıcı partikül cinsi, partikül boyutu, partiküllerin kütsel debisi, nozul mesafesi ve erozyon süreleri sabit tutulmuştur. Ancak aşındırıcı alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) partiküllerin fikstüre (katı partikül erozyonuna maruz bırakılacak kaplama malzemesinin yüzeyine) farklı açılarda çarpması sağlanmıştır. Böylelikle; TBC'lerin farklı açılarda katı partikül erozyonuna karşı sergilemiş oldukları davranışlar gözlenmiştir. Ayrıca doktora tez çalışmasında altlık malzemelerin katı partikül erozyonu davranışları da aynı yöntem ile incelenmiştir. Katı partikül erozyonu testlerinde aşındırıcı partikül olarak 180 mesh boyut aralığında alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) seramiği kullanılmıştır. Şekil 4.13'de deneysel çalışmalarda kullanılan aşındırıcı partiküllerin SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 4.13.** 180 mesh partikül boyutuna sahip aşındırıcı partiküllerin 750X büyütmede taramalı elektron mikroskobu (SEM) görüntüsü

Alümina minerali Saykar Metalurji ve Yüzey İşlem Ürünleri San. Tic. Ltd. Şti'den temin edilmiştir. Temin edilen firmadan alınan beyaz alüminyum oksit mineralinin fiziksel ve kimyasal özellikleri Çizelge 4.8'de verilmiştir.

**Çizelge 4.8.** Beyaz alüminyum oksit mineralinin kimyasal özellikleri

Beyaz Alüminyum Oksit Mineralinin Kimyasal Özellikleri	
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	99,7
SiO <sub>2</sub>	0,02
TiO <sub>2</sub>	2,60-3,20
Metal içeriği serbest Fe, Cu ve diğer ağır metaller eser oranda	
Klor içeriği <50 ppm	
Eriyebilen tuz içeriği <100 ppm	
Sulu ortamda pH 6,93	
Alçı taşı içeriği yoktur	
Rutubet < 0,5 % Eser	

#### 4.15.2 Katı partikül erozyonu oranının hesaplanması

Deneylerde numunelerin ağırlıklarının tartılması  $\pm 0.0001$  mg hassasiyete duyarlı hassas terazi ile yapılmıştır. Katı partikül erozyonu aşınma oranının hesaplanmasında öncelikle numune yüzeyleri basınçlı hava ile temizlenmiştir. Daha sonra numunelerin aşınma öncesi ağırlıkları ( $m_1$ ) hassas terazi kullanılarak belirlenmiştir. Katı partikül erozyonu aşınma sonrası basınçlı hava ile temizlenen numunelerin ağırlıkları tekrar ölçülerek  $m_2$  değerleri bulunmuştur. Aşınma öncesi ve aşınma sonrası elde edilen numune ağırlıkları farkının aşındırıcı partikülün kütleli debisine ( $\dot{m}$ ) ve zamana ( $t$ ) bölünmesiyle katı partikül erozyonu aşınma oranı hesaplanmıştır. Katı partikül erozyonu oranı ( $E$ ) formülü aşağıda verilmiştir.

$$E = \frac{(m_1 - m_2)}{\dot{m} \times t} \quad (4.1)$$

#### 4.14.3 Yüzey pürüzlülük değerleri ve topografyasının incelenmesi

Erozif aşınma sonrası aşınmaya maruz kalan bölgenin yüzey pürüzlülük değerleri ve topografyası 3D optik profilometre (Nanovea PS50) yardımıyla incelenmiştir.

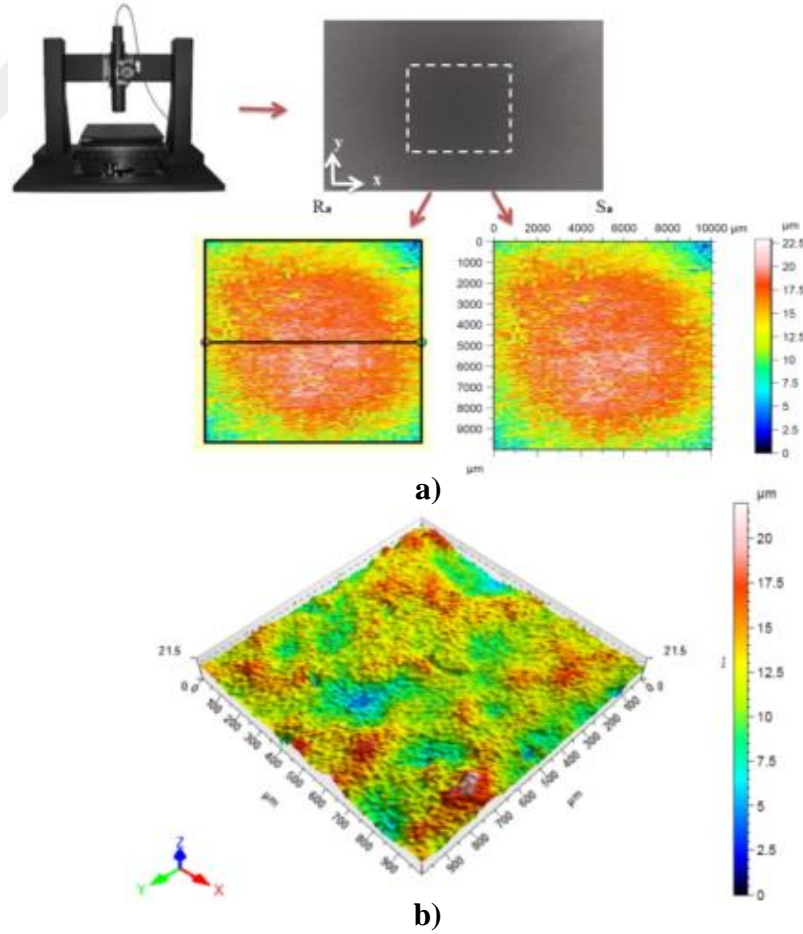
Analizler ISO 4287 ve ISO 25718 standartlarına göre gerçekleştirilmiştir. Numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin ve yüzey topografyalarının incelenmesinde erozif aşınmanın meydana geldiği bölgede 5 mm x 5 mm'lik bir alan taranmıştır. Tarama işlemleri 15  $\mu\text{m}$ 'lik adımlarla gerçekleştirilmiş, yüzey pürüzlülük değerleri ve yüzey topografyaları detaylı olarak analiz edilmiştir. Yüzey pürüzlülükleri ve

topografyası 3D optik profilometre incelenmesi esnasında geçen pürüzlülük parametrelerinin açıklamaları Çizelge 4.9’da verilmiştir.

Çizelge 4.9. Yüzey pürüzlülük parametreleri

Kısaltması	Ölçüm standartı	Açıklaması
<b>Ra</b>	ISO 4287	Yüzey profilinin ortalama pürüzlülüğü
<b>Rv</b>	ISO 4287	Yüzey profilindeki maksimum çukur derinliği
<b>Rp</b>	ISO 4287	Yüzey profilinin maksimum pürüz yüksekliği
<b>Sa</b>	ISO 25178	Yüzey alanının ortalama pürüzlülüğü
<b>Sv</b>	ISO 25178	Yüzey alanının maksimum çukur derinliği
<b>Sp</b>	ISO 25178	Yüzey alanının maksimum pürüz yüksekliği

Şekil 4.14a’da erozif aşınması sonrası gerçekleştirilen yüzey pürüzlülük analizleri şematik olarak açıklanmıştır. Şekil 4.14b’de incelenen yüzey pürüzlülük değerlerinin ve yüzey topografyasının analizi işlemleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 4.14. a) Mekanik yüzey işlemi uygulanmış yüzeyde Ra ve Sa Değerleri ve b) 3D yüzey morfolojisi ölçümü



#### 4.15 TBC'lerin Yüzey Morfolojilerinin SEM İle İncelenmesi

SEM incelemeleri için MAIA3-TESCAN ve FEI Model Quanta 450 FEG-EDS SEM görüntüleme cihazı kullanılmıştır. Sıcak korozyon, termal çevrim ve katı partikül erozyonu testleri sonrası kaplamaların yüzey morfolojilerinin belirlenmesi için SEM ve EDX elementel incelemeleri yapılmıştır. TBC' ler 1000X, 2000X, 3000X ve 5000X gibi farklı büyütme oranlarında görüntüleri alınmış ve karşılaştırılmalı bir şekilde irdelenmeleri yapılmıştır.

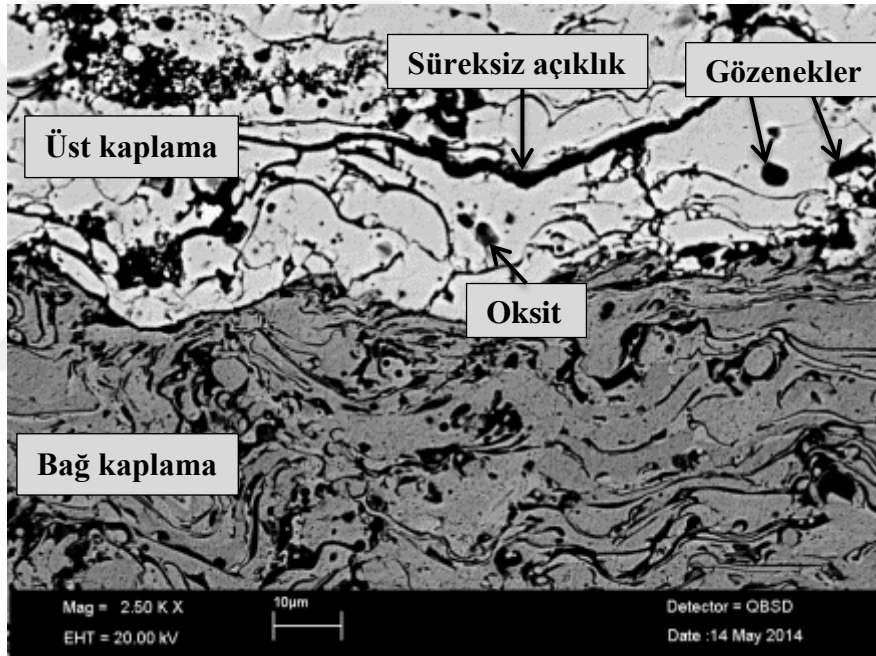
TBC'lerin SEM incelemelerinde;

- ✓ **Sıcak korozyon testleri kapsamında;** servis süresince yakıttan kaynaklı Na ve V gibi emprüteler laboratuvar ortamında oluşturularak yüksek sıcaklığın etkisi ile üst kaplamadaki YSZ ile tepkime vermesi sonucu YSZ'nin faz yapısı tetragonal yapıdan monoklinik faz yapısına geçmesi ve bunun sonucu olarak da kaplama yüzeyinde ayrılmaların gözleneceği,
- ✓ **termal çevrim testleri kapsamında;** ısıtma ve soğuma rejimi sonucu termal gerilmeler ve oksijen difüzyonu meydana gelmesinden sonra TGO yapısının oluşumu, kaplamaların ayrılması ve
- ✓ **katı partikül erozyonu testleri kapsamında;** partikül çarpma açısının malzeme yüzeyinde meydana getirdiği mikro-sünme, mikro-kesme ve mikro-çatlama gibi plastik deformasyon erozif aşınma mekanizmalarının parametrelere bağlı olarak değişiminin belirlenmesi hedeflenmiştir.

## 5. DENEYSEL SONUÇLAR VE TARTIŞMA

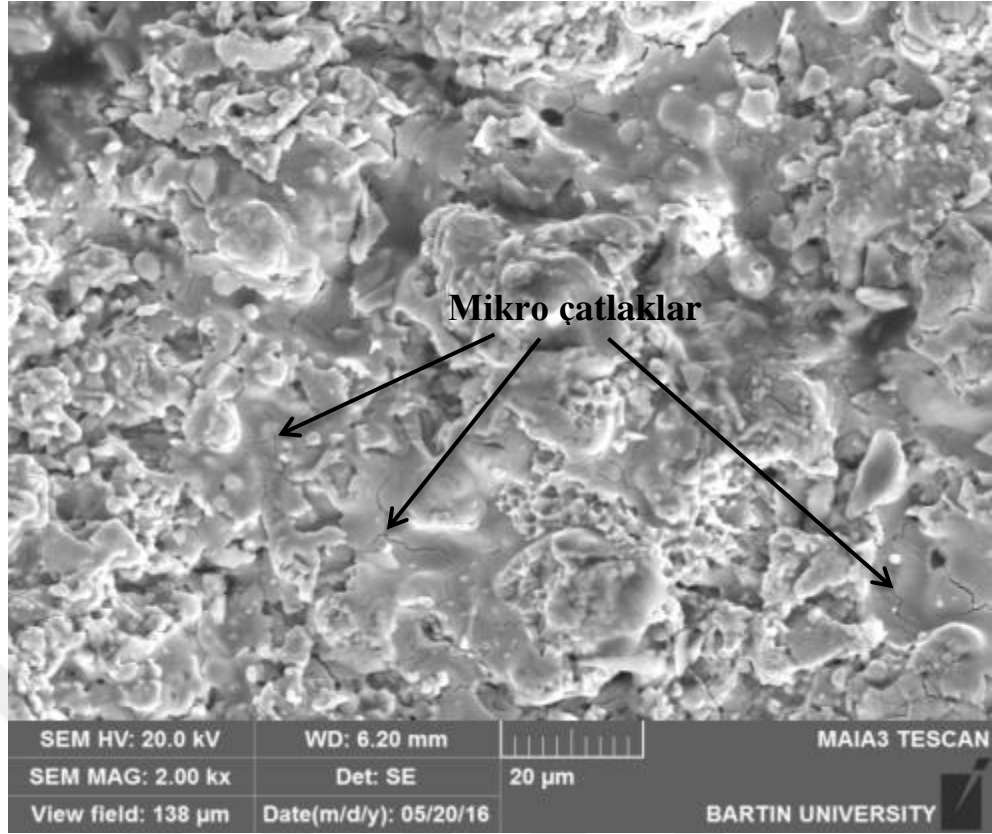
### 5.1 APS Yöntemi İle Üretilen TBC'lerin Mikroyapısal Karakterizasyonu

Sıcak korozyon, termal çevrim ve katı partikül erozyonu deneysel çalışmalarında kullanılan TBC'lerin bağ ve seramik üst kaplamaları APS yöntemi ile üretilmiştir. APS yönteminin proses üretim koşullarından kaynaklı olarak TBC kaplamalar genellikle bol miktarda gözenek içerir. Gözeneklerin yanı sıra yapıda aynı zamanda oksit, mikroçatlaklar ve birçok kusurlar da mevcuttur. Şekil 5.1'de TBC'lerin püskürtüldüğü haliyle (as-sprayed) hasar testleri öncesi ara yüzey kesit SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.1. TBC'lerin püskürtüldüğü haliyle (as-sprayed) hasar testleri öncesi ara yüzey kesit SEM görüntüsü

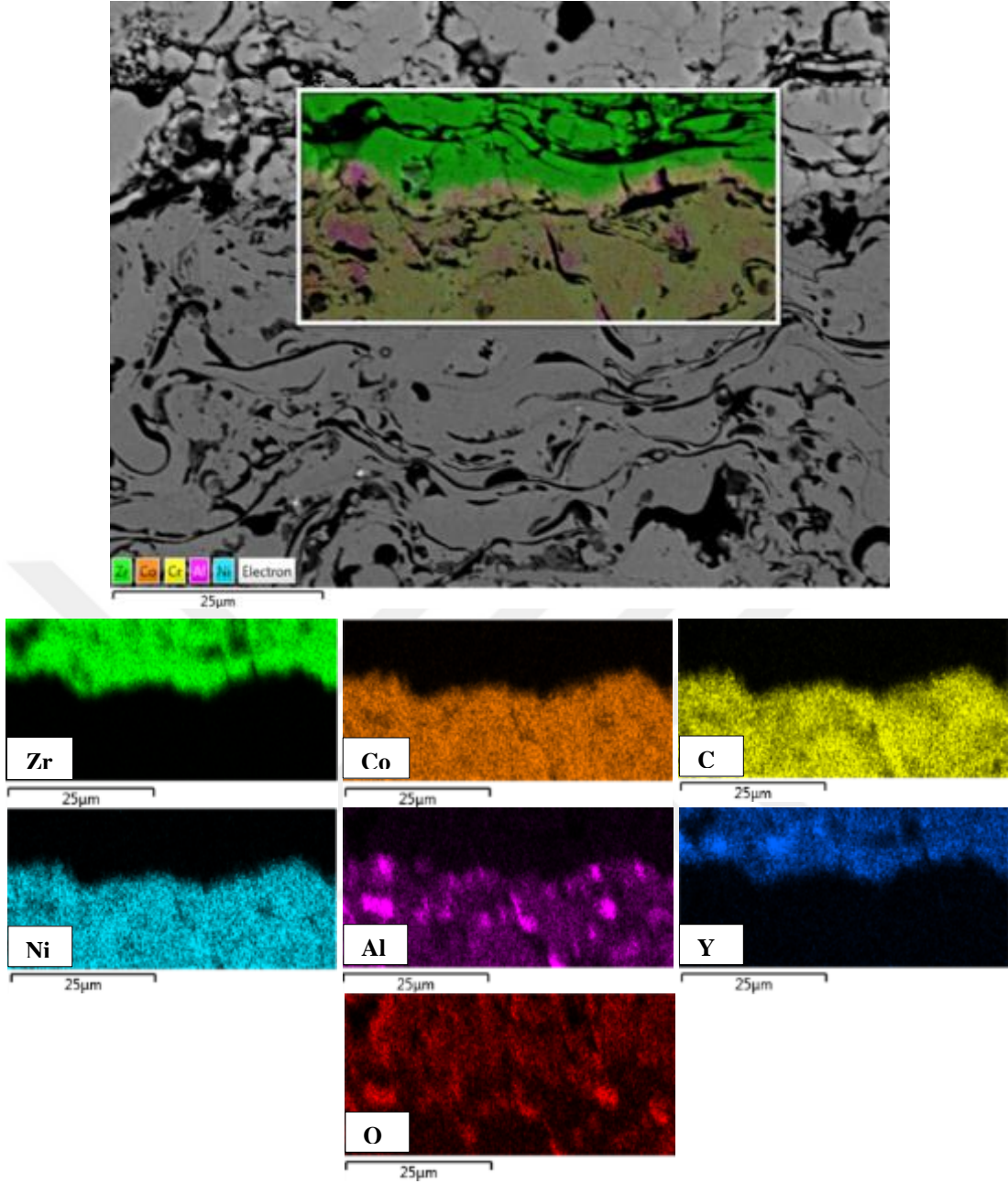
Şekilde 5.1'de koyu renkli bölgeler gözenek alanlarını; daha açık ve gri renkli bölgeler ise oksit yapılarını göstermektedir. Şekil 5.2'de TBC'lerin hasar testleri öncesi üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 5.2.** TBC'lerin hasar testleri öncesi üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.2'de APS yöntemi ile üretilen TBC'lerin püskürtüldüğü haliyle deney öncesi üst yüzey SEM görüntüsünde süreksiz mikro çatlaklar ve gözenekler gözlenmektedir. Literatürde de APS yöntemi ile üretilen TBC'lerde benzer şekilde yapılar gözlenmiştir (Ajay ve ark., 2015; Wang ve ark., 2015b; Tao ve ark., 2016).

Şekil 5.3'te TBC'lerin hasar testleri öncesi kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi verilmiştir. Ara kesiti alınan TBC'lerin hasar deneyleri öncesi elementel analizinden bağ ve seramik üst kaplamaların içeriğinin sırasıyla CoNiCrAlY ve YSZ'den meydana geldiğini ortaya koymaktadır.



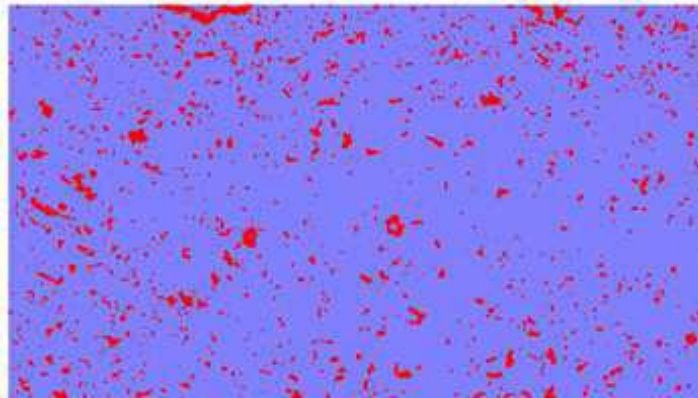
Şekil 5.3. TBC'lerin hasar testleri öncesi kesit görüntüsünün elementel haritalama analizi

APS tekniği ile üretilen TBC kaplamalar üretim prosesinden kaynaklı olarak yoğun miktarda gözenek ve oksit içermektedir. Bu durum prosesin atmosfere açık olarak gerçekleştirilmesinin bir neticesidir. Aynı zamanda APS tekniğinde biriktirme; toz partiküllerinin erimesi şeklinde gerçekleşmektedir. Bununla birlikte üretim sıcaklığının yüksek olmasından dolayı yapıdaki gözenek ve oksit miktarının yüksek olmasına sebep olmaktadır. Belirtilen bütün bu durumlar ve mikroyapı elementel analiz görüntüsü dikkate alındığında; APS prosesinin bir sonucu olarak üretilen bağ kaplamalardaki Al konsantrasyonunun tüm yapıya üniform bir şekilde dağılmadığı

gözenlenmiştir. Bununla birlikte üretilen kaplamaların BC/TC ara yüzelerindeki oksit içerikleri yüksek olması Al konsantrasyonunu da düşürmektedir.

### 5.1.1 TBC'lerin porozite içerikleri

Üretilen TBC'lerin bağ ve üst kaplamaların porozite ölçümlerinin tayini için öncelikle her kaplamanın beşer tane mikroyapı fotoğrafları alınmıştır. Ardından alınan bu mikroyapılardaki matris ve poroziteler görüntü analiz programı yardımıyla tanımlanmış ve porozite yüzdeleri belirlenmiştir. Yapılan porozite tayinlerine örnek olarak bağ ve üst kaplamaların porozite ölçüm sonuçları sırasıyla Şekil 5.4'te ve Çizelge 5.1'de verilmiştir.



Şekil 5.4. Görüntü analizi yardımıyla porozite ölçümü gösterimi

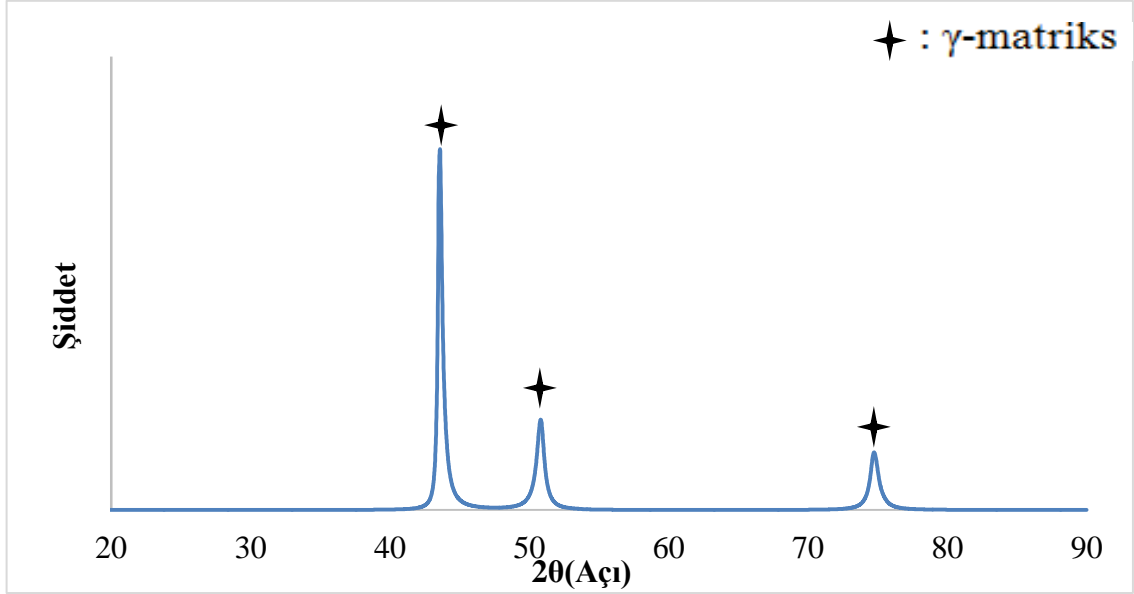
Çizelge 5. 1. APS yöntemi ile üretilen kaplamaların gözenek ölçüm sonuçları

Malzeme	Bağ kaplama porozite oranı (%)	Seramik üst kaplama porozite oranı (%)
APS-TBC	8,2 ± 2,0	11,8 ± 2,0

Çizelge 5.1'den de anlaşılacağı gibi APS bağ seramik üst kaplamalar, üretim yönteminden kaynaklı olarak tipik olarak yüksek oranda porozite içeriğine sahiptir. Genelde APS ile üretilen TBC'lerde APS yönteminin karakteristik özelliği gereği yapılarında % 5-7 oranlarında porozite içermektedir.

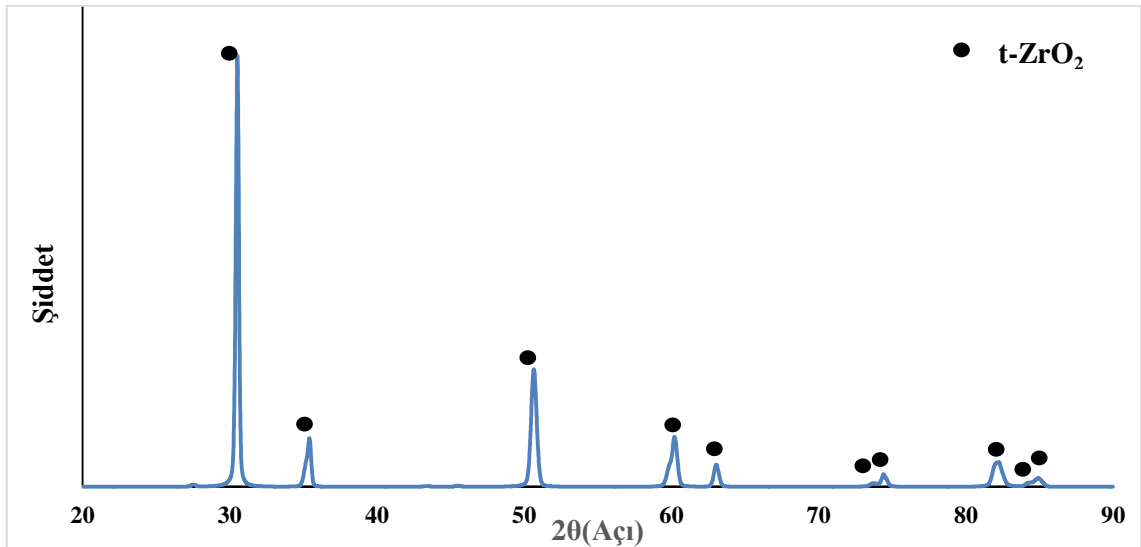
### 5.1.2. Bağ ve Üst Kaplamaların XRD Analizleri

Şekil 5.5'te ve Şekil 5.6'da APS bağ ve üst kaplamalara ait XRD paternleri gösterilmektedir.



Şekil 5.5. APS bağ kaplamalara ait XRD paterni

APS yöntemi ile üretilen CoNiCrAlY bağ kaplamanın XRD analizi sonucu, üretilen TBC'lerin bağ kaplama tabakasının  $\gamma$  matriks fazından meydana geldiği belirlenmiştir. APS-YSZ üst kaplamanın XRD analizlerine göre ise; üst kaplama tabakasının  $ZrO_2$  içerikli ve tetragonal fazdan meydana geldiği belirlenmiştir.

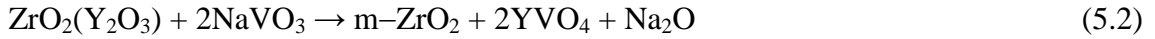


Şekil 5.6.  $ZrO_2$ -8 %  $Y_2O_3$  içerikli üst kaplamalara ait XRD paternleri

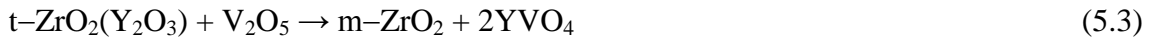
#### 5.4 TBC'lerin Sıcak Korozyon Davranışları

TBC'lerde sıcak korozyon hasar etkisi ile  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{V}_2\text{O}_5$  gibi tuzların kaplamanın üst tabakasında bulunan mikro çatlaklardan ve gözeneklerden nüfuz ederek gerçekleşmektedir. TBC'lerin yüksek sıcaklıklarda çalışma ortamında bulunan sodyum, vanadyum, kurşun gibi elementlerin YSZ kaplama yapısını değiştirmesi sonucu bozunma meydana gelmektedir. Özellikle yakıt kirliliğinden kaynaklanan sodyum, sülfür, fosfor, vanadyum gibi elementler üst kaplamada bulunan  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ile tepkimeye girerler. Reaksiyon sonucu stabilizasyonu  $\text{Y}_2\text{O}_3$  fazı ile mümkün olan tetragonal faz yapısında bulunan  $\text{ZrO}_2$  fazı  $\text{Y}_2\text{O}_3$ 'ün reaksiyonu sonucu yapıdan uzaklaşmasıyla  $\text{ZrO}_2$  fazı monoklinik faz yapısına dönüşmektedir. Bu faz dönüşümü sonucu kaplama yapısında hacim değişikliğine neden olmaktadır. Bu hacim değişikliği beraberinde kaplama yapısında gerilmeleri meydana gelmekte ve tabaka bütünlüğünün bozulmasına sebep olmaktadır (Ajay ve ark., 2015).

Sıcak korozyon olayı aşağıdaki reaksiyonlar sonucunda gerçekleşmektedir:



Aşağıdaki reaksiyon ise sıcak korozyon mekanizmasında direkt olarak gerçekleşmektedir:

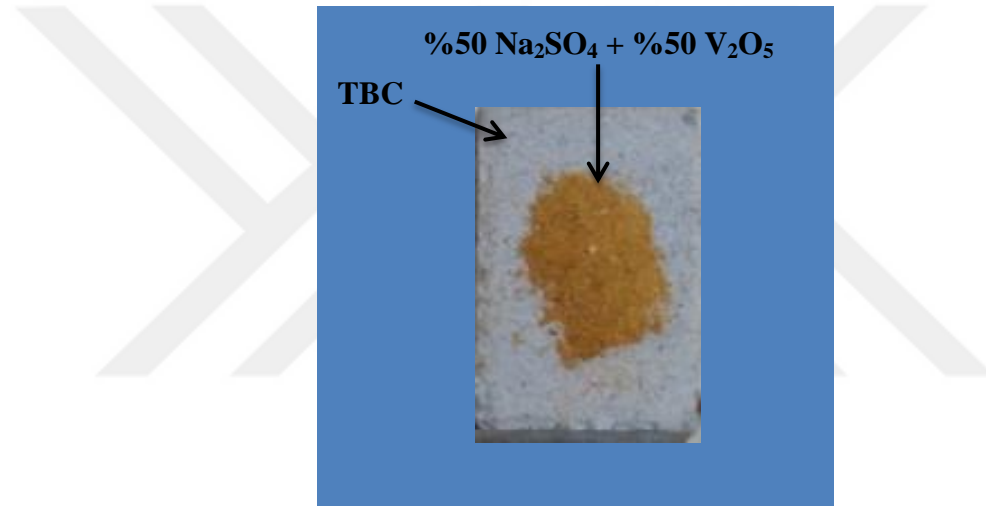


Gaz türbin motorlarında servis sırasında ortamda bulunan ve yakıttan kaynaklı  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  ve  $\text{NaCl}$  gibi tuzların türbin bıçakları üzerinde birikmesi kaçınılmazdır. Bundan dolayıdır ki TBC'lerin yüksek çalışma ortamlarında sıcak korozyon sonucu meydana gelen bozulma davranışlarının incelenmesi büyük önem arz eder (Habibi ve ark., 2013; Liu ve ark., 2014).

Inconel 718 süper alaşım altlıklar üzerine APS tekniğiyle yaklaşık 100  $\mu\text{m}$  kalınlığında ve CoNiCrAlY içerikli bağ kaplamalar ve aynı teknik kullanılarak yaklaşık 300  $\mu\text{m}$  kalınlığında YSZ içerikli seramik üst kaplamalar üretilmiştir. APS tekniği ile

üretilen TBC numuneleri 1000 °C'de sıcak korozyon testlerine tabi tutulmuştur. Testler açık atmosfer ortamında ve dörder saatlik çevrimler ile yapılmıştır. Üretilen TBC'ler dört saat fırın içinde bekletilmiş ardından fırının dışına alınmıştır. Fırından çıkartılan kaplamaların makro görüntüleri ve SEM görüntüleri alındıktan sonra tekrar çevrime devam edilmiştir. Bu şekilde kaplamaların hasar oranı % 25'i bulana kadar testlere devam edilmiştir.

Sıcak korozyon testine tabi tutulacak TBC'lerin üzerine servis ortamında bulunan emprütelerden;  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{V}_2\text{O}_5$  tuzları konmuştur.  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  ve  $\text{V}_2\text{O}_5$  korozif tuzları % 50 oranında ve yüzeyde  $10 \text{ mg/cm}^2$  gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Sıcak korozyon testi öncesi hazırlanan TBC'ler Şekil 5.7'de verilmiştir.



**Şekil 5.7.** Sıcak korozyon testinde kullanılan ve üzerine %50  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  + %50  $\text{V}_2\text{O}_5$  tozu ilave edilen TBC numunesi

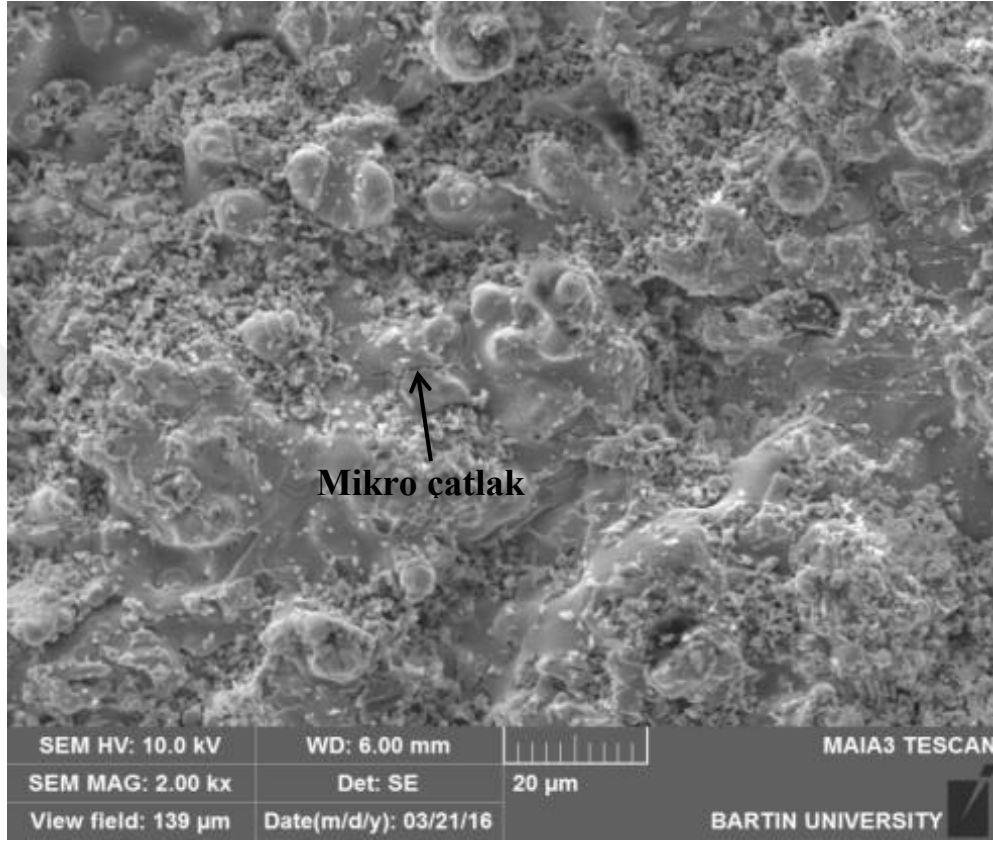
#### 5.4.1 Sıcak korozyon deneyinde kullanılan TBC'lerin mikroyapısal karakterizasyonu

Sıcak korozyon testleri yapılmadan deneyde kullanılacak TBC'lerin üst yüzeylerinden farklı büyütmelemlerde SEM görüntüleri alınmıştır. Şekil 5.8'de görüldüğü gibi kaplama yüzeylerinin pürüzlü olmasının yanında yüzeyde gözenek ve mikro çatlakların belirgin bir varlığı şeklinde dikkat çekmektedir.

APS tekniği ile üretilen bağ ve seramik üst kaplamalar, yapılarında gözenek, boşluk ve mikro çatlaklar içermektedir. Bu durumun bir sonucu olarak YSZ üst kaplama tabakasının oksijen geçirgenliği yüksek olmaktadır. Bütün bu koşulların birleşmesi TBC'lerin oksidasyona uğramasına ve bağ/seramik kaplama ara yüzeyinde TGO



oluşumunu sebep olmaktadır. Aynı zamanda ortamda bulunan farklı tuz ve emprüteler de üst kaplamadan nüfuz ederek özellikle seramik üst kaplamanın hasarına sebep olmaktadır. Şekil 5.8’de TBC numunesinin sıcak korozyon testi öncesi üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.

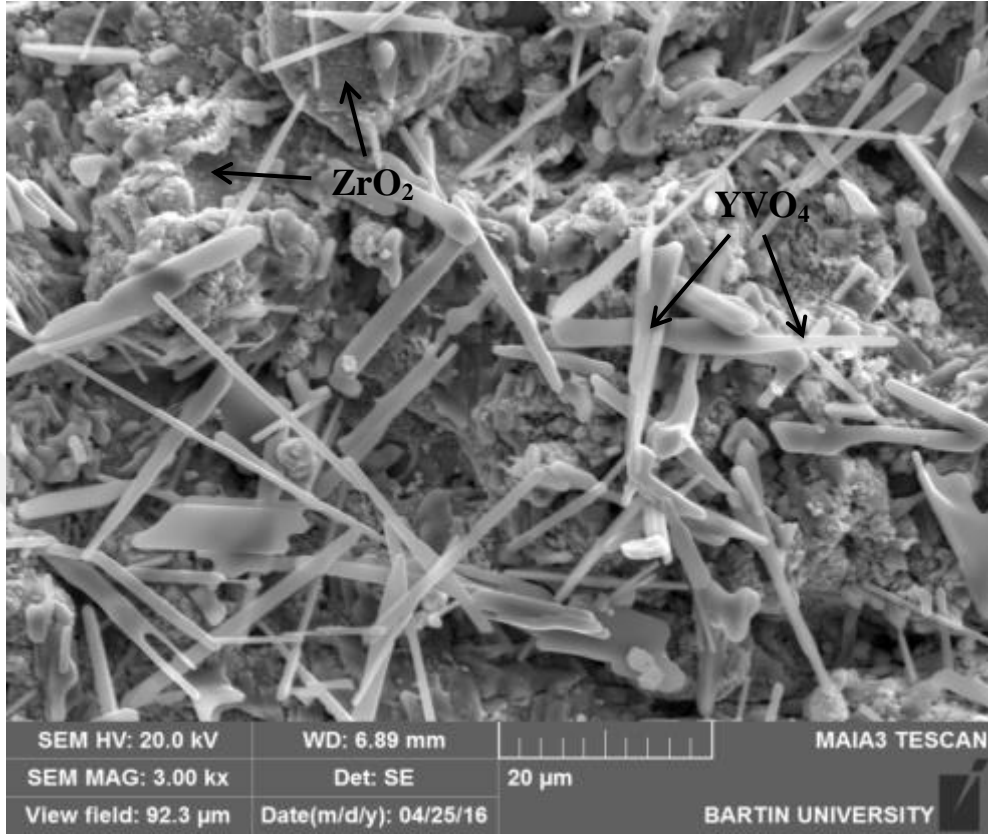


Şekil 5.8. TBC’lerin sıcak korozyon deneyleri öncesi üst yüzey SEM görüntüsü

#### 5.4.2 TBC’lerin sıcak korozyon sonrası mikroyapısal özellikleri

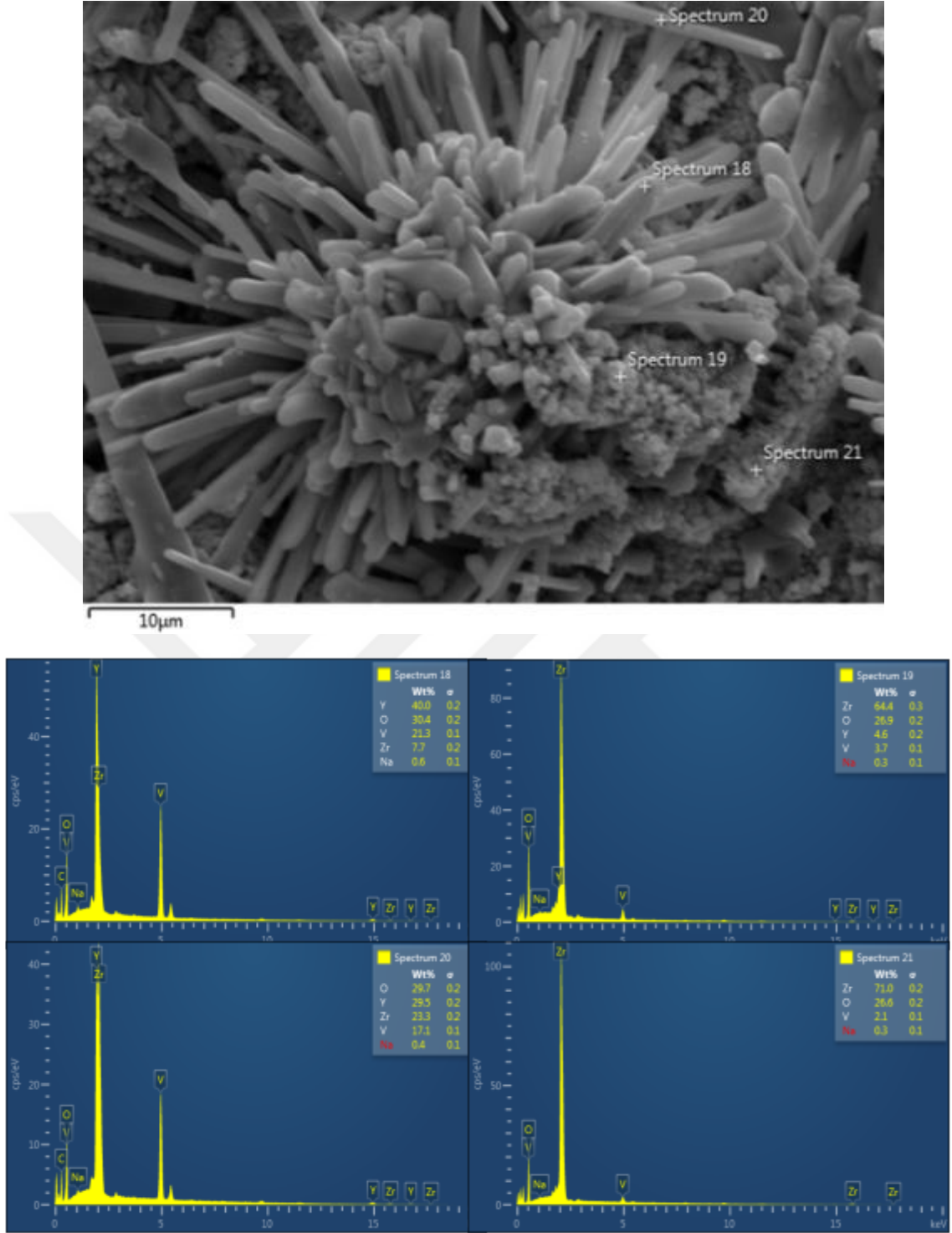
Bu bölümde dörder saatlik çevrimler ile gerçekleştirilen sıcak korozyon testleri sonrası TBC’lerin üst yüzey SEM görüntülerine yer verilmiştir. Her çevrim sonrası sıcak korozyonun neden olduğu kimyasal hasar mekanizmaları göz önünde bulundurularak ayrıntılı değerlendirmeler yapılmıştır. Sıcak korozyon testleri 4’ er saatlik çevrimlerle toplam 48 saat sonunda üst seramik kaplama ile bağ kaplama ayrılarak hasara uğramış ve sıcak korozyon testlerine son verilmiştir. 4 saat sıcak korozyon testi sonrasında üst yüzey incelemelerinde korozyon ürünü olan çubuksu yapıların düzensiz bir şekilde oluşmaya başladığı gözlenmektedir. Aynı zamanda üst yüzey SEM görüntüsünde YSZ seramik üst kaplamayı oluşturan  $ZrO_2$  yapısı da

gözlenmiştir. Şekil 5.9'da TBC numunesinin 4 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.9. TBC numunesinin 4 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.10'da TBC numunesinin 4 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.



Şekil 5.10. TBC numunesinin 4 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

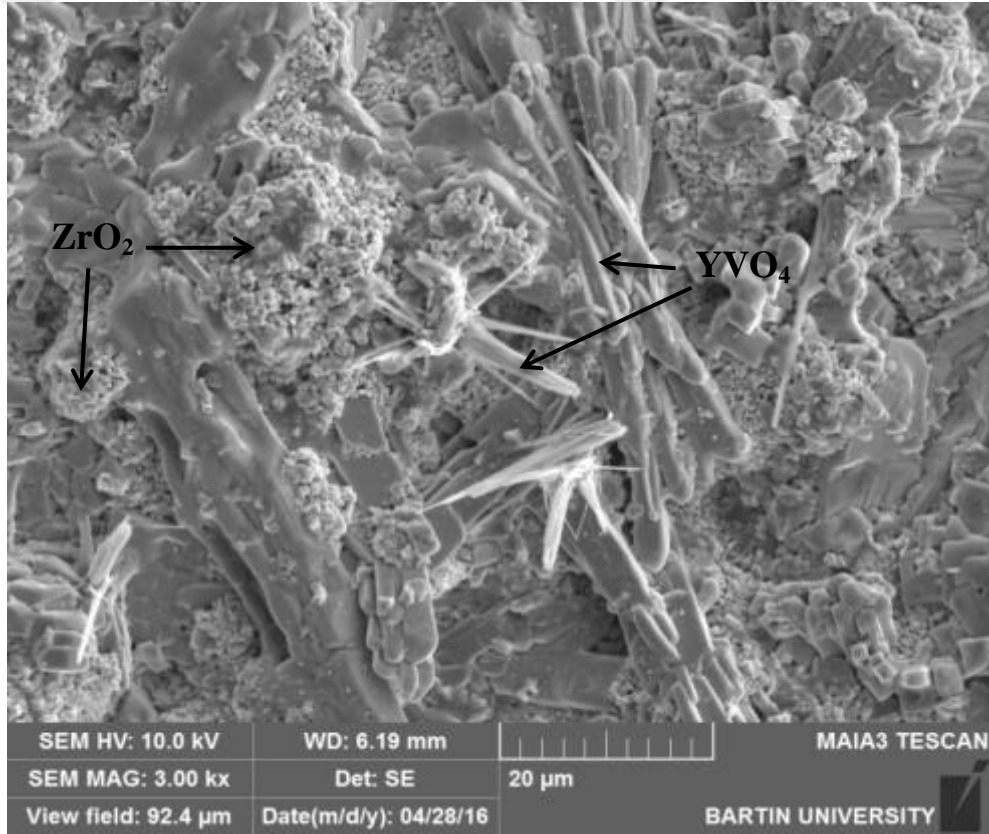
Şekil 5.10'da verilen elementel analizden TBC numunesinin 4 saat sıcak korozyon testi sonrası kaplama yüzeyinde oluşan çubuksu yapıların kimyasal bileşiminin; itriyum, vanadyum ve oksijen içerikli yapılar olduğu tespit edilmiştir. Çubuksu yapıların dışında kalan bölgede ise yaklaşık %70 oranında zirkonyum geri kalan kısımda ise oksijen ve çok düşük miktarlarda vanadyum elementleri tespit

edilmiştir. Zr, V, Y, Na ve O elementlerinin varlığı farklı faz yapılarının oluşabileceğini gösterir.

Böylelikle bu TBC kaplamalarda özellikle YSZ esaslı, başka bir söylemle itriyum (Y) ile stabilize edilmiş zirkonyum (Zr) kaplamalarda ortamda vanadyum (V) elementini içeren bir oksitin bulunması durumunda sıcak korozyon sonucu itriyum vanadat ( $YVO_4$ ) bileşiği oluşmaktadır.



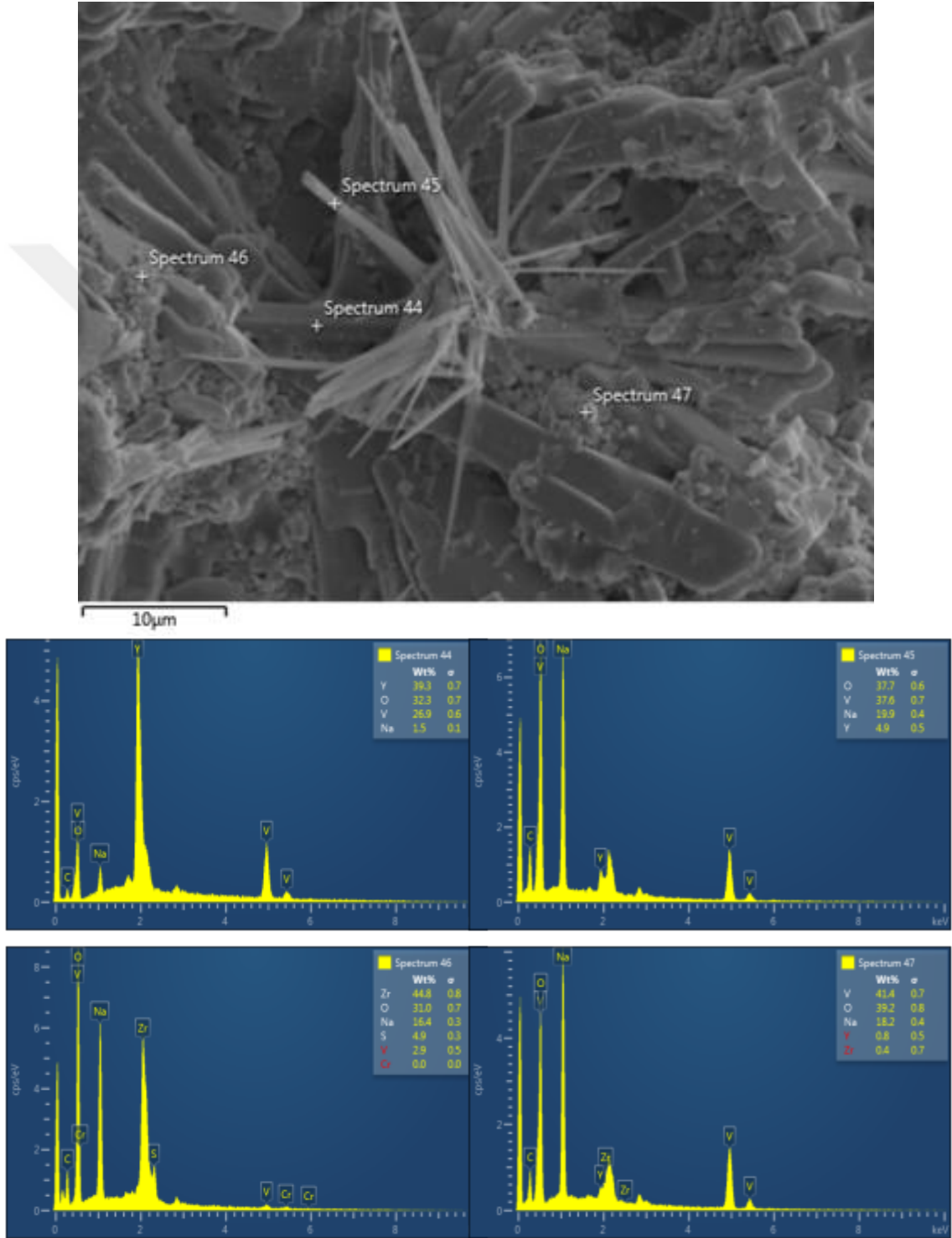
Şekil 5.11’de TBC numunesinin 8 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.11. TBC numunesinin 8 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

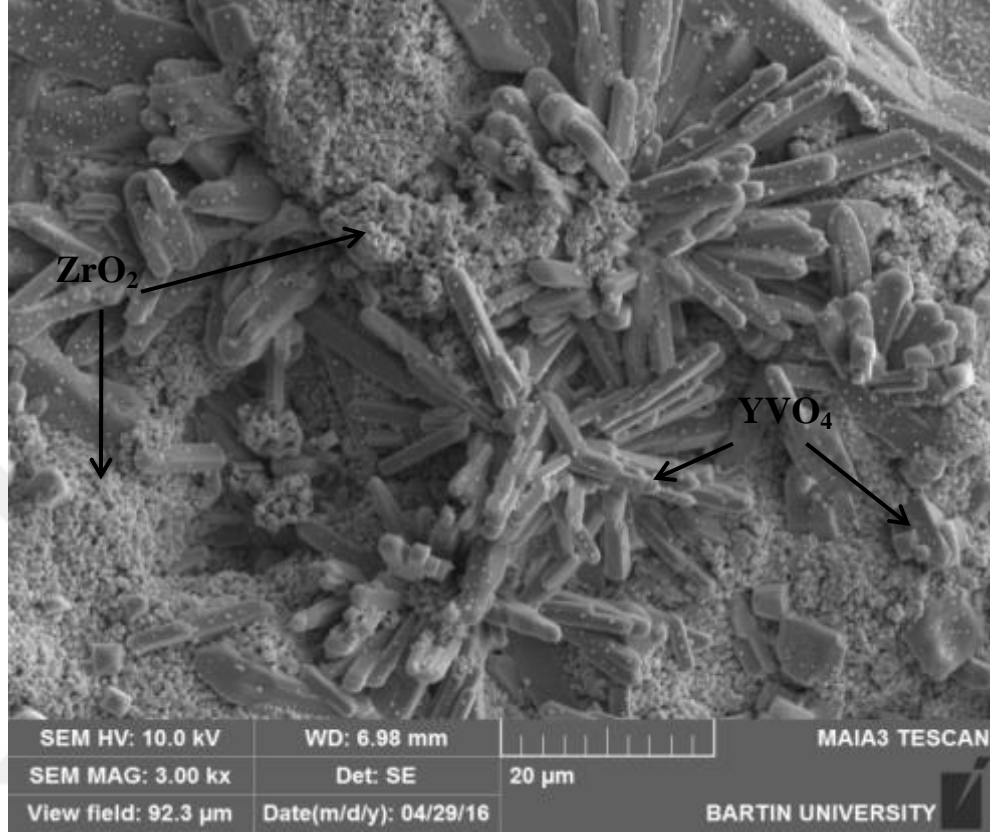
Şekil 5.11’de TBC numunesinin 8 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM mikroyapısında görüldüğü gibi çubuksu yapıların oluşumu büyüyerek devam etmektedir. Bununla birlikte yıldız şeklinde yapıların da oluştuğu gözlenmektedir. Şekil 5.11’de verilen elementel analizden TBC numunesinin 8 saat sıcak korozyon

testi sonrası kaplama yüzeyinde oluşan çubuksu ve yıldız şeklindeki yapıların kimyasal bileşiminin; itriyum, vanadyum ve oksijen içerikli yapılar olduğu tespit edilmiştir. Bu yapılar dışında kalan bölgede ise çoğunlukla Zr, Na ve O elementlerine rastlanılmıştır. Şekil 5.12’de TBC numunesinin 8 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.



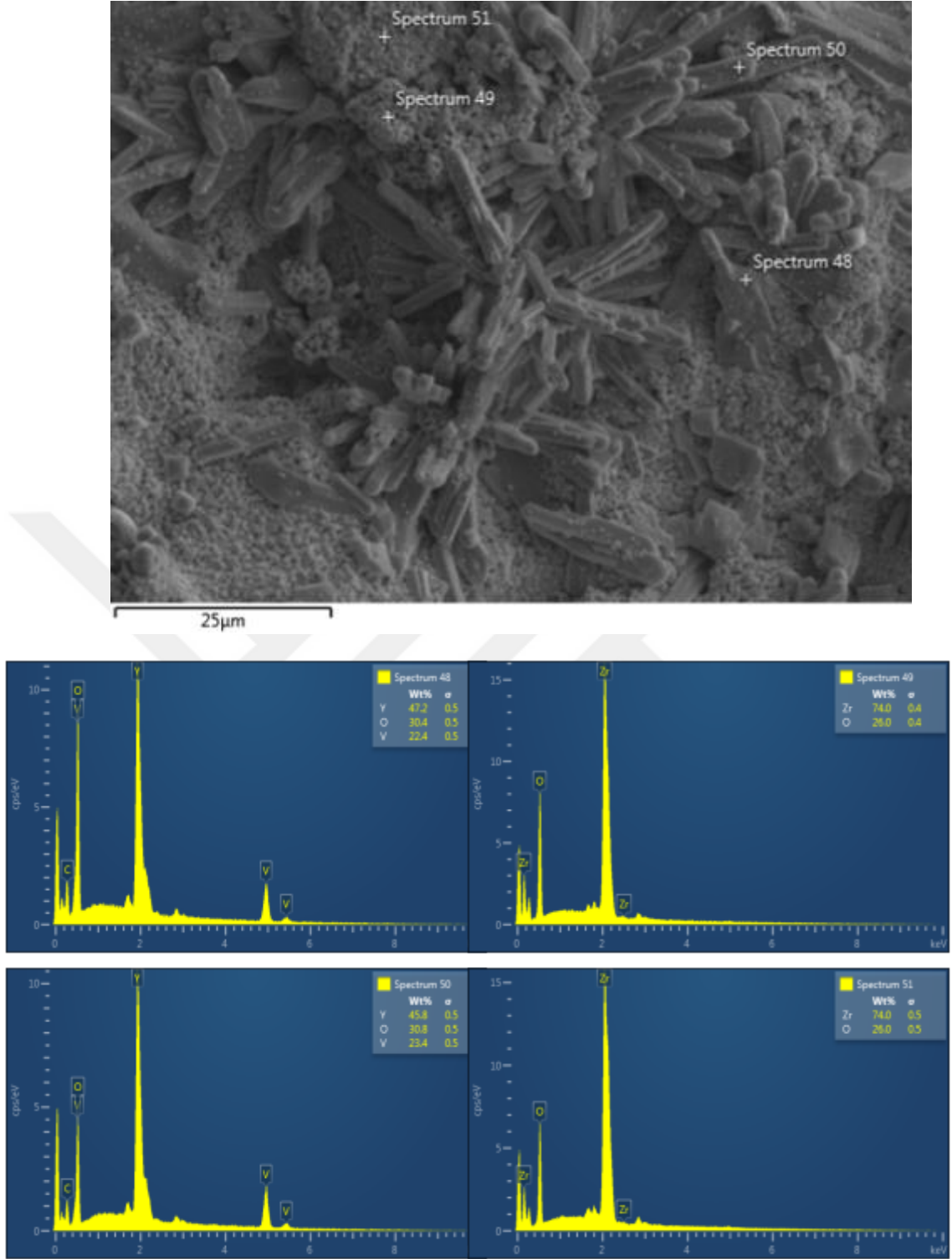
Şekil 5.12. TBC numunesinin 8 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

Şekil 5. 13’de TBC numunesinin 12 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



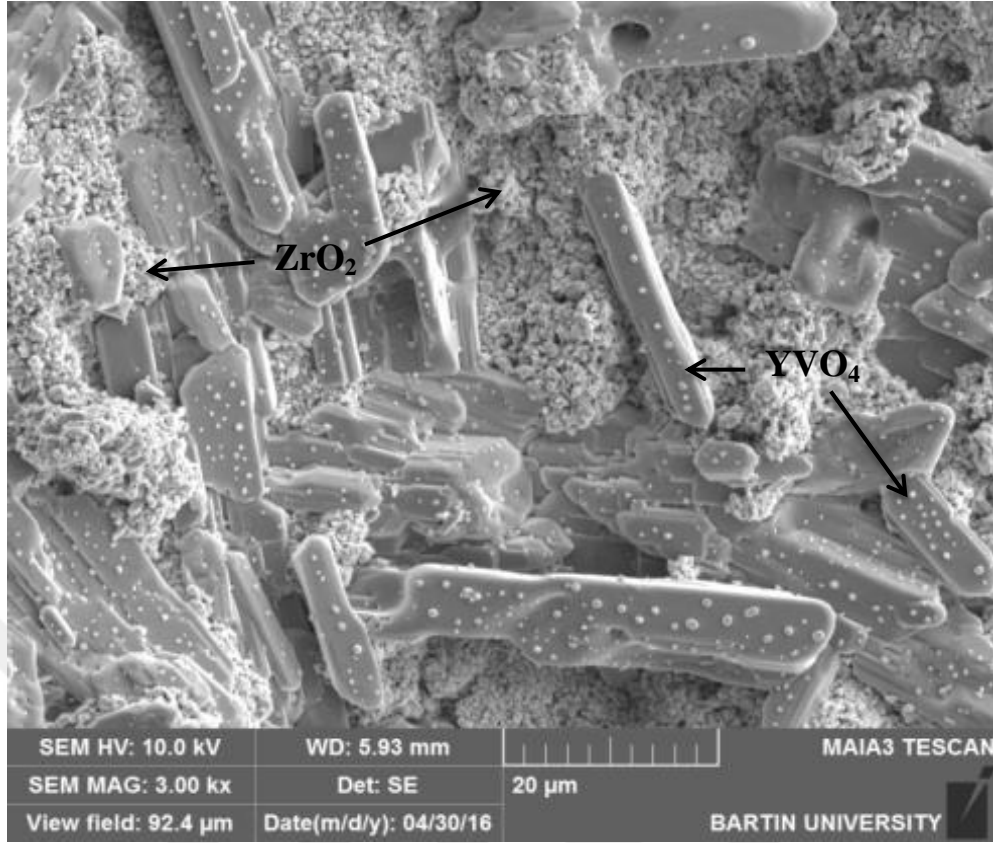
Şekil 5.13. TBC numunesinin 12 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.13’de YSZ üst kaplama tabakasının hasar oluşumu devam etmekte olduğu gözlenmektedir. Bununla birlikte çubuksu yapılar daha belirgin hale gelmiş ve büyümeye devam etmiştir. Şekilde de fark edildiği üzere korozyon ürünlerinin oluşumları düzensiz bir şekilde gerçekleşmektedir. Dolayısıyla kimi oluşumlar çubuksu şekilde meydana gelirken kimileri de bu çubuksu oluşumu tamamlayamadığı gözlenmiştir. Bu durumda korozyon ürünlerinin oluşumunda korozif tuzların ortamdaki miktarının etkili olduğu söylenebilir. Şekil 5.13’de verilen elementel analizden TBC numunesinin 12 saat sıcak korozyon testi sonrası kaplama yüzeyinde bu çubuksu yapıların ve diğer oluşumların Y, V ve O elementini içeren fazlar olduğu anlaşılmaktadır. Şekil 5.14’te TBC numunesinin 12 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.



Şekil 5.14. TBC numunesinin 12 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

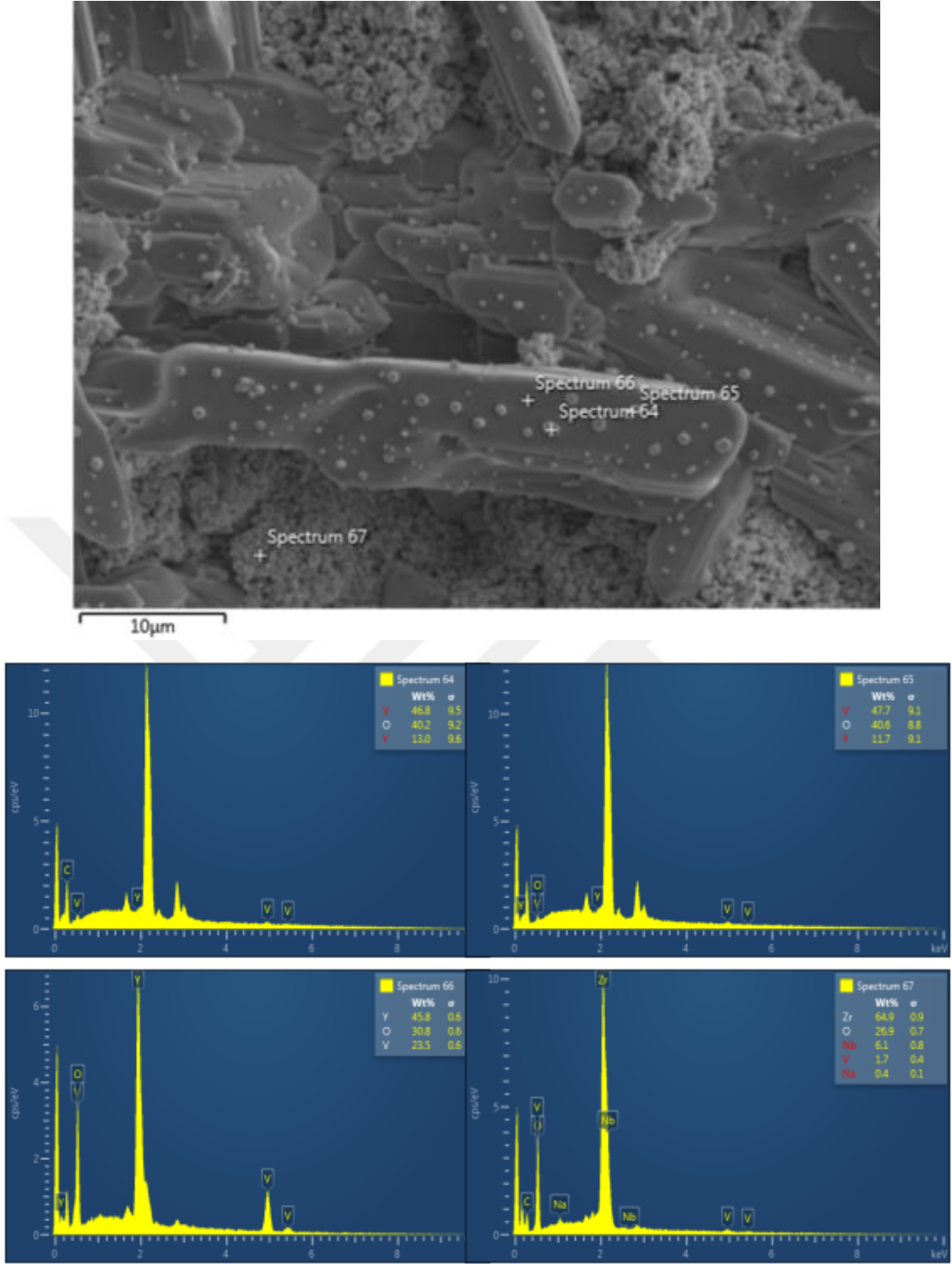
Şekil 5. 15'te TBC numunesinin 16 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.15. TBC numunesinin 16 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

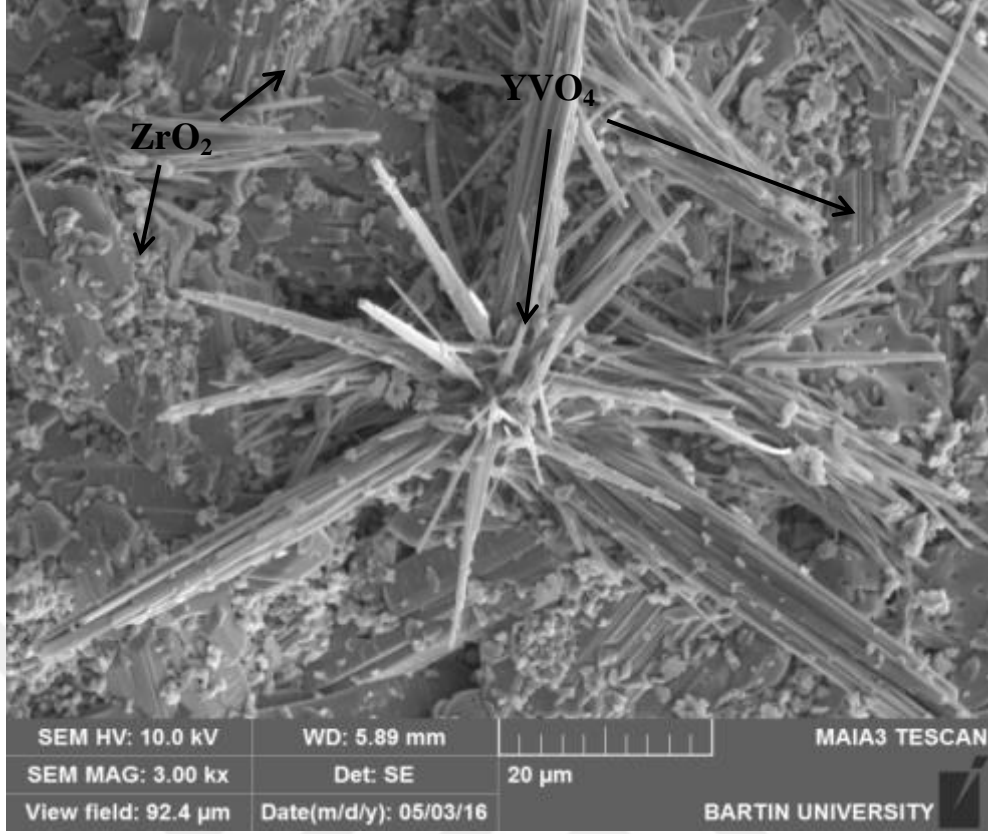
Şekil 5.15'te  $YVO_4$  çubuksu yapıların oluşumu görülmektedir. Ancak TBC yüzeyinde kimyasal olarak gerçekleşen ve sıcak korozyon ürünü olan bu  $YVO_4$  çubuksu yapıların büyümesi dikkat çekmektedir. Aynı zamanda bu çubuksu yapıların üzerlerinde de çekirdeklenmeye başladığı gözlenmektedir. Şekil 5.16'da TBC numunesinin 16 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi bu oluşumların Y, V ve O elementlerinden meydana gelen yapılar olduğunu ispatlamaktadır. Diğer yandan kaplama yüzeyindeki  $ZrO_2(Y_2O_3)$  konsantrasyonu ise gittikçe azalmaktadır. Şekil 5.16'da TBC numunesinin 16 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.





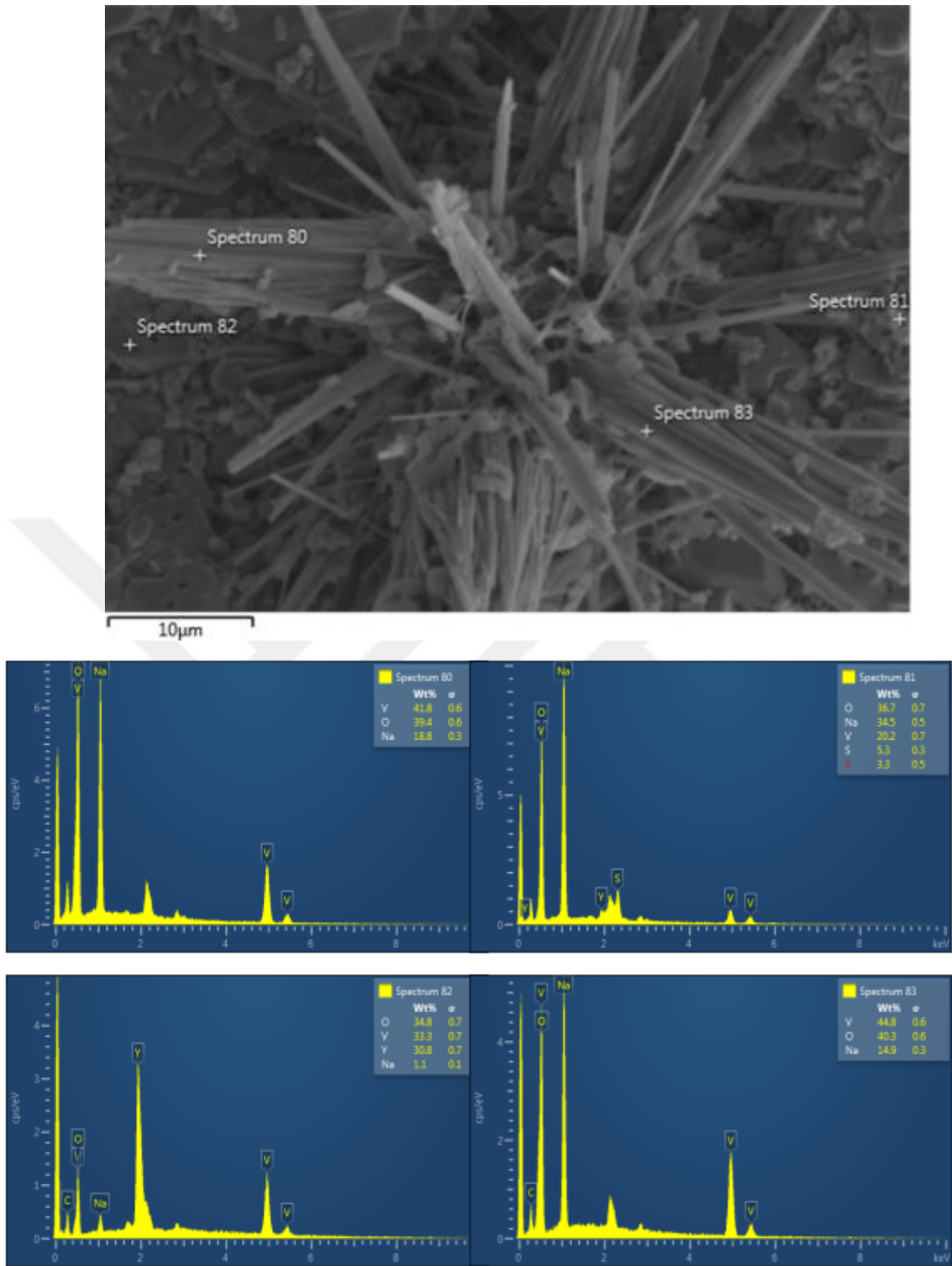
Şekil 5.16. TBC numunesinin 16 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

Şekil 5. 17'de TBC numunesinin 20 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



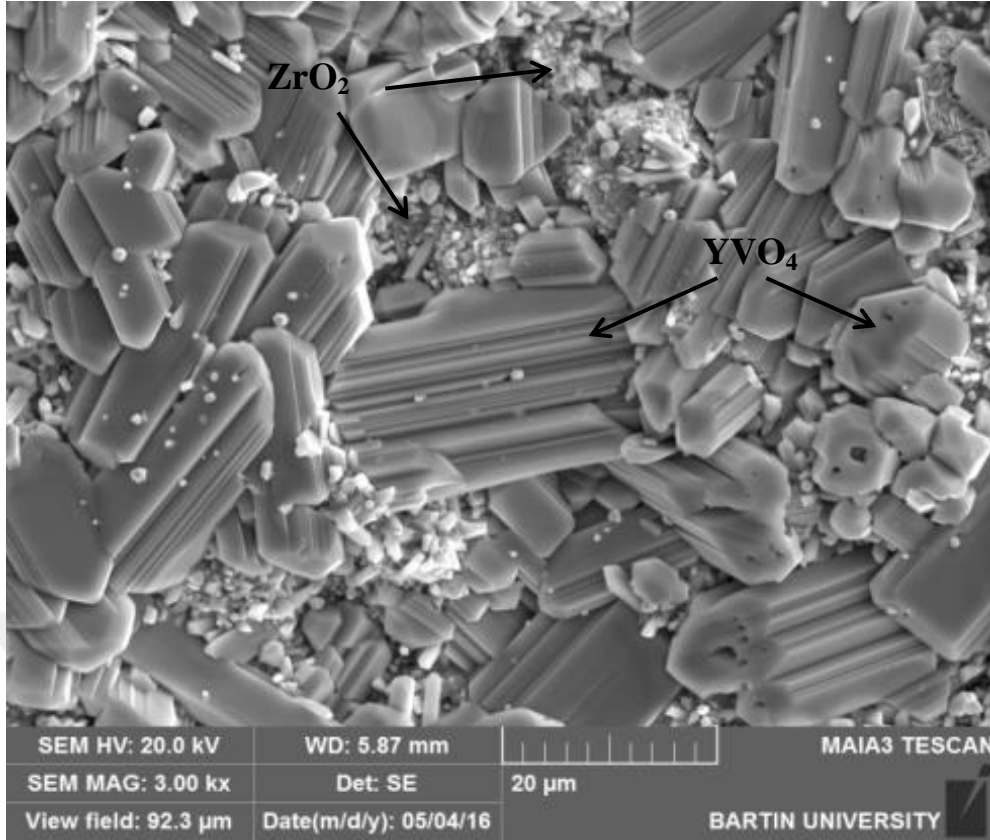
Şekil 5.17. TBC numunesinin 20 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.17’de görüldüğü gibi TBC numunesinin 20 saat sıcak korozyon testi sonrasında kaplama üst yüzeyinde  $YVO_4$  yapılar çubuksu şeklinde oluşmuştur. Bu yıldız şeklindeki oluşumların nedeni uzun süre açık havada kalmasıyla açıklanabilir. Çünkü TBC’lerin sıcak korozyon sonrası bekleme süresi arttıkça oksijene karşı maruz kalma süresi de artmış olacaktır. Böylelikle yıldız şeklinde ve yaklaşık % 40 oranında oksijen içeriğine sahip  $YVO_4$  yapılar meydana gelmektedir. Aynı zamanda bu bahsi geçen oluşumların içeriklerini ve yüzdelerini Şekil 5.18’de verilen TBC numunesinin 20 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi teyit etmektedir. Şekil 5.18’de TBC numunesinin 20 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.



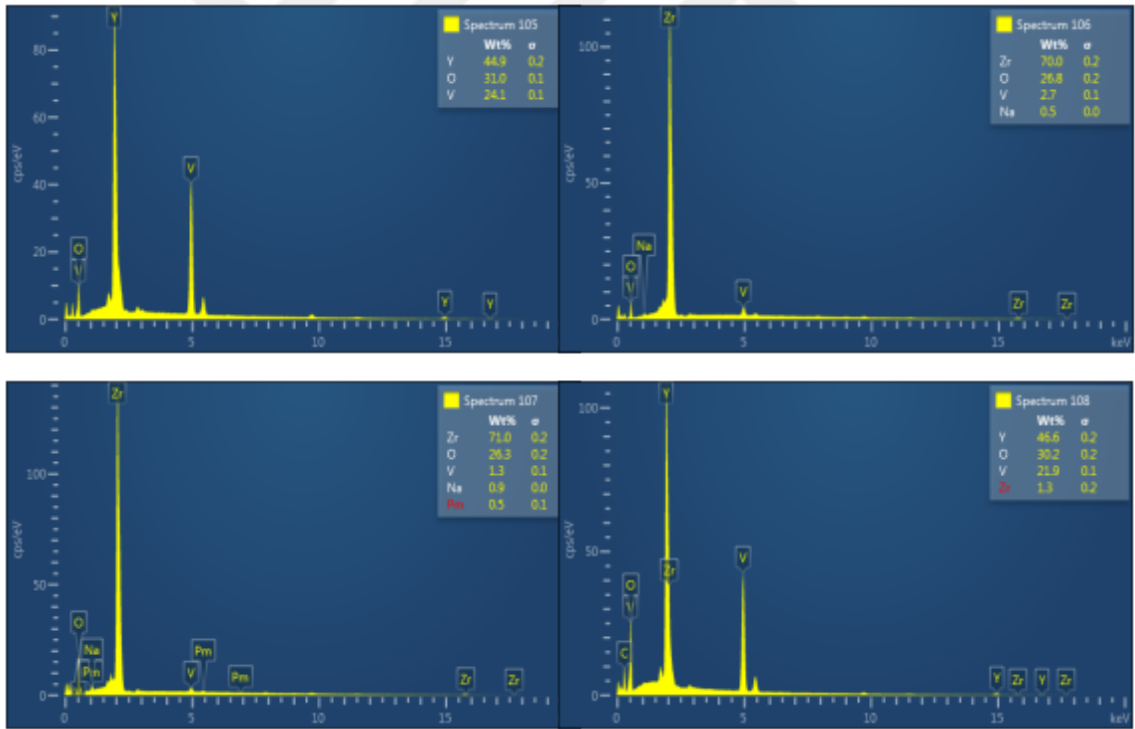
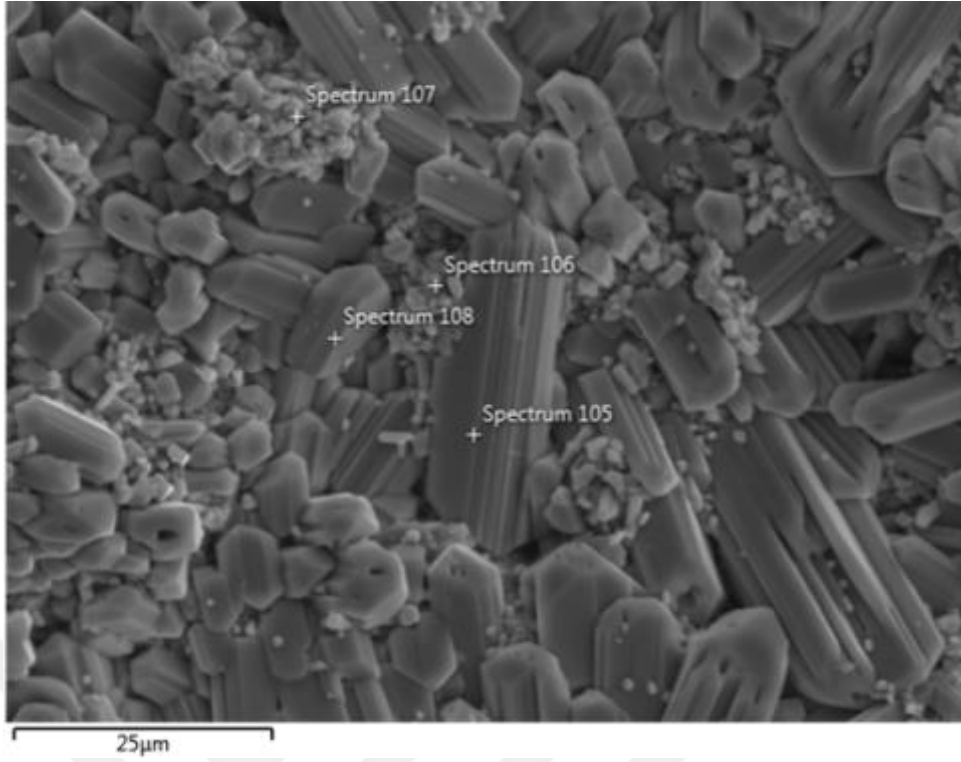
Şekil 5.18. TBC numunesinin 20 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

Şekil 5.19’da TBC numunesinin 24 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



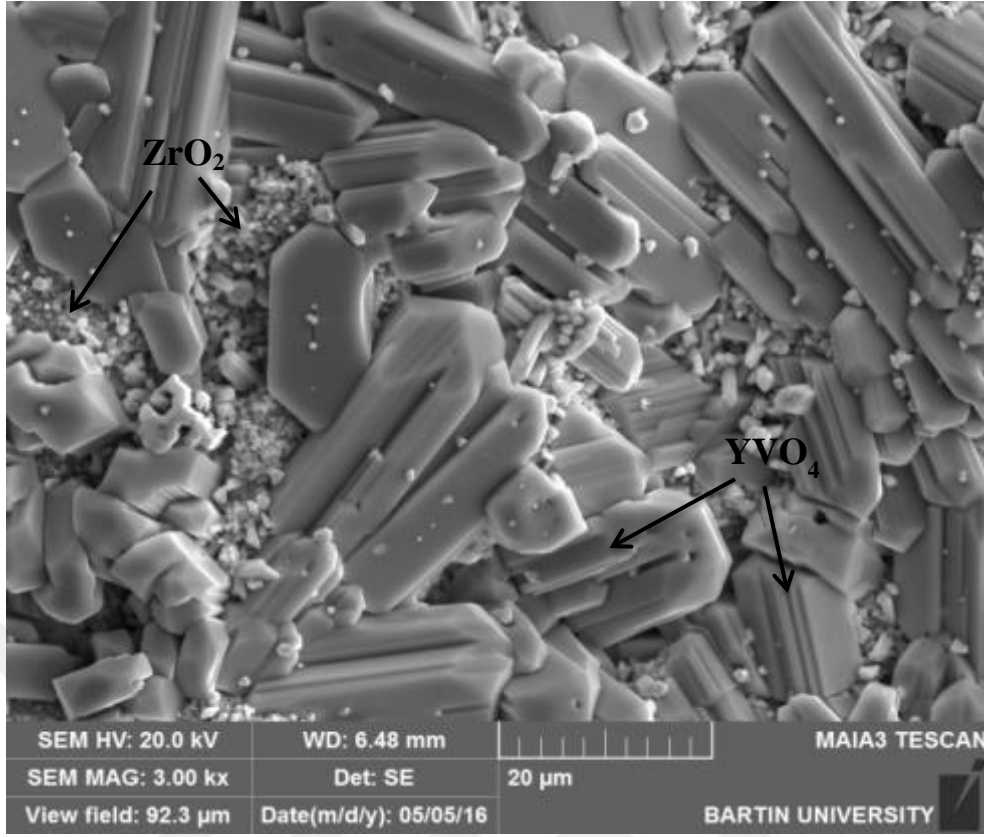
**Şekil 5.19.** TBC numunesinin 24 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.19’da 24 saat sıcak korozyon testinin ardından çubuksu yapıların oluşumu devam etmiştir. Çubuksu yapılar oluşurken gözeneklerin varlığı dikkat çekmektedir. Bu çubuksu yapılar literatürde yapılan çalışmalar ile benzer fazlarda ve şekillerde meydana geldiği görülmektedir. Ortamda bulunan  $V_2O_5$  ve  $Na_2SO_4$  gibi tuzları zirkonyayı tetragonal faz yapısında yarı kararlı halde bulunmasını sağlayan ( $Y_2O_3$ ) fazı ile reaksiyona girerek zirkonyanın monoklinik faz dönüşümüne sebep olmaktadır. Dolayısıyla yapı içinde t-ZrO<sub>2</sub>, m-ZrO<sub>2</sub> ve YVO<sub>4</sub> gibi fazların bulunması kuvvetle muhtemeldir. Ancak bir sonraki bölümde daha geniş bir şekilde tartışılacağından burada kısaca değinilmiştir. Şekil 5.20’de TBC numunesinin 24 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir. 24 saat sıcak korozyon testinin ardından oluşan çubuksu yapılar bir önceki çevrim olan 20 saatlik sıcak korozyon testi sonucu oluşan çubuksu yapılarla karşılaştırıldığında oluşan yapıların daha belirgin bir şekilde çekirdeklendiği ve boyutlarının daha da büyüdüğü gözlenmiştir.



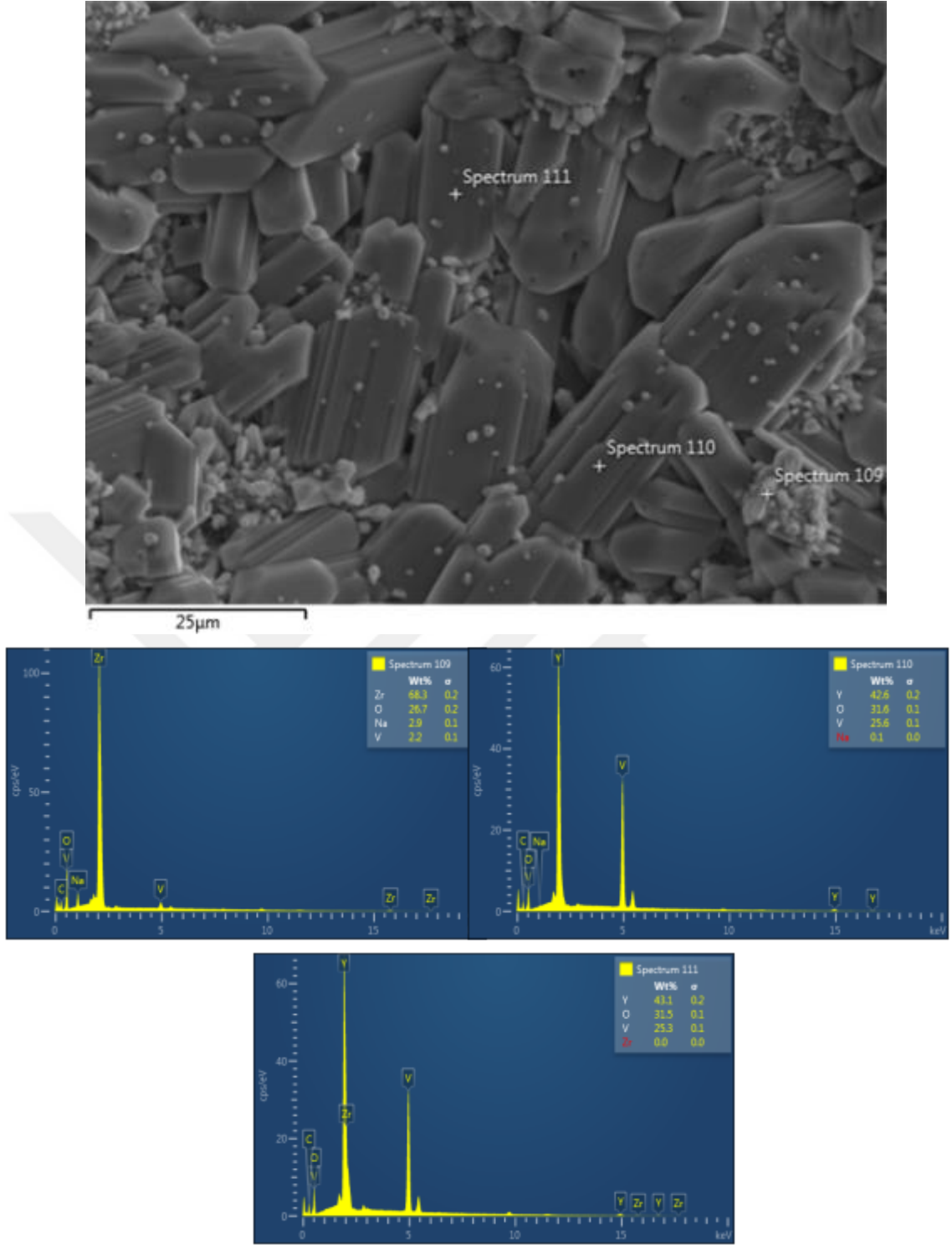
Şekil 5.20. TBC numunesinin 24 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

Şekil 5.21’de TBC numunesinin 28 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



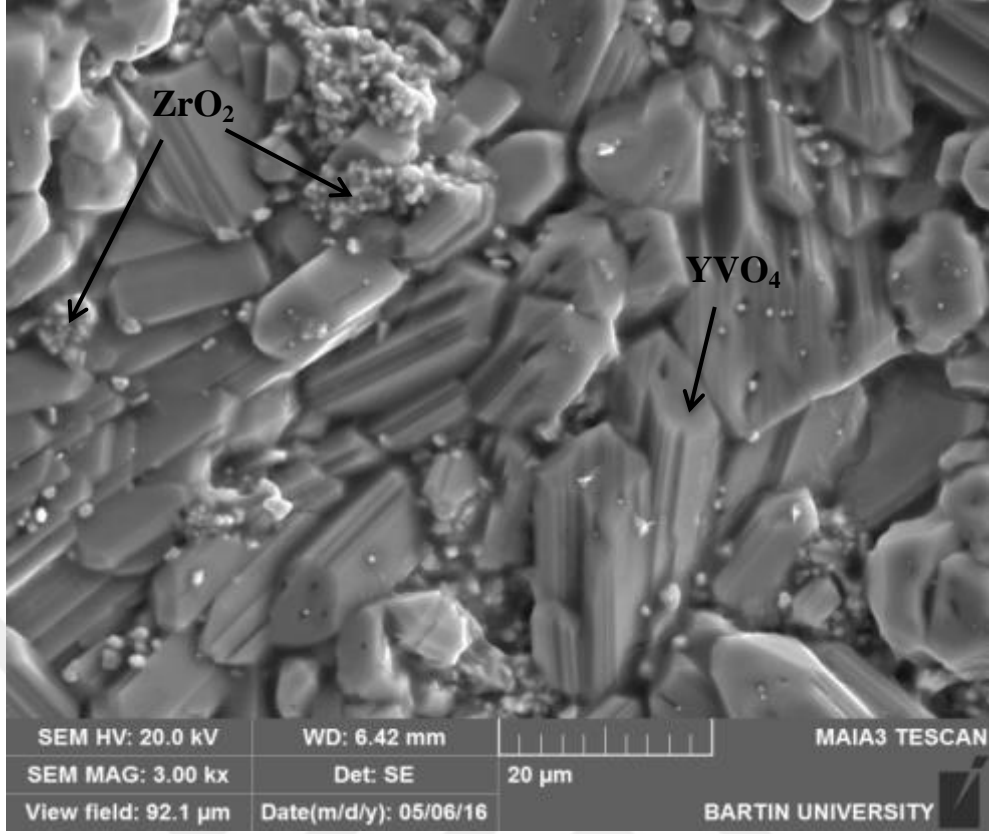
Şekil 5.21. TBC numunesinin 28 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.21’de TBC numunesinin 28 saat sıcak korozyon testi sonrasında kaplama üzerinde çubuksu  $YVO_4$  yapıların oluştuğu gözlenmiştir. Bununla birlikte kaplamayı oluşturan zirkonya bileşiğinin ise yapı içerisindeki konsantrasyonunun giderek azaldığı bariz bir şekilde görülmektedir. Çubuksu yapıların diğer çevrimlerde de olduğu gibi kaplama üzerinde düzensiz bir şekilde gömülü olarak çekirdeklendiği gözlenmektedir. Oluşan çubuksu yapıların boyutları bir önceki 24 saatlik sıcak korozyon testi sonucu oluşan çubuksu yapıların boyutları ile benzer şekilde meydana gelmiştir. Bununla birlikte Şekil 5.22’de TBC numunesinin 28 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizinde görüleceği üzere oluşan bu çubuksu yapıların bileşimleri Y, V ve O elementlerinden meydana gelmektedir. Bu doğrultuda bu çubuksu yapıların  $YVO_4$  bileşikler olduğu tahmin edilmektedir.



Şekil 5.22. TBC numunesinin 28 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

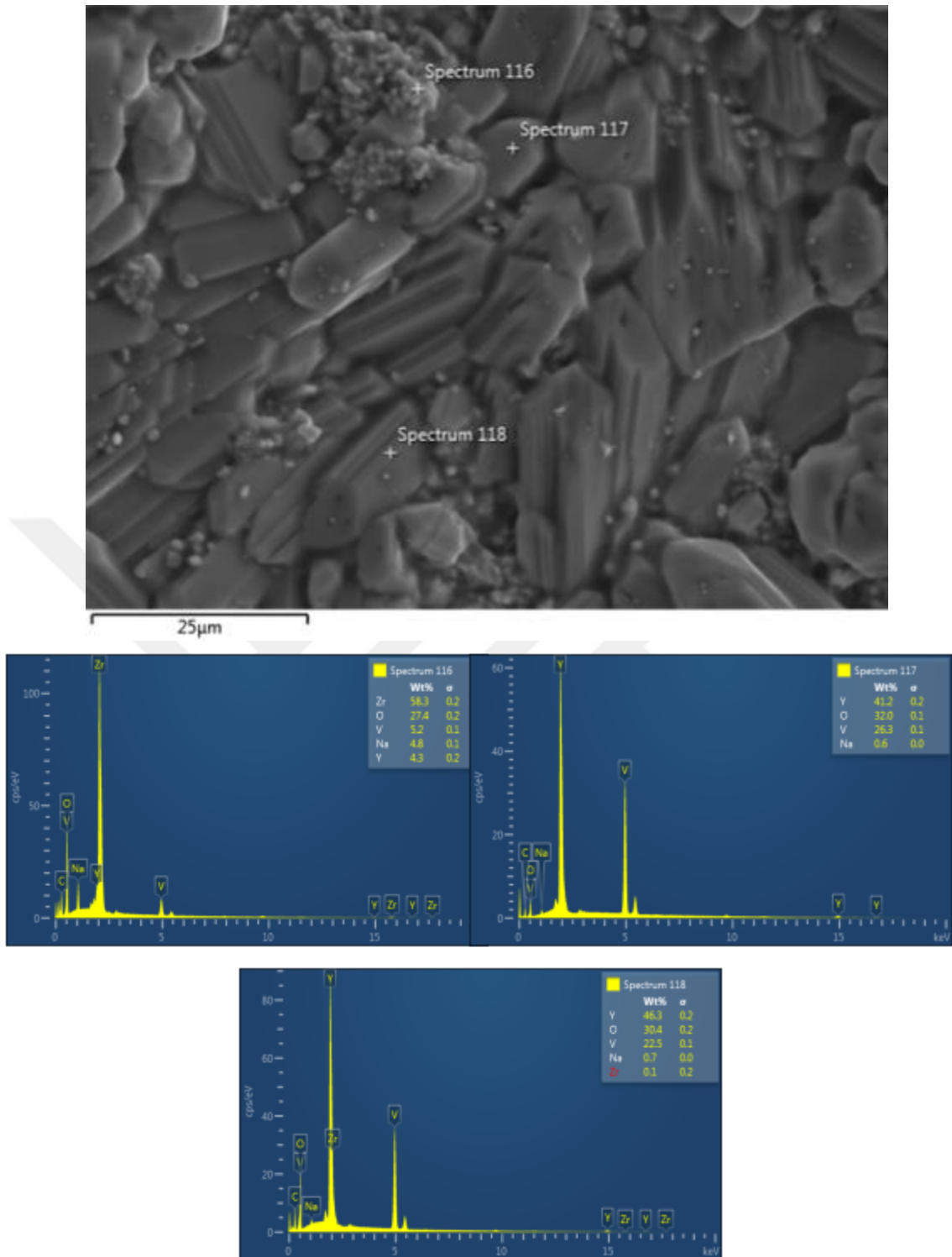
Şekil 5.23'te TBC numunesinin 32 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.23. TBC numunesinin 32 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

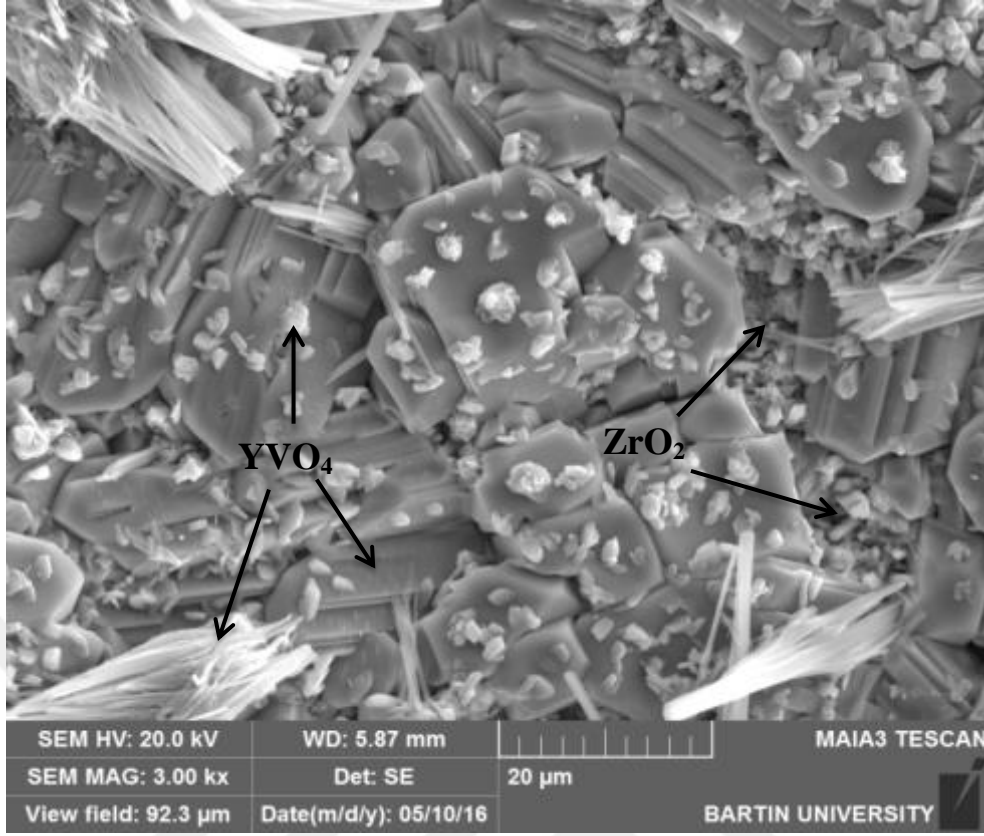
Şekil 5.23'te görüldüğü gibi TBC numunesinin 32 saat sıcak korozyon testi sonrası kaplama yüzeyin hemen hemen tamamında çubuksu yapıların oluştuğu gözlenmektedir. Kaplama bünyesinde ki zirkonya bileşiği ise ciddi oranda azalma göstermiştir. Bununla birlikte Y, V ve O elementlerin yoğunluğu artmaktadır. Dolayısıyla bu elementlerin varlığı ve artışı muhtemel  $YVO_4$  korozyon ürününün olduğu düşünülmektedir. Söz konusu bu durum Şekil 5.24'te TBC numunesinin 32 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analiziyle de teyit edilmiş olmaktadır. Şekil 5.24'te TBC numunesinin 32 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.





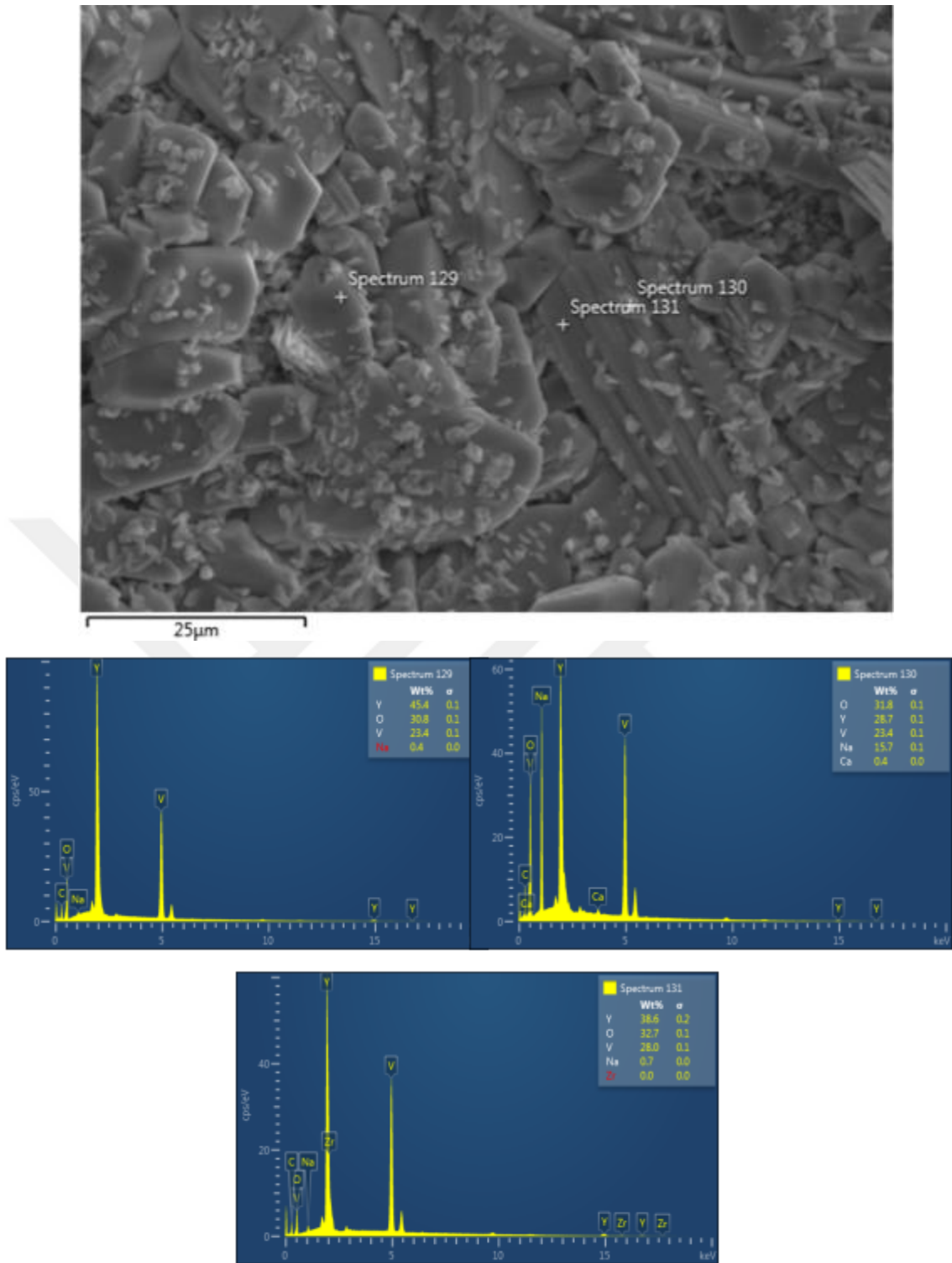
Şekil 5.24. TBC numunesinin 32 saat sıcak korozyon testi sonrası elemental analizi

Şekil 5.25'te TBC numunesinin 36 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



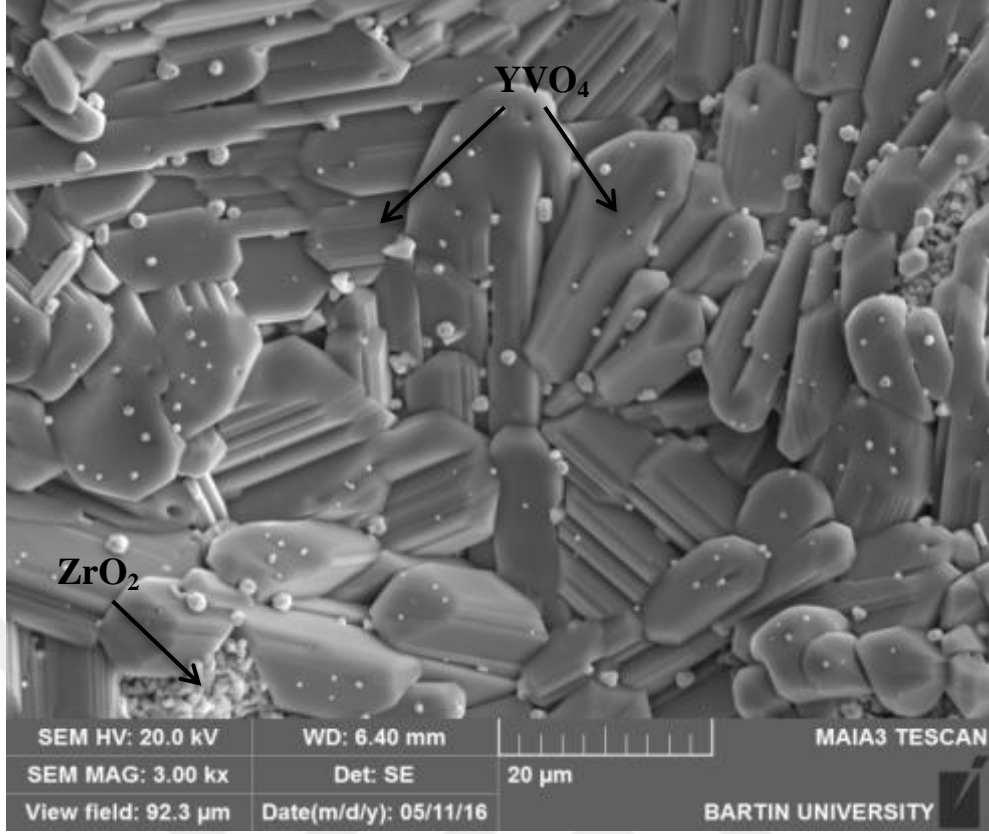
**Şekil 5.25.** TBC numunesinin 36 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.25'te verilen TBC numunesinin 36 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM mikroyapısından seramik üst kaplamadaki yitriyanın büyük bir oranda tükendiği gözlenmektedir. Şekil 5.26'da TBC numunesinin 36 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.



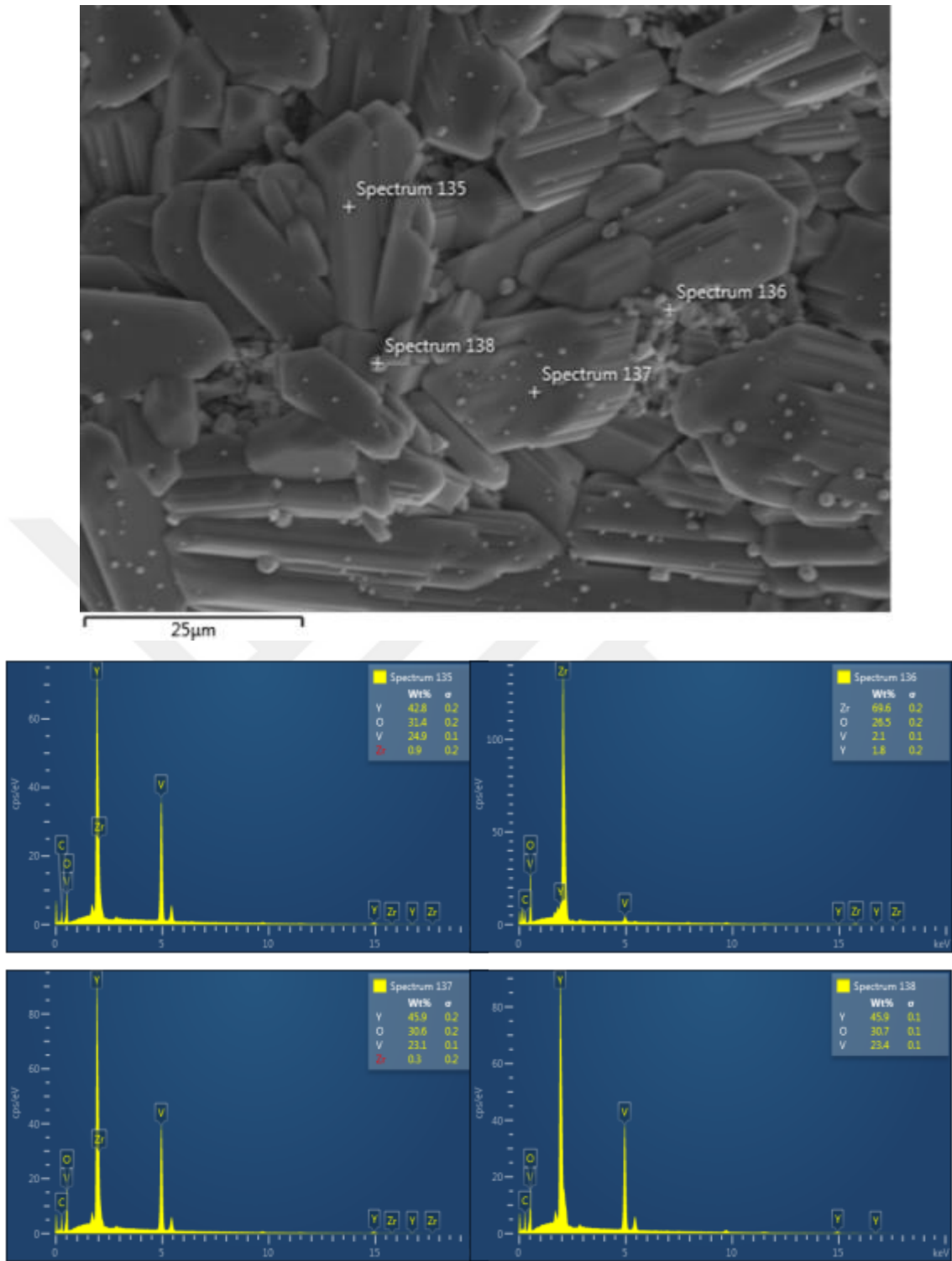
Şekil 5.26. TBC numunesinin 36 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

Şekil 5.27’de TBC numunesinin 40 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



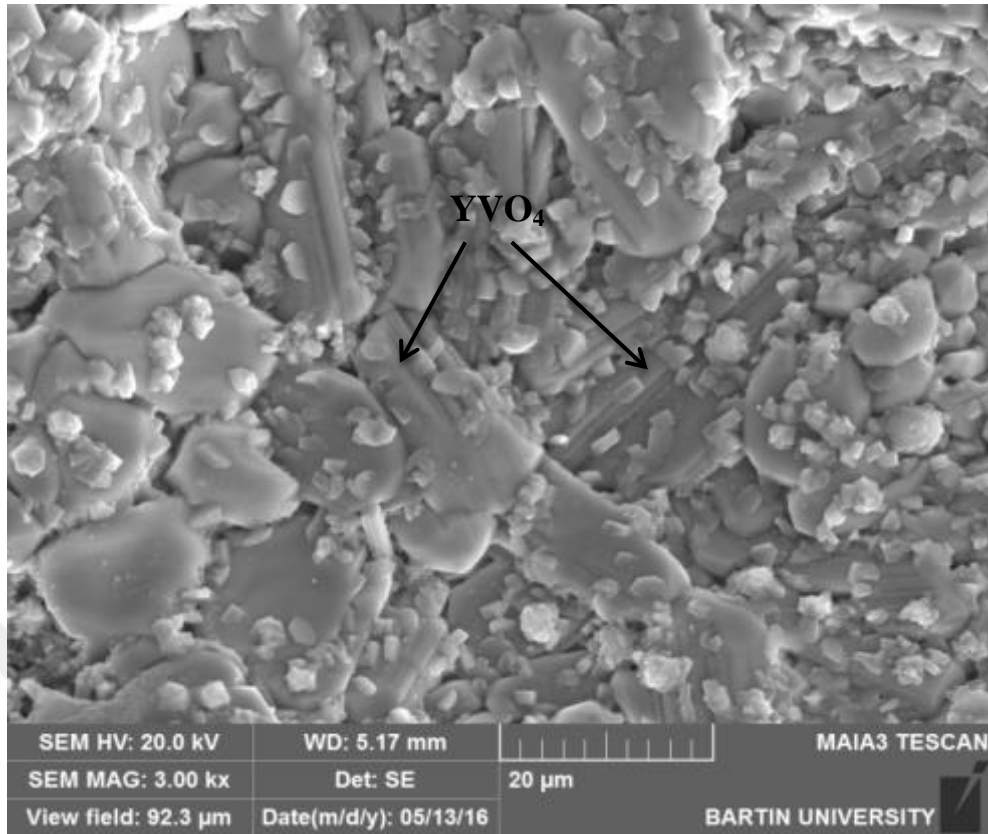
Şekil 5.27. TBC numunesinin 40 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.27’de TBC numunesinin 40 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM mikroyapısında görüldüğü üzere kaplama yüzeyinin neredeyse tamamında çubuksu yapılar oluşmuş ve tüm yüzeyi kaplamıştır. Bunun yanında oluşan bu çubuksu yapıların üzerinde düzensiz ve genelde küresele yakın bir şekilde çekirdeklenen ve içeriği Y, V ve O elementlerinden oluşan  $YVO_4$  yapılarının da olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.28’de TBC numunesinin 40 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.



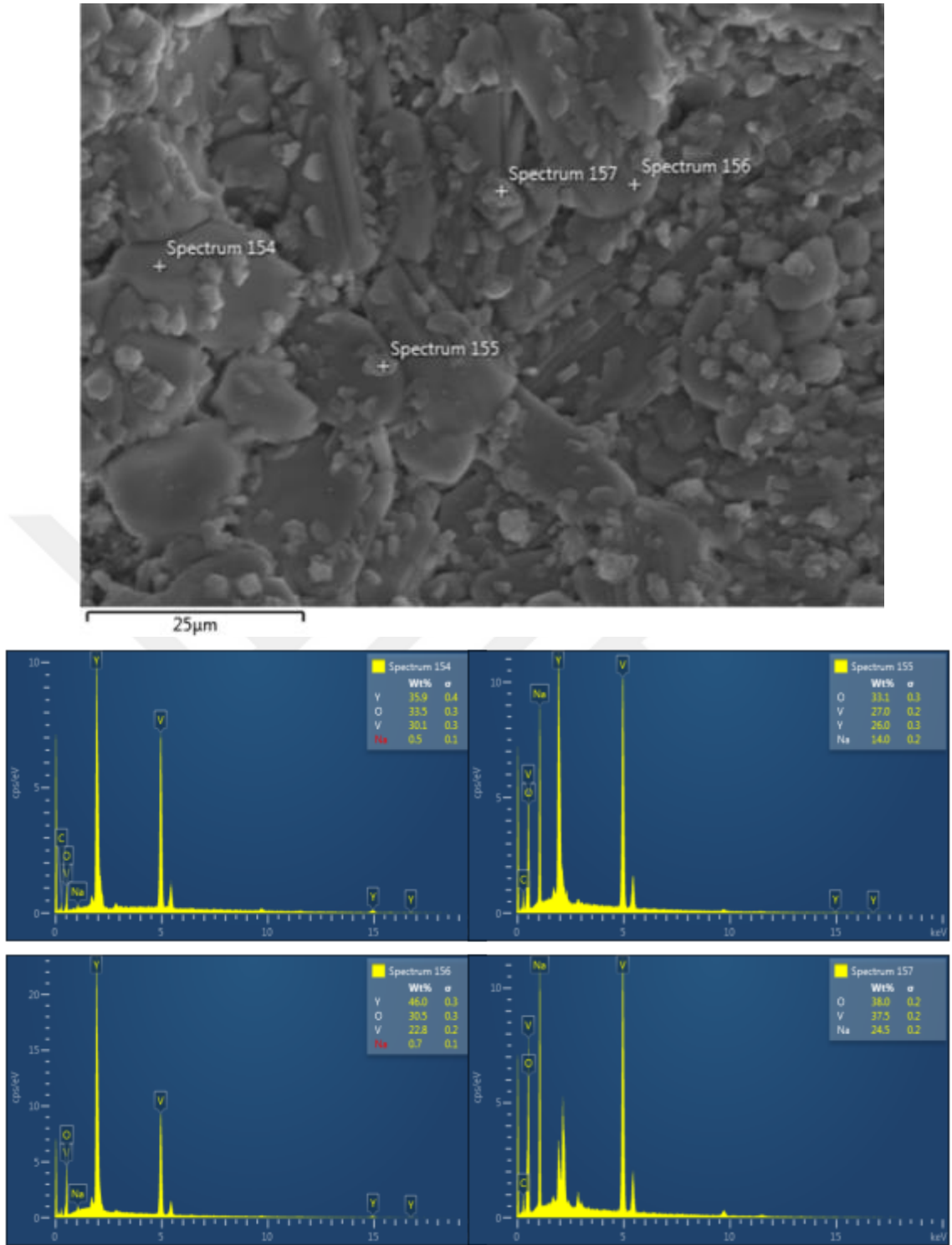
Şekil 5.28. TBC numunesinin 40 saat sıcak korozyon testi sonrası elemental analizi

Şekil 5.29'da TBC numunesinin 44 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



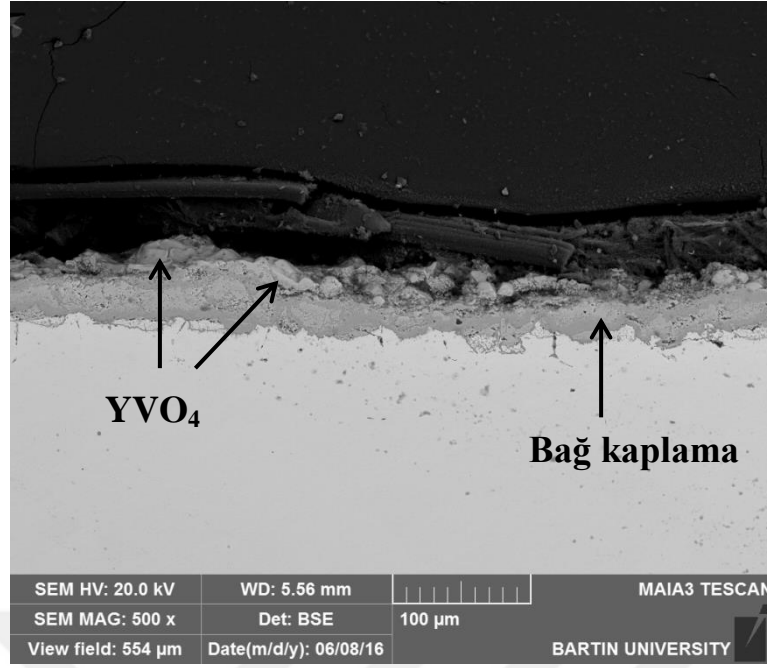
Şekil 5.29. TBC numunesinin 44 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.29’da verilen TBC numunesinin 44 saat sıcak korozyon testi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü ve Şekil 5.30’da verilen TBC numunesinin 44 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizlerinden elde edilen verilere dayanarak kaplamaya yüzeyinin tamamında Y, V ve O elementlerinin varlığından söz edilebilir. Dolayısıyla bu elementlerin varlığı korozyon ürünü olan  $YVO_4$ ’ün oluştuğunun bir kanıtıdır. Buna karşın TBC numunesinin 44 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizinde zirkonyum elementine rastlanılmamıştır. Bununla beraber bazı  $YVO_4$  bileşiklerinin yeteri olgunluğa ulaşamaması  $YVO_4$  bileşiğinin oluşumunda ve monoklinik  $ZrO_2$ ’nin stabilizasyonunu sağlayan  $Y_2O_3$  bileşiğinde bulunan Y elementinin de azaldığı ve neredeyse tükenmekte olduğu gözlenmektedir. Bütün bu oluşumlar sonucunda t-zirkonyanın büyük bir miktarının m-zirkonyaya dönüştüğü ve bunun neticesinde TBC numunesinin hasara uğradığı açıktır. Şekil 5.30’da TBC numunesinin 44 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi verilmiştir.



Şekil 5.30. TBC numunesinin 44 saat sıcak korozyon testi sonrası elementel analizi

Şekil 5.31’de TBC’lerin 48 saat sıcak korozyon testi sonrası ara yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.

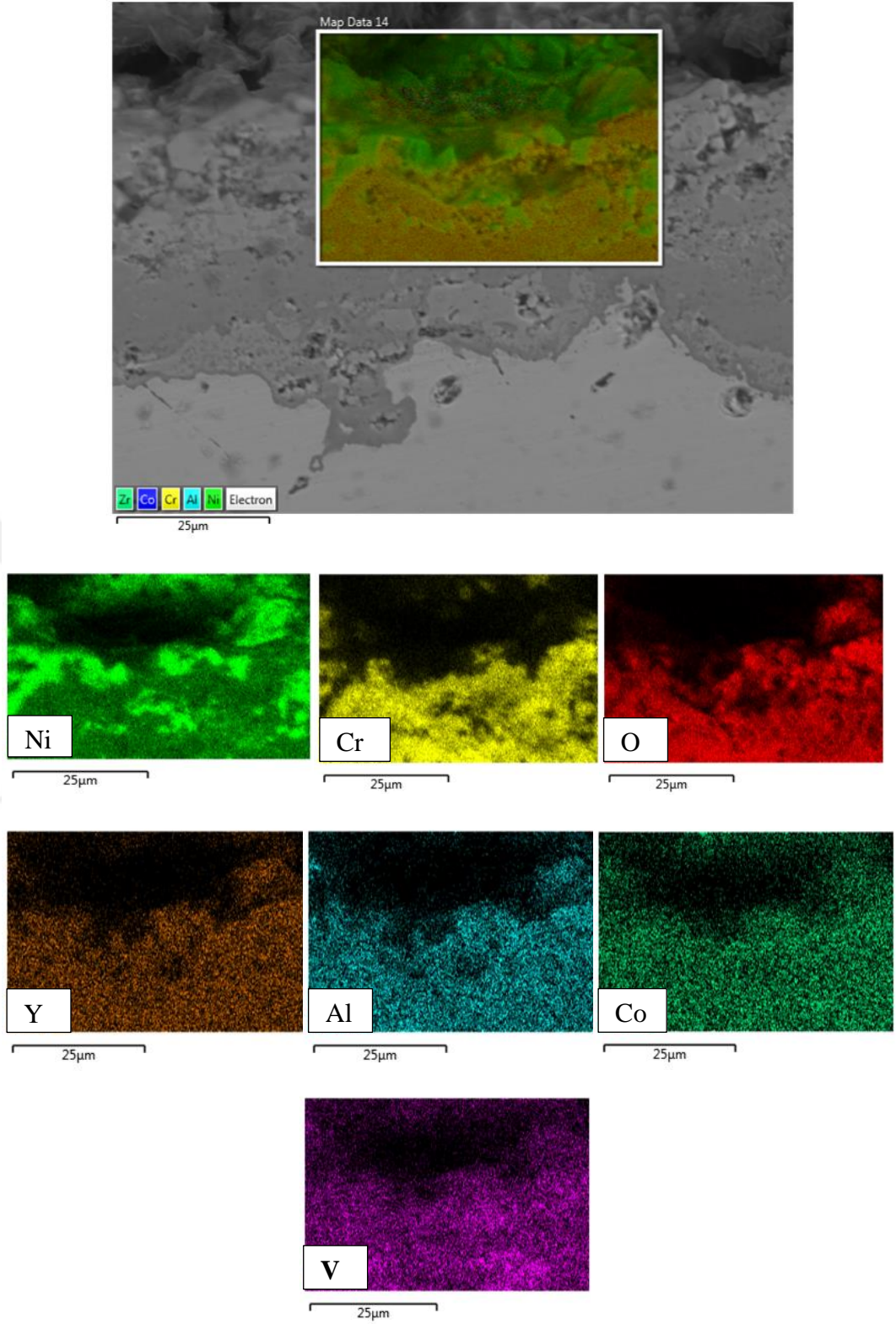


**Şekil 5.31.** TBC'lerin 48 saat sıcak korozyon testi sonrası ara yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.31'de görüldüğü üzere 48 saat sıcak korozyon sonunda üst kaplama bağ kaplamadan tamamen ayrılarak ciddi bir hasara uğramıştır. Bundan dolayıdır ki, aynı SEM görüntüsünde sadece bağ kaplama görülmektedir.

Şekil 5.32'de TBC'lerin 48 saat sıcak korozyon testi sonrası ara yüzey elementel analizi verilmiştir. Şekil 5.32'de görüldüğü üzere 48 saat sıcak korozyon testi sonrası ara yüzeyde Y, V, Co, Ni, Al, Cr ve O elementlerinin tespiti yapılmıştır. Dolayısıyla bağ ve seramik kaplama ara yüzeyinde  $YVO_4$ 'ün yanında karışık oksitlerin de oluştuğu düşünülmektedir.

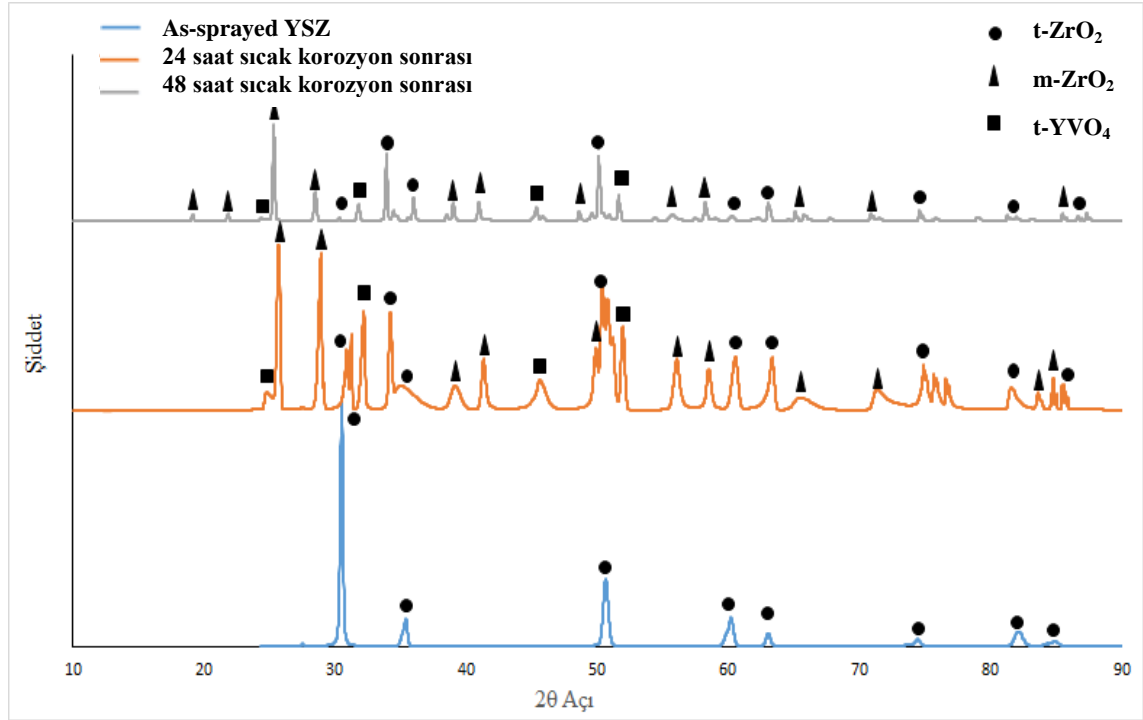




Şekil 5.32. TBC'lerin 48 saat sıcak korozyon testi sonrası ara yüzey elementel analizi

### 5.4.3 TBC'lerin sıcak korozyon sonrası XRD analizleri

Sıcak korozyon sonrasında kaplama yapısında zamana bağlı olarak oluşan oksit fazları XRD ile incelenmiştir. Şekil 5.33'te APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC numunesinin as-sprayed (püskürtüldüğü haliyle) ve sıcak korozyon testleri sonrasındaki XRD analiz sonuçları verilmiştir.



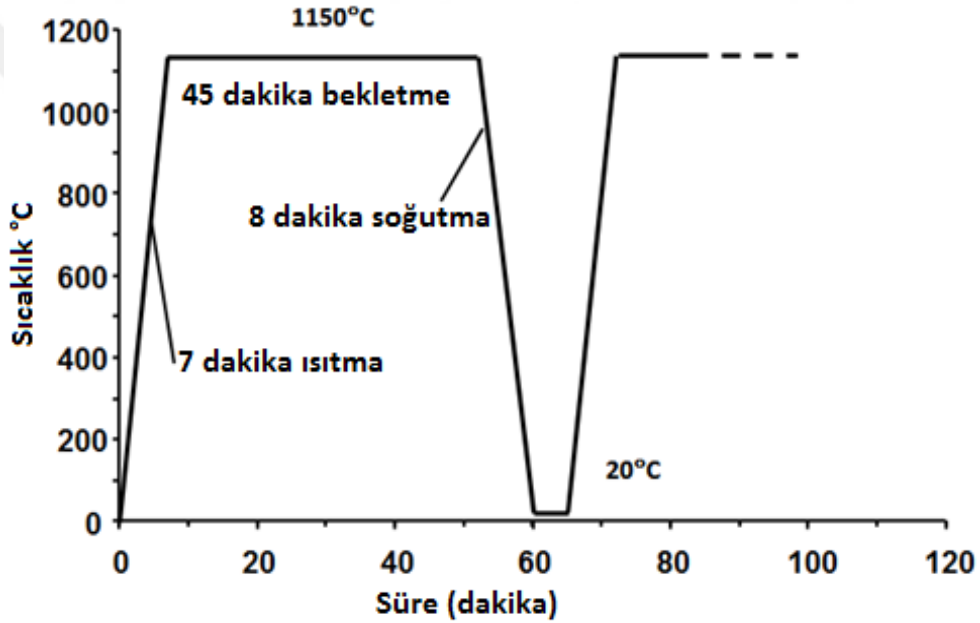
Şekil 5.33. APS yöntemiyle üst kaplaması üretilmiş TBC numunesinin as-sprayed (püskürtüldüğü haliyle) ve sıcak korozyon testleri sonrasındaki XRD analiz sonuçları

Şekil 5.33'te görüldüğü üzere 1000 °C sıcaklıkta gerçekleştirilen sıcak korozyon testlerinin (24 ve 48 saat) ardından yapılan XRD analizlerinden birbirinin benzeri sonuçlar içeren tetragonal faz yapıları tespit edilmiştir. Bununla birlikte XRD analizlerinden kaplama üst yapısında, artan zamanla faz dönüşümü gerçekleştiği görülmüştür. Faz dönüşümü gerçekleşen bu fazların tetragonal zirkonya, monoklinik zirkonya ve  $YVO_4$  faz yapıları tespit edilmiştir.

## 5.5 TBC'lerin Termal Çevrim Davranışları

### 5.5.1 TBC'lerin termal çevrim testi sonrası mikroyapısal özellikleri

APS yöntemi ile üretilen TBC'lerin termal çevrim testi, TGO oluşum ve büyüme davranışlarını incelemek amacıyla 1150 °C sıcaklıkta ve 60 dakikalık çevrimler şeklinde gerçekleştirilmiştir. Her bir çevrim periyodu; fırın sıcaklığının 7 dakikada ısıtılması ve ardından 45 dakika bu sıcaklıkta tutulması daha sonra ise 8 dakika soğutma şeklinde 60 dakikalık çevrimler ile gerçekleştirilmiştir. Şekil 5.34'te fırın çevrim testinde uygulanan termal çevrim diyagramı verilmiştir.



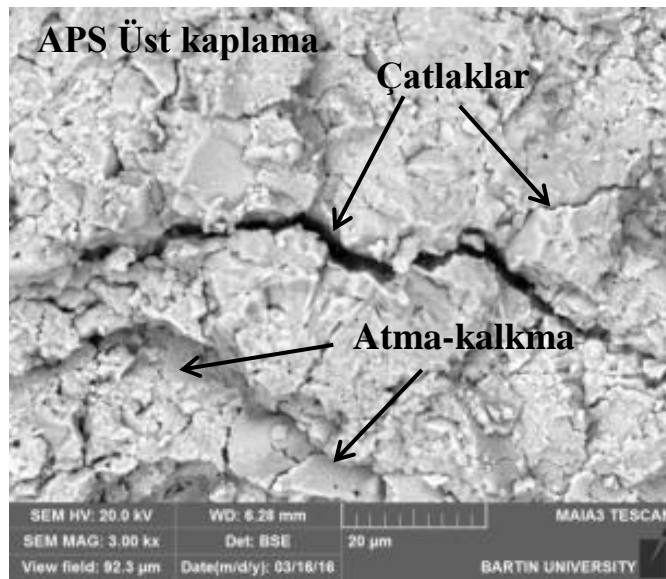
Şekil 5.34. Fırın çevrim testinde uygulanan termal çevrim diyagramı

Termal çevrim testi sonrası kaplamanın mikroyapısal ve mekanik deneyleri yapılarak özellikleri belirlenmiş, aynı sıcaklık ve zaman süreli yüksek sıcaklık termal çevrim fırın testleri ile karşılaştırması yapılmıştır. TGO formu, yapısı ve karakterizasyonu SEM, EDX-haritalama elementel ve XRD ile belirlenmiş olup güncel literatür ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5.35'te TBC'lerin termal çevrim deneyinde fırın içinden görünümü verilmiştir.



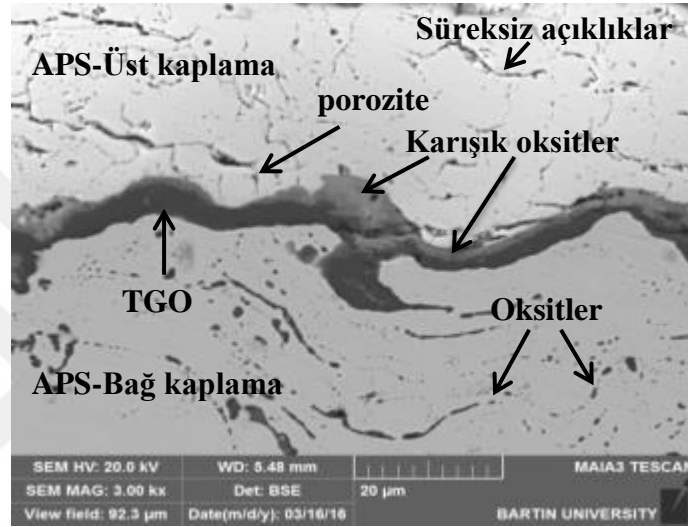
Şekil 5.35. TBC'lerin termal çevrim deneyinde fırın içinden görünümü

TBC'lerin termal çevrim testi, 40 saatlik çevrim sonrasında üst kaplamada pullanmalar ve atmalar meydana gelmiştir. Hasara uğrayan TBC'lerin ve termal çevrim testlerine son verilmiştir. Termal çevrim sonrasında maruz kalınan yüksek sıcaklıktaki ısıtma sonucunda, gerilmeler etkisiyle (çekme/büzülme) oluşan kılcal ve farklı boyutlarda mikro-çatlakların var olduğu yapı meydana gelmiştir. Mikroyapı, üst yüzey özellikleri bakımından homojen özelliğini kaybetmiştir. Bununla birlikte üst kaplamada bir kısım kaplamanın attığı ve kalktığı gözlenmiştir. Şekil 5.36'da APS yöntemi ile üretilen TBC'lerin termal çevrim deneyi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.36. APS yöntemi ile üretilen TBC'lerin termal çevrim deneyi sonrası üst yüzey SEM görüntüsü

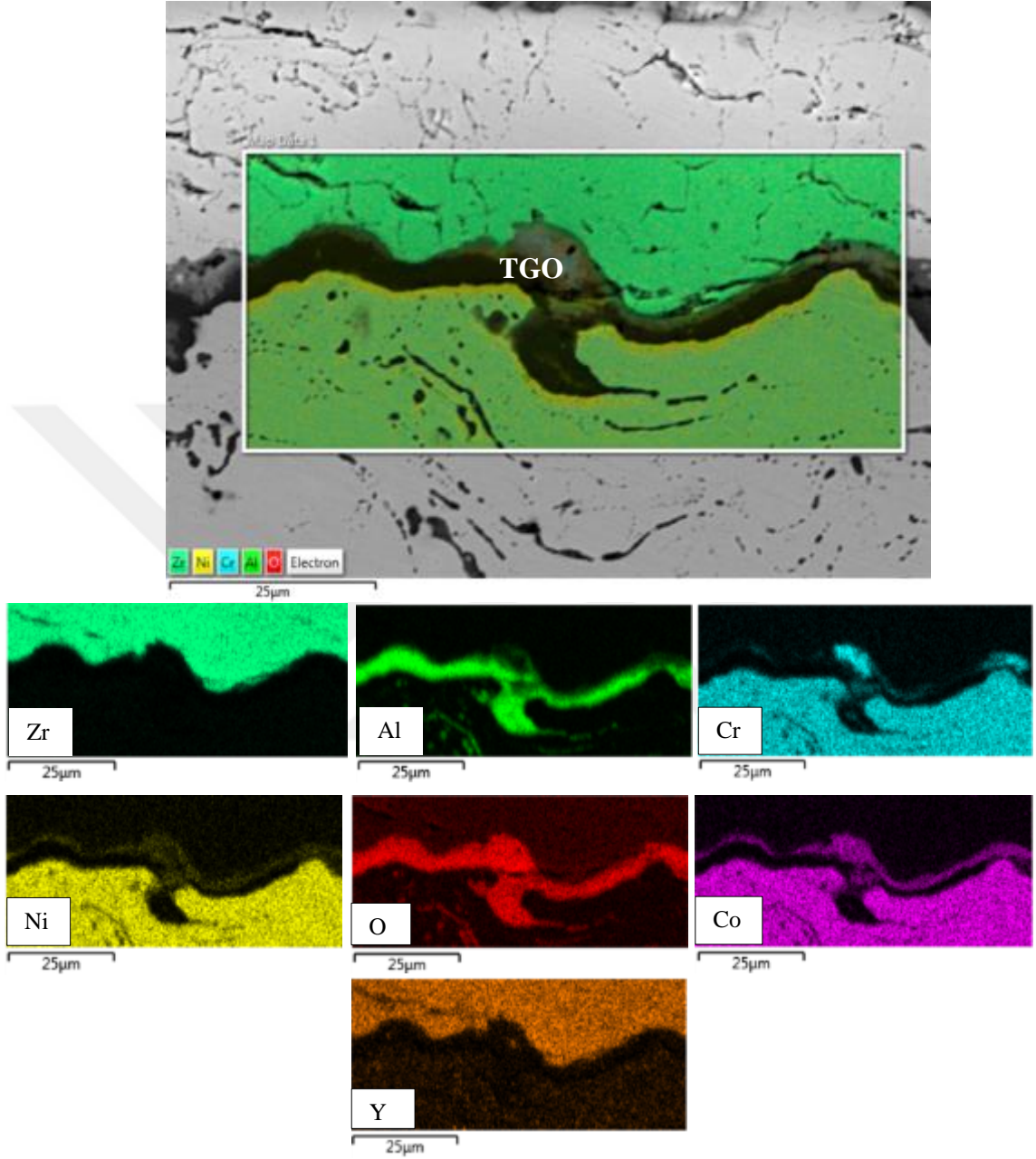
Termal çevrimler sürecinde kaplamada ısıtma-soğutma rejimi nedeniyle ısıl gerilmeler oluşmaktadır. Aynı zamanda üretim koşullarından kaynaklı olarak kaplama bileşenlerin yeterli plastik deformasyona uğramaması sonucu oluşan boşluk yapılar gerilme konsantrasyonuna neden olmaktadır. Dolayısıyla kaplamanın zayıf ve gerilmelere karşı dayanımının düşük olmasına neden olmakta ve kaplama hasara uğramaktadır. Şekil 5.37’de TBC’lerin termal çevrim deneyi sonrası enine kesit SEM mikroyapı görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 5.37.** APS yöntemi ile üretilmiş TBC’lerin termal çevrim deneyi sonrası enine kesit SEM görüntüsü

APS tekniğiyle üretilen TBC yapısı, Şekil 5.36 ve Şekil 5.37’de görüldüğü üzere çatlak ve benzeri birçok hatayı yapısında barındırmaktadır. 40 saat termal çevrim süreci sonrası bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde TGO yapısının oluştuğu görülmektedir. Aynı zamanda APS CoNiCrAlY bağ ve APS YSZ üst kaplamaya sahip TBC numunesinde kaplama üretimi sonrası seramik üst tabaka mikroyapısı gözenek ve çatlak benzeri süreksiz yapılar içerdiği görülmektedir. Mikroyapıda, gözenek içeren alanlar koyu siyah renkte, oksit oluşum yapıları ise daha açık renk tonunda olduğu gözlenmiştir. Şekil 5.37 ve Şekil 5.38’de görüldüğü gibi, CoNiCrAlY içerikli bağ ve YSZ içerikli üst kaplama ara yüzeyinde TGO yapısı oluşmuştur. TGO yapısı bu bağ ve üst kaplama ara yüzey boyunca uzanmakta ve genelde  $Al_2O_3$  formunda bulunduğu gözlenmektedir. CoNiCrAlY bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde bulunan  $Al_2O_3$  tabakası kararlı ve genelde üniform bir yapı teşkil etmektedir. Üst seramik kaplama tabakasında çatlak ve süreksiz açıklıkların bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu çatlakların ilerlemesi bu süreksiz boşluklara bağlı olarak gelişmekte olduğu gözlenmektedir. Şekil 5.38’de APS

yöntemi ile üretilmiş TBC'lerin termal çevrim deneyi sonrası kesit görüntüsünün elementel analizi verilmiştir.



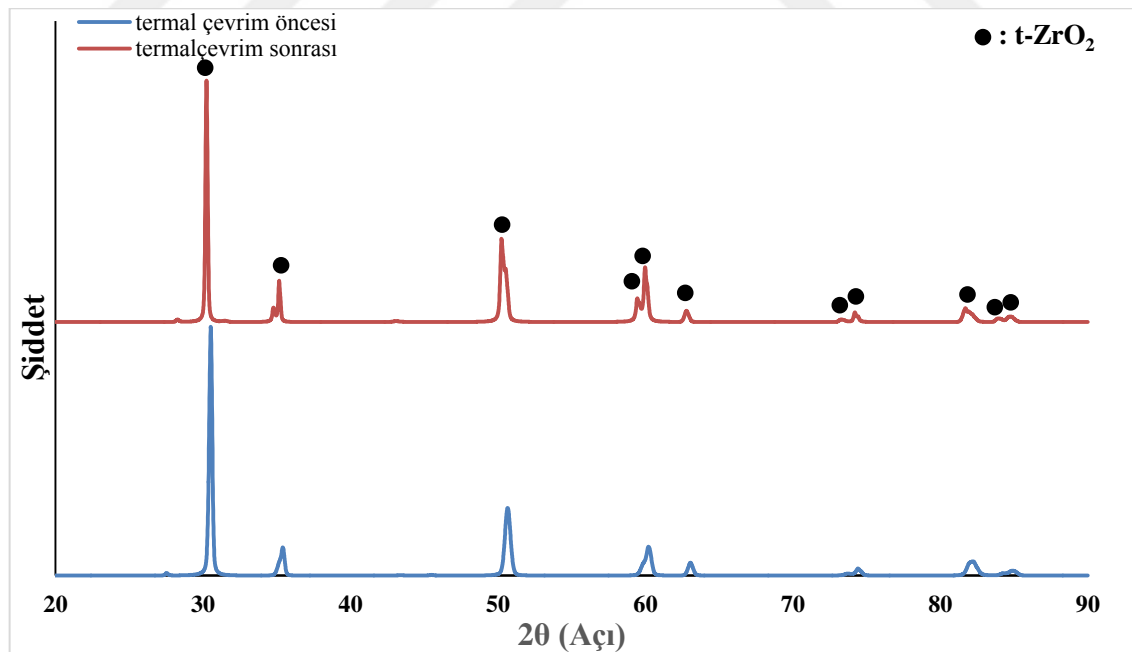
**Şekil 5.38.** APS yöntemi ile üretilmiş TBC'lerin termal çevrim deneyi sonrası kesit görüntüsünün elementel analizi

Şekil 5.38'de mikroyapı ve elementel dağılımdan da açıkça görülmektedir ki, bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde oluşan koyu siyah renkli görünen TGO yapısı Al ve oksijen elementlerini içermekte ve  $Al_2O_3$  formunda bulunmaktadır.  $Al_2O_3$ 'ün dışında kalan kısımda bulunan TGO tabakasındaki açık renkli diğer küçük yapılarda ise karışık oksitler yer almaktadır.

Kaplamaların elementel analizi ile bağ tabakanın oluşumda düzensiz ama olmakla birlikte bütün bağ kaplamada yer alan Al içeriğinin bu formunu kaybettiği ara yüzeyde ise oksijen ile birlikte artarak TGO yapısını oluşturduğu gözlenmiştir. Alüminyum ile birlikte aynı şekilde yapı içerisinde bulunan oksijen de alüminyum ile oksidasyon reaksiyonunda yer almasıyla kaplama içerisindeki üniform dağılımını yitirmiştir. TGO yapısının oluşumu; oksijenin kaplamaya nüfuzu ile birlikte alüminyumun oksijene olan yüksek ilgisinden dolayı bağ kaplamadan ara yüzeye difüzyonu sonucu meydana gelmiştir. Dolayısıyla TBC sistemlerinde yüksek sıcaklıklarda ısınma-soğuma rejimi ile gerçekleşen termal çevrim odaklı hasara neden olan en önemli etmenlerden birisi bu TGO yapısının oluşmasıdır. Bununla birlikte TBC'lerin termal çevrim sürecinde çevrim süresini bu TGO yapısının büyümesi ve oluşumunu tamamlaması belirlemektedir.

### 5.5.2 TBC'lerin termal çevrim testi sonrası XRD analizleri

Şekil 5.39'da APS yöntemi ile üretilmiş TBC'lerin termal çevrim deneyi sonrası YSZ içerikli üst kaplamaya ait XRD paterni verilmiştir.



Şekil 5.39. APS yöntemi ile üretilmiş TBC'lerin termal çevrim deneyi sonrası YSZ içerikli üst kaplamaya ait XRD paterni

Termal çevrim sonrasında da aynı açılarda tetragonal-zirkonyaya ait piklerin elde edilmesi, bu fazın monoklinik-zirkonyaya dönüşmediğinin bir delilidir.

## 5.6 TBC'lerin Katı Partikül Erozyonu Davranışları

### 5.6.1 Erozif aşınma oranının değişimi

Literatürde kaplamaların erozyon davranışlarına partikül çarpma açısının etkileri üzerine bir çok çalışma yapılmıştır. Partikül çarpma açısının  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$  gibi farklı açılarda kademeli olarak test edildiği çalışmalarda erozif aşınma oranlarının değişimi gözlemlenmiştir (Amirthan ve ark., 2010; Cernuschi ve ark., 2011; Imrek ve ark., 2011). Bu tez çalışmasında ise  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik açılarda katı partikül erozyonuna uğratılan kaplamalar, farklı miktarlarda ağırlık kaybına uğramıştır. Bu ağırlık kaybına bağlı olarak erozyon oranları da farklılık göstermiştir. Buna göre Çizelge 5.1 ve Şekil 5.1'den de anlaşılacağı gibi en fazla erozyon oranı  $60^\circ$ 'lik partikül çarpma açısında gerçekleşmiştir. Bunu  $30^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik açılarda meydana gelen erozyon oranları takip etmektedir. Çizelge 5.1'de kaplamaların katı partikül erozyonu sonrası ağırlık kaybı ve erozyon oranları verilmiştir.

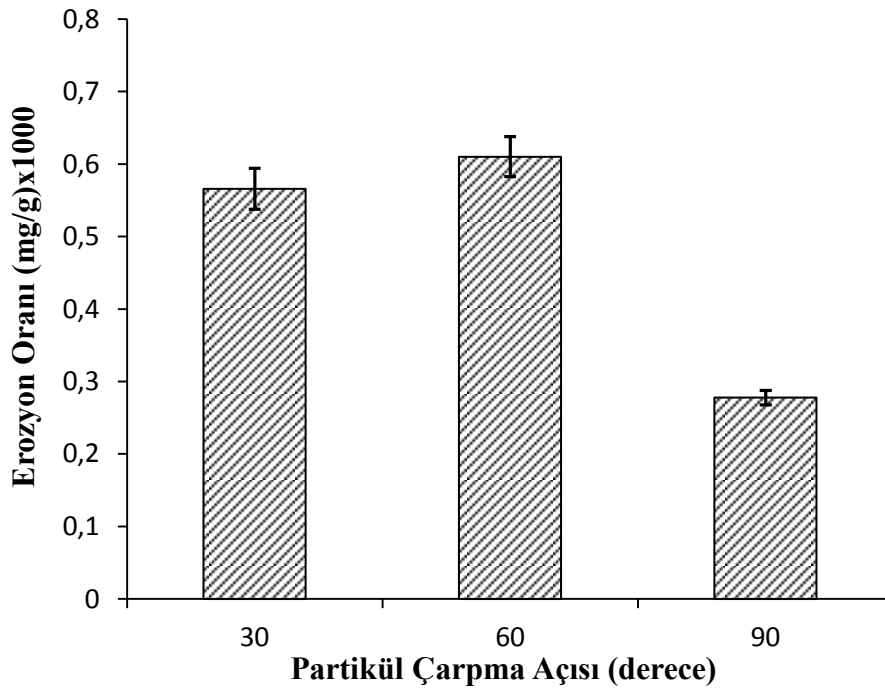
**Çizelge 5.1.** Kaplamaların katı partikül erozyon sonrası ağırlık kaybı ve erozyon oranları

Altlık ve kaplama türleri				Ağırlık kaybı ve erozyon oranı			
Altlık	Bağ kaplama	Üst kaplama	Partikül çarpma açısı	$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$\Delta m$ (mg)	Erozyon oranı [mg/g]×1000
Inconel-718	APS		90	15,12	15,08	35,7	0,277
			60	15,98	15,89	87,7	0,610
			30	15,83	15,76	67,5	0,565

Bu çalışmada nikel esaslı süperalaşım olan Inconel 718 altlık malzeme üzerine yapılan TBC'ler katı partikül erozyonuna uğratılmış ve sergiledikleri davranışlar incelenmiştir. En fazla erozyon oranı  $60^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarında daha sonra  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarında gerçekleşmiş olup, literatürde belirtildiği gibi kaplamalar yarı gevrek davranış göstermiştir (Amirthan ve ark., 2010; Ramesh ve ark., 2010; Krishnamurthy ve ark., 2012). Krishnamurthy ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada, Al-6061 altlıklar üzerine plazma sprey yöntemi kullanılarak TBC'lerin üretimi gerçekleştirilmiştir. Bağ kaplama tozu olarak,  $Al_{25}Fe_7Cr_5Ni$  ve  $Al_2O_3$ 30 (Ni20Al) üst kaplama da ise 99,5  $Al_2O_3$  ve  $ZrO_2$ 5CaO tozları kullanılmış ve üretilen



kaplamaların katı partikül erozyonu davranışları incelenmiştir. Aşındırıcı olarak silika kullanılan çalışmada katı partikül erozyonu 15°, 45° ve 90°'lik partikül çarpma açılarında gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak en fazla erozyon oranının 45°'lik çarpma açısında gerçekleştiği ortaya konulmuştur. Dolayısıyla kaplamanın gevrek ile sünek arasında yarı gevrek bir davranış sergilediği ifade edilmiştir (Krishnamurthy ve ark., 2012). Krishnamurthy ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu çalışması ile bu doktora çalışmasında üretilen kaplamaların katı partikül erozyonu davranışları kıyaslandığında her iki çalışmadaki kaplamaların aynı mekanizmada aşınma sergilediği söylemek mümkündür. Şekil 5.40'da kaplamaların katı partikül erozyonu sonrası erozif aşınma oranları verilmiştir.



Şekil 5.40. Kaplamaların farklı partikül çarpma açılardaki katı partikül erozyonu oranları

Katı partikül erozyonu oranının maksimum olduğu partikül çarpma açısı 60° iken, minimum katı partikül erozyonu oranı ise 90°'lik partikül çarpma açısında gerçekleşmiştir. Bununla birlikte literatürde katı partikül erozyonu testi yapılan kaplamaların genellikle 90°'lik çarpma açısında daha fazla erozyona uğradığı ortaya konmuştur. Cernuschi ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada üst kaplama YPSZ ile üretilen TBC'lerin alümina aşındırıcılar kullanılarak 30° ve 90°'lik partikül çarpma açılarıyla katı partikül erozyonu testi yapılmıştır. En fazla erozyon oranının

90°'lik partikül çarpma açısında gerçekleştiği ortaya konmuştur (Cernuschi ve ark., 2016). Bir başka çalışmada, Ramesh ve arkadaşları HVOF ile WC-Co/NiCrFeSiB çelik yüzeyine TBC'lerin üretilmiş ve kaplama üzerine katı partikül erozyonu testi yapılmıştır. Aşındırıcı olarak silika kullanılmış, 30° ve 90°'lik partikül çarpma açılarında test gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak en fazla erozyon oranı 90°'lik çarpma açısında gerçekleştiği ortaya konmuştur (Ramesh ve ark., 2010). Cernuschi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada 30° ve 90°'lik partikül çarpma açılarında yapılan katı partikül erozif aşınma deneyinde 90°'de daha fazla erozif aşınma meydana geldiği gözlenmiştir.

Bununla birlikte literatürde bu doktora tez çalışmasının sonuçlarından farklı sonuçların elde edildiği çalışmalar da mevcuttur. Bunun nedeni olarak da bu tez çalışmasında kullanılan kaplamaların bağ kaplamaları CoNiCrAlY iken üst kaplamalar YSZ ile üretilmiş olmasıdır. Cernuschi ve arkadaşlarının çalışmasında ise üretilen TBC'lerde, bağ kaplama için YSZ kullanılırken üst kaplamada ise  $Gd_2Zr_2O_7$  kullanılmıştır. Bu da kaplamaların YSZ'ye göre daha düşük gözenek içermesi yanında üst kaplamanın erozif aşınma direncinin daha yüksek olması 90°'deki erozif aşınma oranını yükseltmiştir. Partikül çarpma açısının 30°'de olduğu katı partikül erozyonunda bağ kaplamanın tamamının aşınmadığı ve malzeme kaybının az olması dolayısıyla erozif aşınmanın buna paralel olarak düşük olması yadsınamaz bir gerçektir (Cernuschi ve ark., 2016). Bu tez çalışmasında ise yapılan bu çalışmalardan farklı olarak 60°'de en fazla erozif aşınma gerçekleşmiştir. TBC üst kaplamalar seramik esaslı YSZ toz malzemesi ile gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla TBC üst kaplamaların da seramik malzeme gibi davranması beklenen bir sonuçtur. Ancak yapılan bu çalışmada erozif aşınma sonucu TBC kaplamaların yarı gevrek bir davranış sergilediği sonucuna varılmıştır.

### 5.6.2 Yüzey pürüzlülük değerleri ve topografyasının analizi

Doktora tez çalışmasında farklı partikül çarpma açılarında erozif aşınmaya maruz bırakılan TBC'lerin yüzey pürüzlülük değerleri ve topografyaları 3 boyutlu (3B) temassız optik profilometre yardımıyla detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Bu bölüm içerisinde sırasıyla her bir erozif aşınma parametresine ait erozif aşınma görülen yüzeylerin;

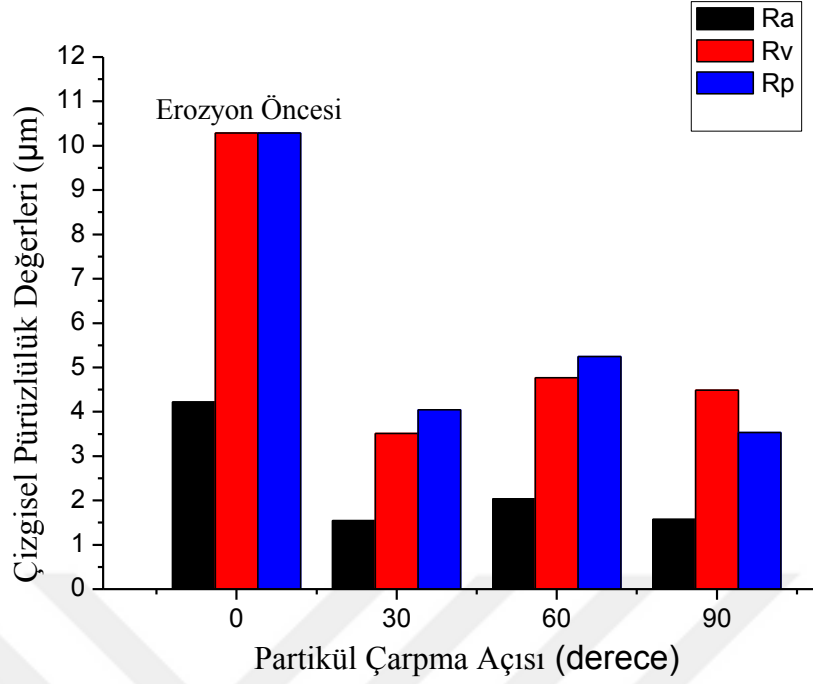
- i) Çizgisel pürüzlülük değerleri,
- ii) Alansal pürüzlülük değerleri,

- iii) Alan eğri altı pürüzlülük değerleri,
- iv) Üç boyutlu (3B) yüzey topografyaları ve
- v) Mikroyapı incelemeleri verilerek sonuçlar irdelenmiştir.

Ayrıca tez çalışmasında karşılaştırma amaçlı erozif aşınmaya maruz bırakılmayan kaplamaların da aynı şekilde yüzey analizleri aynı yöntem ile gerçekleştirilmiş karşılaştırılması yapılmıştır.

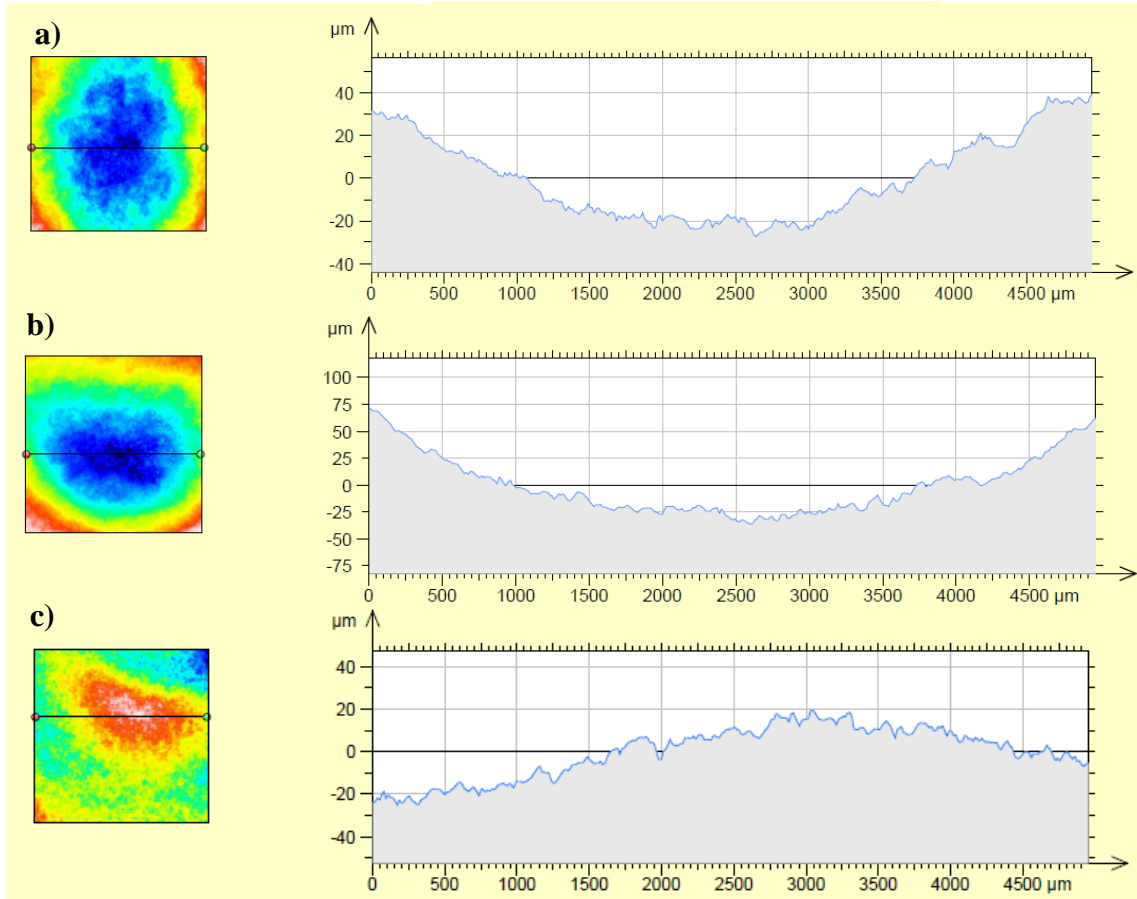
### 5.6.3 Çizgisel pürüzlülük değerlerinin değişimi

Farklı partikül çarpma açılarında erozyona maruz kalan ve erozyona maruz kalmayan (erozyon öncesi) kaplamaların çizgisel pürüzlülük değerleri verilen Şekil 5.41 incelendiğinde katı partikül erozyonuna uğramış kaplamalardan maksimum pürüzlülük değerleri sırasıyla 60°, 30° ve 90°'lik açılarda aşındırılan numunelerde görülmüştür. Bunun yanında erozyon öncesi kaplamanın pürüzlülük değerlerinin oldukça yüksek olduğu belirlenmiştir. Kaplamaların maksimum yükseltilerine (Rp) bakılırsa en yüksek değer de aynı şekilde erozyon öncesi kaplamada olduğu tespit edilmiştir. Bunu sırasıyla 60°, 30° ve 90°'lik partikül çarpma açılarıyla aşınmaya uğrayan kaplamalar izlemektedir. Minimum çukur (Rv) ise aynı şekilde aşınmaya uğramamış kaplamada olduğu ve bunu sırasıyla 60°, 90° ve 30°'lik partikül çarpma açılarıyla aşınmaya uğrayan kaplamaların takip ettiği gözlenmiştir. Dolayısıyla kaplamaların farklı partikül çarpma açılarıdaki çizgisel pürüzlülük değerleri bir önceki başlıkta anlatılan kaplamaların erozif aşınma sonucu elde edilen erozyon oranları ile örtüşmekte ve bu erozyon oranı sonuçlarını doğrular nitelikte olduğu sonucuna varılmıştır. Şekil 5.41'de kaplamaların farklı partikül çarpma açılarıdaki çizgisel pürüzlülük değerleri verilmiştir.



Şekil 5.41. Kaplamaların farklı partikül çarpma açılarındaki çizgisel pürüzlülük değerleri

Şekil 5.42.a), b) ve c)'de sırasıyla 30°, 60° ve 90°'lik partikül çarpma açılarında erozyona uğrayan kaplanmış numunelerin erozif aşınma bölgesinin merkezinden alınan çizgisel pürüzlülük değerleri verilmiştir. Tüm numunelerin çizgisel pürüzlülük değerleri belirlenirken erozif aşınma sonrası numune yüzeyinde meydana gelen krater şeklindeki erozif aşınma bölgesinin merkezinden ve aşınma yönüne dik olan bir hat belirlenmiştir. Çizgi boyunca belirlenen bu hat üzerindeki tepe ve çukurlar pürüzlülük değerinin belirlenmesinde esas alınmıştır.



Şekil 5.42. a) 30°, b) 60° ve c) 90°'de partikül çarpma açılarında erozyona uğrayan kaplamaların çizgisel pürüzlülük değerleri

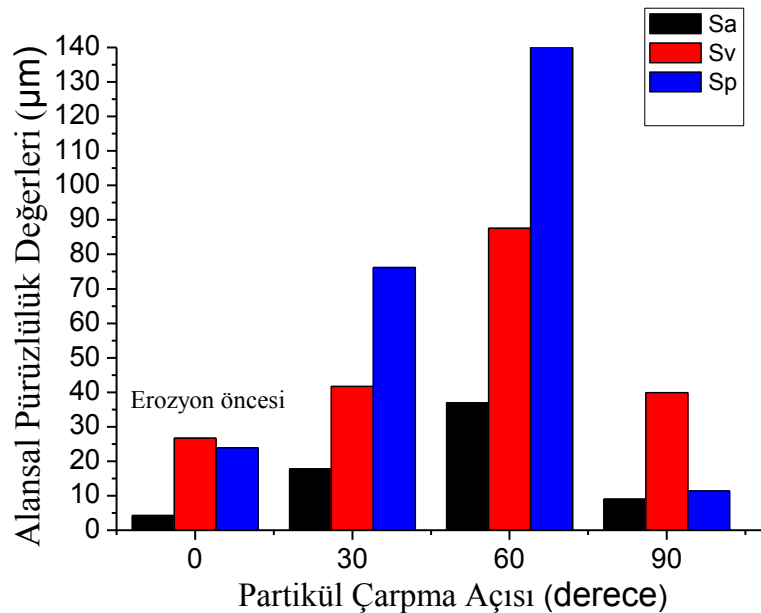
#### 5.6.4 Alansal pürüzlülük değerlerinin değişimi

Erozif aşınmaya uğrayan kaplamaların farklı partikül çarpma açılarındaki alansal pürüzlülük değerleri Şekil 5.43'te verilmiştir. Literatürde erozif aşınma davranışları incelenen çalışmalarda genellikle çizgisel pürüzlülük değerleri ile çalışıldığı görülmüştür (Wada ve ark., 1988; Telling ve ark., 1997; Wheeler ve Wood, 1999; Wei ve ark., 2006; Wheeler ve Wood, 2006; Wang ve ark., 2015a). Bu şekilde çizgisel bir hat üzerinde okunan pürüzlülük değeri gerçek pürüzlülük değerinden ciddi oranda sapma gösterebilmektedir. Çünkü çizgisel pürüzlülük malzemenin tamamını temsil etmemektedir. Alansal pürüzlülük değeri belirlenirken malzemenin erozif aşınma yüzeyinin neredeyse tamamı tarandığı için malzemenin tamamı hakkında daha kapsamlı ve doğru bir bilgiye ulaşmak mümkündür. Dolayısıyla alansal bir tarama yapılması durumunda erozif aşınmaya uğrayan malzemelerin pürüzlülüğü hakkında daha tutarlı yorum yapma imkânı sağlanmış olmaktadır. Başka bir ifadeyle yaklaşık 25 mm<sup>2</sup>'lik

alanın yani  $25 \times 10^6 \mu\text{m}^2$ 'lik alanın  $15 \mu\text{m}$ 'lik adımlarla taranmasıyla pürüzlülük değerleri belirlenmektedir. Dolayısıyla bu taranan alandan 100000'den fazla izden veri almak demektir.

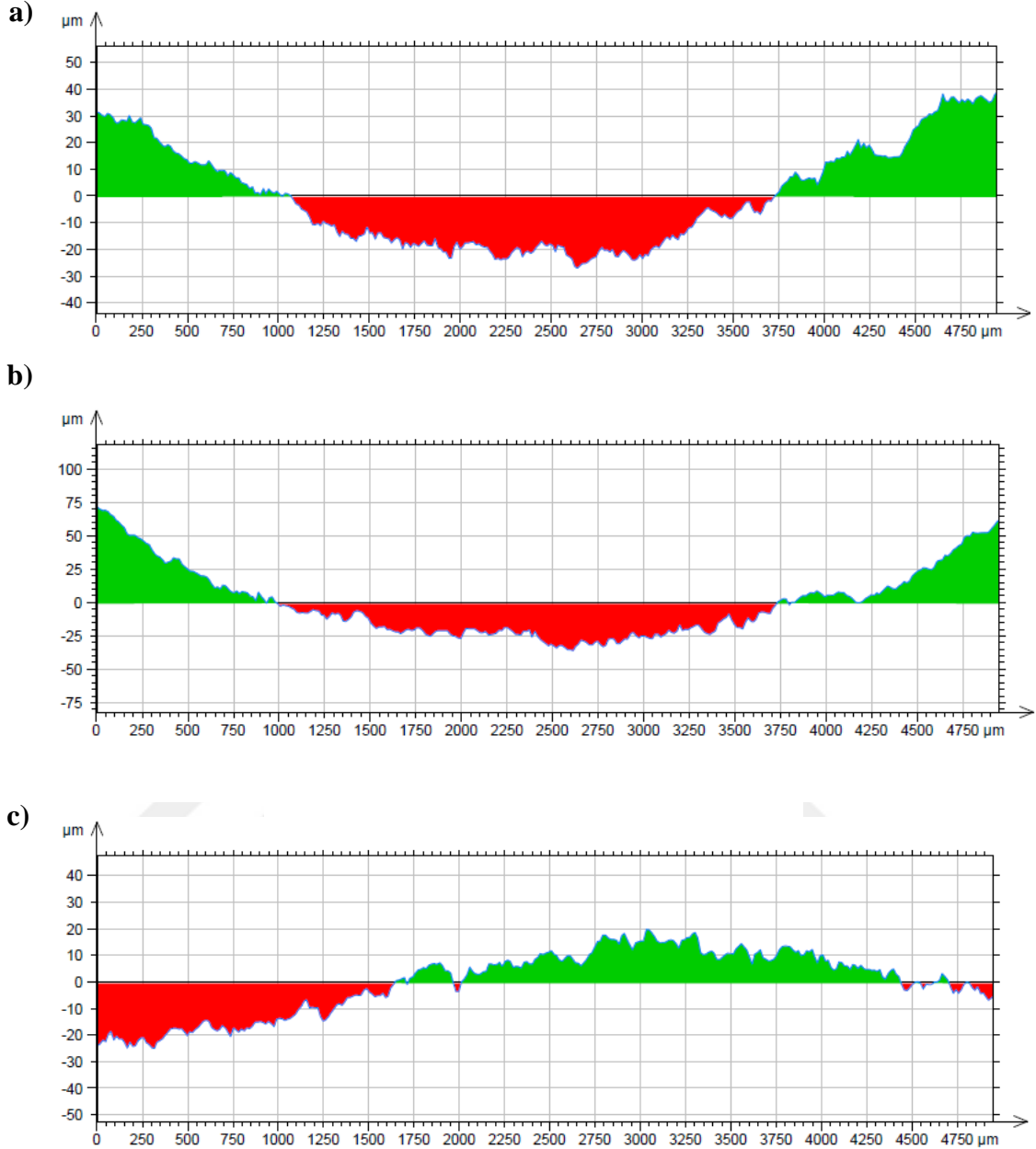
Bu tez çalışmasının özgün değerlerinden birisi de katı partikül erozif aşınmaya uğrayan kaplamaların alansal pürüzlülük değerlerinin değişiminin belirlenip ortaya konmuş olmasıdır. Bu çalışmada erozif aşınma yüzeyinin neredeyse tamamına bakılmış ve en doğru pürüzlülük değerleri belirlenmiştir.

Şekil 5.43'te görüldüğü gibi maksimum pürüzlük değeri  $60^\circ$ 'lik partikül çarpma açısıyla yapılan erozif aşınma sonucu meydana gelmiştir.  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açısı ile yapılan erozif aşınma sonucu kaplamada minimum erozif aşınmanın meydana gelmesi yanında olağanüstü bir şekilde ortalama pürüzlülük değerinin düşük olmasına rağmen çok ciddi çukurların meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebi ise, erozif aşınma sırasında  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açısı ile aşındırıcı partiküllerin yüksek enerji ile aşınma yüzeyine dik çarpmasıdır. Böylelikle aynı noktalara tekrarlı aşındırıcı partiküllerin çarpması o bölgeden aşırı bir malzeme kaybına sebep olmuş ve ciddi çukurlar meydana gelmesine sebep olmuştur. Şekil 5.43'te kaplamaların farklı partikül çarpma açılarındaki alansal pürüzlülük değerleri verilmiştir.



Şekil 5.43. Kaplamaların farklı partikül çarpma açılarındaki alansal pürüzlülük değerleri

Şekil 5.44'te a)  $30^\circ$ , b)  $60^\circ$  ve c)  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarında erozyona uğramış kaplamaların alan eğri altı pürüzlülük değerleri verilmiştir.



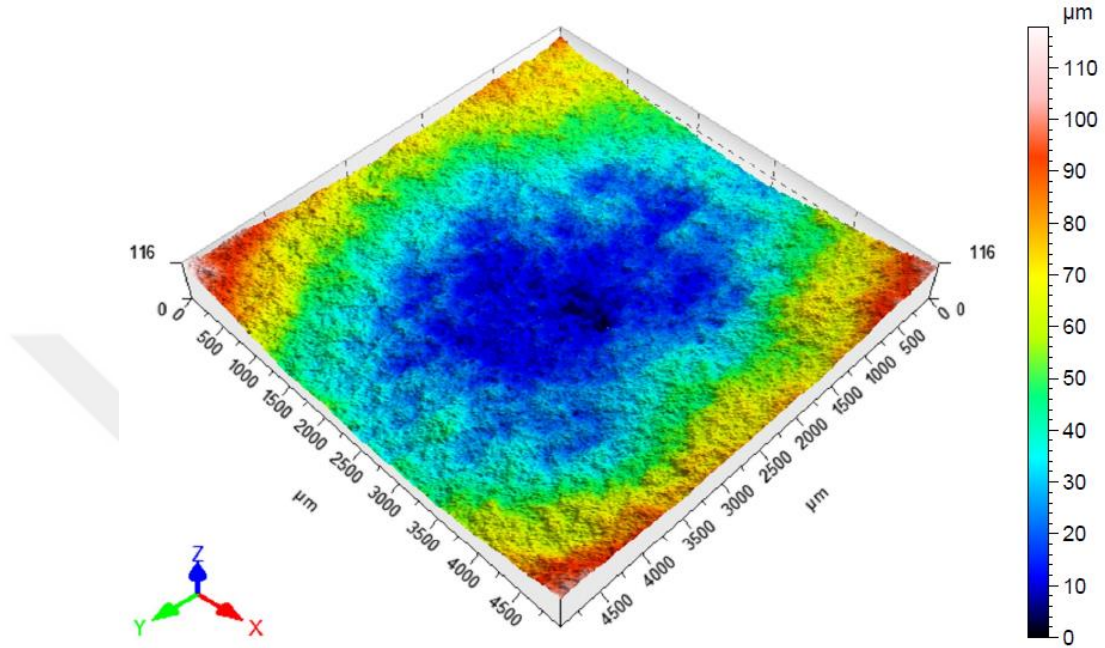
Şekil 5.44. a) 30°, b) 60° ve c) 90°'de partikül çarpma açılarında erozyona uğramış kaplamaların alan eğri altı pürüzlülük değerleri

### 5.6.5 Üç boyutlu (3B) yüzey topografyalarının değişimi

Şekil 5.45, 5.46 ve 5.47'de kaplamaların 3 boyutlu topografyalarının değişimi verilmiştir. Yüzey topografyaların yanında verilen, ayrıntılar farklı renk tonlarıyla gösterilen cetvelden erozif aşınma miktarı kolaylıkla okunabilmektedir. Bununla birlikte 3 boyutlu topografya ile erozif aşınma izini görmek mümkün olmaktadır.

Şekil 5.45'te 30°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplamanın 3 boyutlu yüzey topografyasının değişimi verilmiştir. Şekil 5.45'te verilen

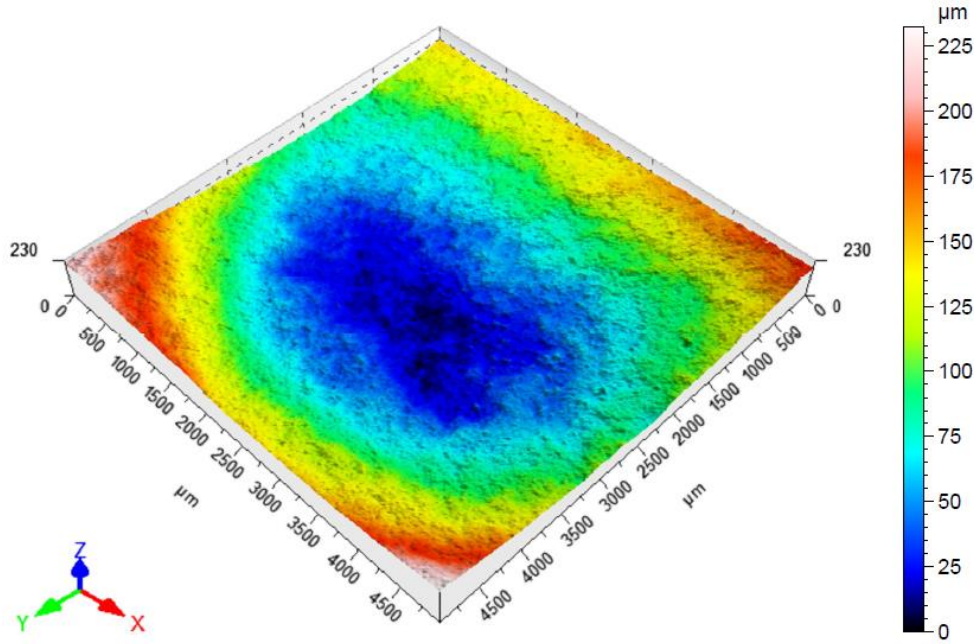
çetvelde 0  $\mu\text{m}$  aşınan kaplamanın en derin kısmını, 116  $\mu\text{m}$  ise en yüksek kısmı ifade etmektedir. Başka bir ifade ile katı partikül erozyonu ile yüzeyden 116  $\mu\text{m}$ 'lik bir derinlikte aşınma gerçekleşmiştir. Şekil 5.45'te 30°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonu y yönünde aşınmaya uğradığı görülmektedir.



Şekil 5.45. 30°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplamanın 3 boyutlu yüzey topografyasının değişimi.

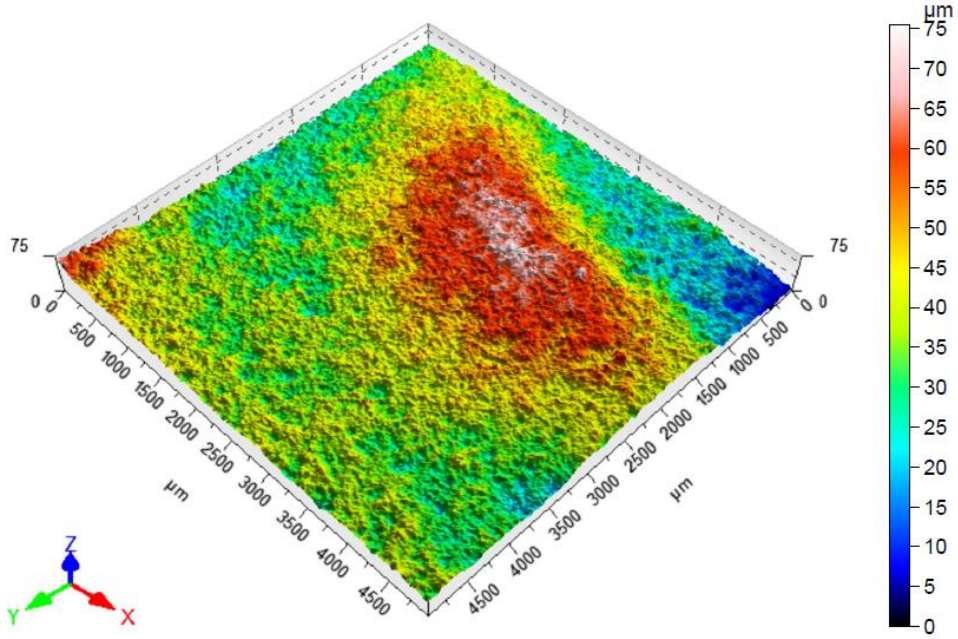
Şekil 5.46'da 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplamanın 3 boyutlu yüzey topografyasının değişimi verilmiştir. Şekil 5.46'da 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonunun y doğrultusunda gerçekleştiği görülmektedir. 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplama yaklaşık 230  $\mu\text{m}$ 'lik bir erozif aşınmaya uğramıştır. Bu 230  $\mu\text{m}$ 'lik bir erozif aşınma değeri çalışma boyunca kaplamalarda gözlenen en yüksek erozif aşınma değeridir. 3 boyutlu yüzey topografyasından elde edilen değerler daha önce bahsedilen kaplamaların erozyon oranı, çizgisel ve alansal pürüzlülük değerlerini doğrular niteliktedir. Dolayısıyla TBC'lerin yarı gevrek bir davranış sergilediği 3 boyutlu yüzey topografyası ile bir kez daha doğrulanmıştır.





Şekil 5.46. 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplamanın 3 boyutlu yüzey topografyasının değişimi.

Şekil 5.47'de 90°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplamanın 3 boyutlu yüzey topografyasının değişimi verilmiştir. Şekilden de rahatlıkla okunacağı gibi 90°'lik partikül çarpma açısı ile gerçekleştirilen katı partikül erozyonu yaklaşık 75 µm'lik bir aşınma meydana gelmiştir. Dolayısıyla bu aşınma oranıyla minimum erozif aşınmanın gerçekleştiği partikül çarpma açısı 90° olarak tespit edilmiştir. 90°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğrayan TBC'lerin 3 boyutlu yüzey topografyasında daha önce ifade edilen erozyon oranı ve pürüzlülük değerleri ile beklenen bir davranış sergilediği görülmektedir. Sonuçta 30°, 60° ve 90°'lerde katı partikül erozyonu ile erozif aşınmaya maruz bırakılan TBC'lerde elde edilen profilometre analizleri sonucu minimum değer 90°'lik katı partikül erozyonunda tespit edilmiştir. Bu sonuç bu çalışmada kullanılan TBC'lerin gevrek bir kaplama davranışı göstermediği ortaya konmuştur.



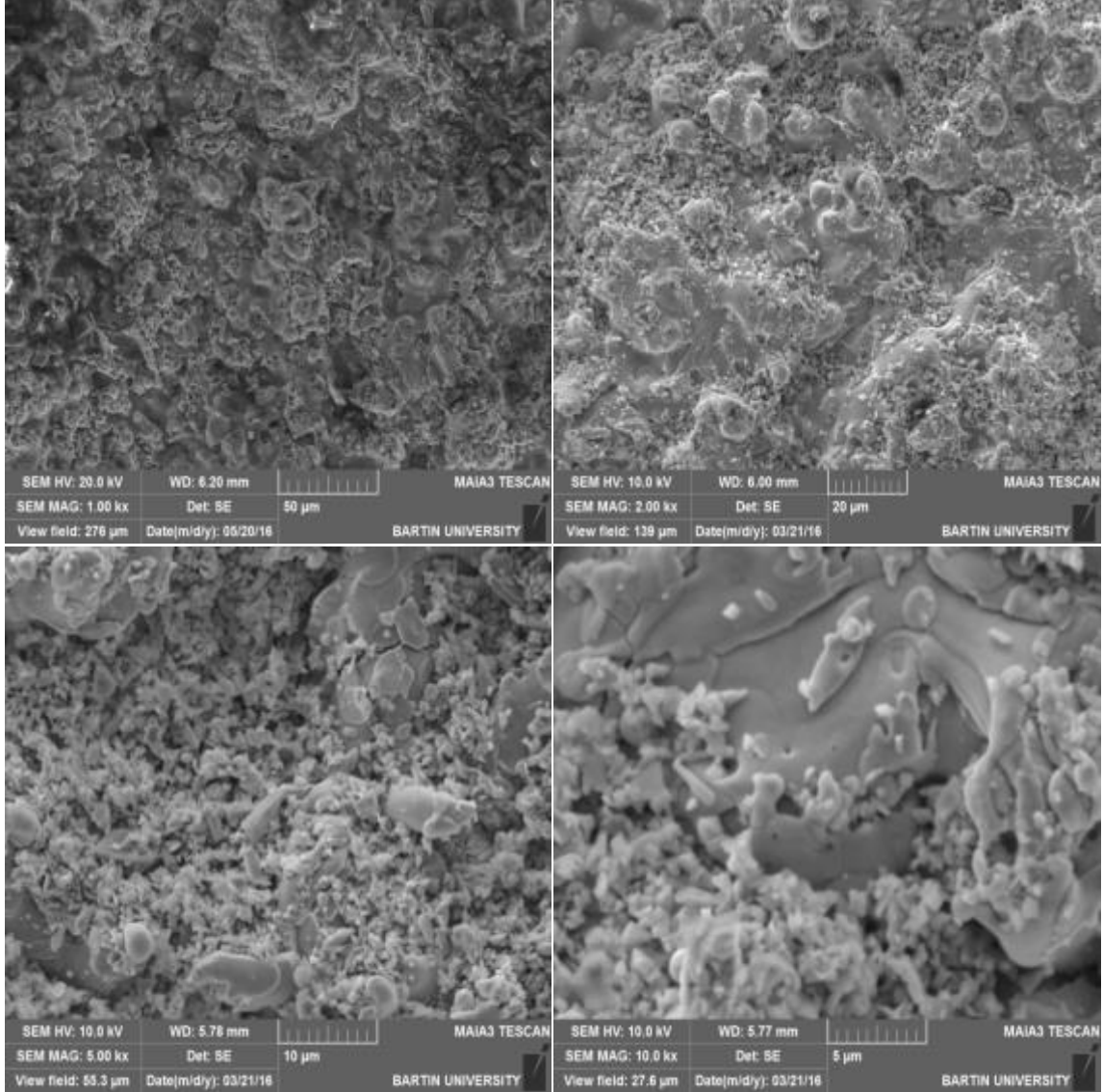
Şekil 5.47. 90°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplamanın 3 boyutlu yüzey topografyasının değişimi.

### 5.6.6 TBC'lerin katı partikül erozyonu sonrası mikroyapısal incelemeleri

Metalik ve seramik malzeme grubunda olduğu gibi kaplamalarda da erozif aşınma davranışlarının incelenmesinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) çalışmaları en önemli ayağını oluşturmaktadır. Büyük çoğunlukla literatürde erozif aşınma ile alakalı yapılan çalışmalarda aşınan yüzeylerin morfolojileri SEM ile incelenerek servis ortamında yüzeye etki eden parametrelere bağlı olarak sergiledikleri davranışlar incelenmiştir.

Erozif aşınmaya etki eden bu parametrelerden bu tez çalışmasında partikül çarpma açısının kaplamalar üzerine etkisi incelenmiştir. Dolayısıyla tez çalışmasının katı partikül erozyonu bölümünde TBC'lerin erozif aşınma sonrası sergiledikleri davranışların detaylı olarak incelenmesi amacıyla bu SEM çalışması büyük önem arz etmektedir. Aynı zamanda SEM incelemeleri, erozif aşınma sonrası kaplamalarda oluşan aşınma mekanizmalarının ve erozif aşınma parametrelerinin kaplamalar üzerine etkisinin daha net anlaşılması yönünden büyük öneme sahiptir. SEM çalışmalarında aşınmış yüzeylerin *secondary electron* (SE) ve *Back Scatter Electron* (BSE) modlarında görüntüsü alınmış, malzeme yüzeyine sapanan partiküller *enerji dağılım spektrometresi* (EDS) ile detaylı olarak incelenmiş ve literatürde yapılan çalışmalarla karşılaştırmalı bir şekilde açıklanmıştır.

Bu bölümde TBC'lerin sırasıyla; erozif aşınma öncesi, 30°, 60° ve 90°'lik çarpma açılarında erozif aşınma sonrası SEM/EDS görüntülerine yer verilmiştir. Şekil 5.48'de TBC'lerin katı partikül erozyonu testi öncesi üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.

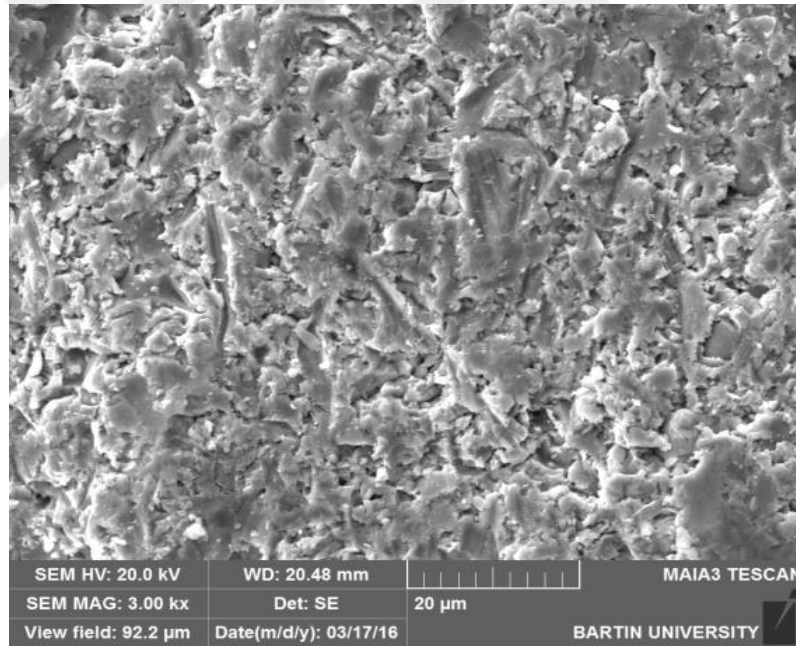


**Şekil 5.48.** TBC'lerin katı partikül erozyonu testi öncesi üst yüzey SEM görüntüsü

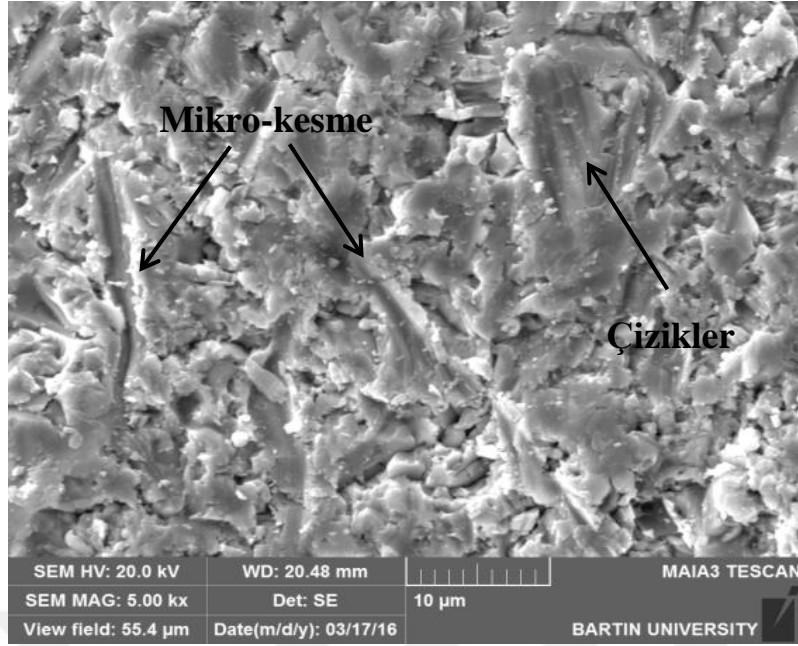
Şekil 5.48'de katı partikül erozyonu öncesi kaplama yapısının üst yüzey SEM görüntüsü incelendiğinde tipik bir termal bariyer kaplama üst yüzeyi olduğu anlaşılmaktadır. Bununla birlikte kaplama prosesinden kaynaklı yüzeyin pürüzlü olması dikkati çekmektedir. Aynı zamanda yüzey kaplama yüzeyinde mikro çatlaklar ve gözenekler mevcuttur. Katı partikül erozyonu öncesi verilen SEM görüntüsü, aşınma sonrası oluşan hasar mekanizmalarının tespiti için alınan üst yüzey SEM görüntülerinin karşılaştırılması açısından büyük önem arz etmektedir.

Malzemelerin çoğunun katı partikül erozyonu davranışının gevrek veya sünek davranış sergilemekte olduğu yönünde genel bir görüş vardır. Bu durumda ise genelde katı partikül erozyonuna uğratan malzemeler gevrek veya sünek davranış sergileyeceklerini söylemek mümkündür. Bu iki mekanizma aşındırıcı partiküllerin farklı çarpma açılarında yüzeye çarpmasıyla sergiledikleri plastik deformasyon ve erozyon oranı ile ortaya çıkmaktadır. Literatürdeki genel görüş; sünek malzemelerin yaklaşık 30°'lik çarpma açılarında ve gevrek malzemelerin ise yaklaşık 90°'lik çarpma açılarında en yüksek erozyon oranı ortaya koydukları yönündedir (Krishnamurthy ve ark., 2012). Bununla birlikte katı partikül erozyonuna uğrayan ancak tam anlamıyla gevrek veya sünek davranış sergilemeyen yani yarı gevrek diyebileceğimiz bir aşınma mekanizmasına sahip kaplama veya malzeme grubuna da rastlanabilir.

Şekil 5.49'da ve Şekil 5.50'de 30°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin SEM üst yüzey görüntüsü verilmiştir.

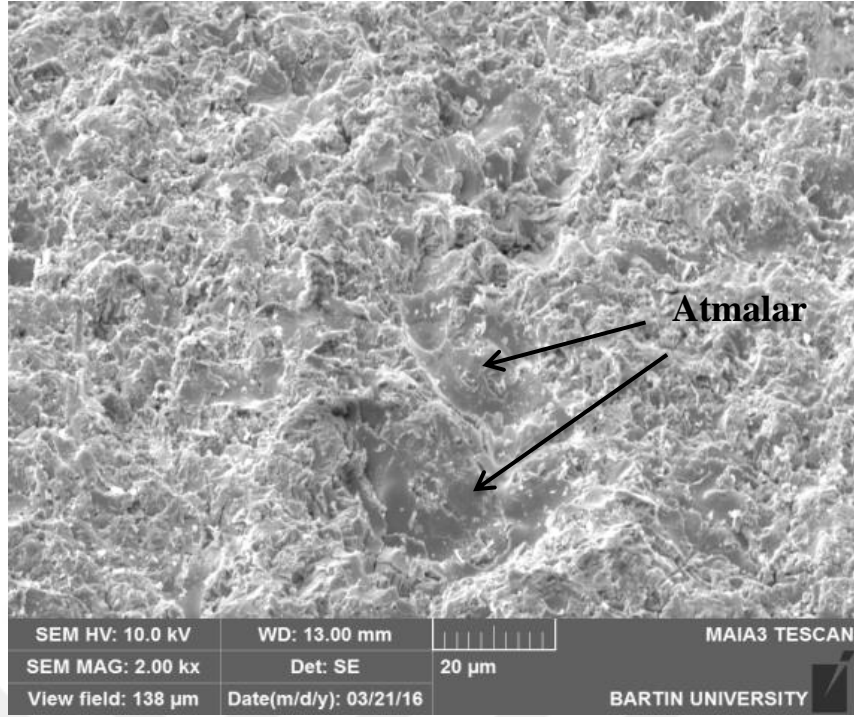


Şekil 5.49. 30°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü

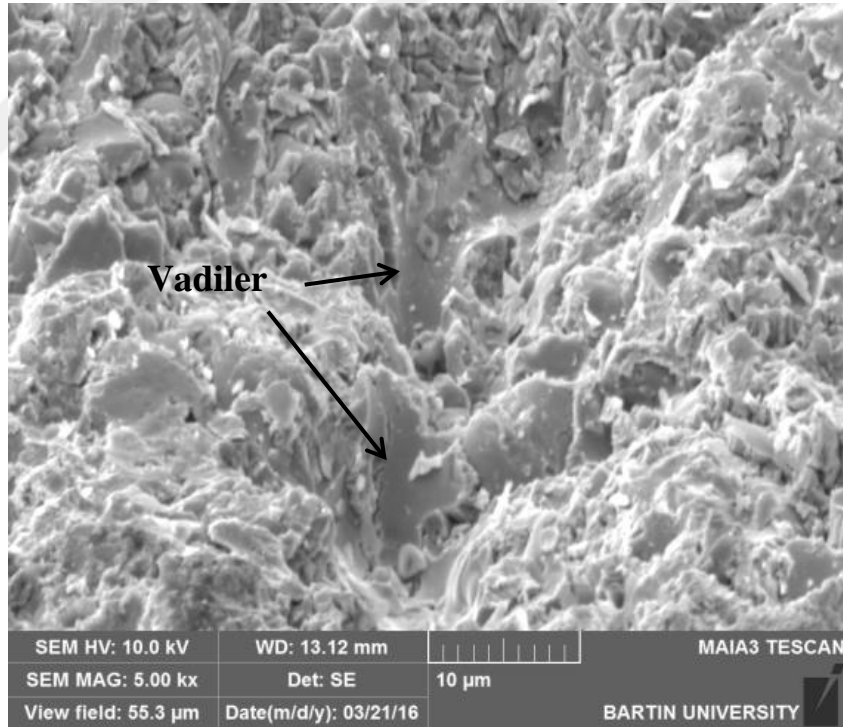


Şekil 5.50. 30°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü

Katı partikül erozyonu sonrası SEM görüntüleri incelendiğinde aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinin plastik deformasyona uğradığı açık bir şekilde gözlenmektedir. Aynı şekilde aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinde oluşturdukları *ploughing* (yatayda oluşan derin oyuk) çizgilerini yoğun bir şekilde görmek mümkündür. Şekil 5.49 ve Şekil 5.50'de görüldüğü gibi partikül çarpma yönünde aşınmanın meydana geldiği ve bu aşınmanın daha çok çizme ve kesme şeklinde oluştuğunu söylemek mümkündür. Bununla birlikte erozyon sonucunda kaplama yüzeyinde kraterler ve vadiler oluşmuştur. 3 boyutlu yüzey topografya analizi sonucunda da ortaya çıktığı gibi 30°'lik çarpma açısı ile hasara uğrayan kaplamalarda oluşan kraterler ve vadiler daha sığdır. Başka bir deyişle, kaplama yüzeyi tekrarlı aşındırıcı partiküllerin maruziyeti sonucu malzeme kaybı meydana gelmiş ve hasara uğramıştır. Ancak 60° ve 90°'lik açılarda katı partikül erozyonuna uğratılan kaplamalar ile kıyaslandığında daha az bir ağırlık kaybı söz konusudur. Bu durum daha önce de belirtildiği gibi elde edilen erozif aşınma testleri sonucu en düşük erozyon oranı ve en az ağırlık kaybına uğradığı ortaya konmuştur. Sonuç olarak; 30°'lik açıda katı partikül erozyonuna uğratılan kaplamaların en az hasara uğradığı sonucuna varılmıştır. Şekil 5.51'de ve Şekil 5.52'de 60°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



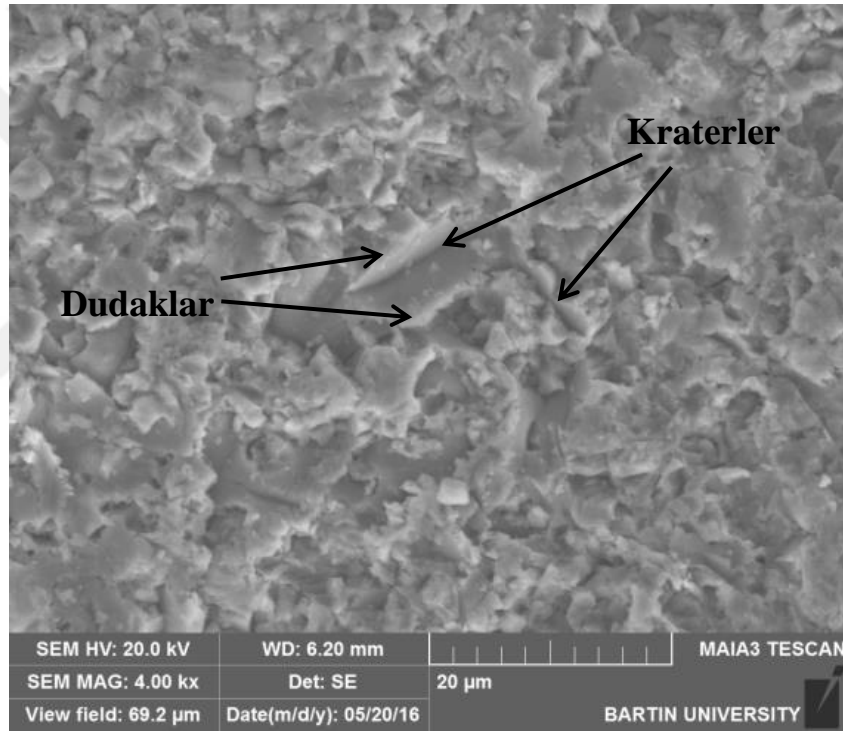
Şekil 5.51. 60°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü



Şekil 5.52. 60°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.51'de ve Şekil 5.52'de verilen SEM görüntüleri incelendiğinde 60°'lik çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamaların da aynı şekilde plastik deformasyona uğradıkları gözlenmiştir. Ancak 60°'lik çarpma açısı ile katı

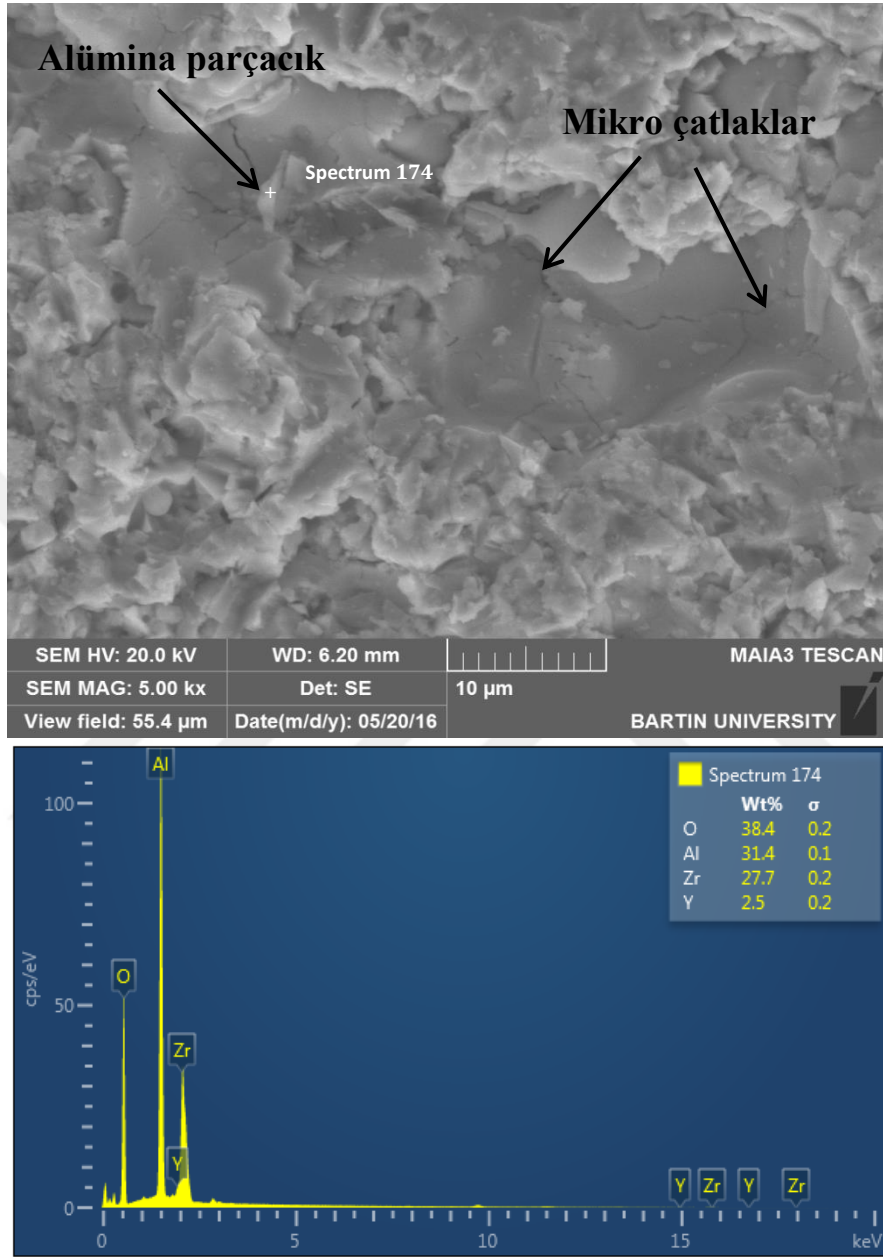
partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamalarda daha geniş ve daha derin vadiler oluşmuştur. Bu durum 60°'lik çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamalarda oluşan hasarın büyüklüğünü açık bir şekilde ortaya koymaktadır. 60°'lik çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamaların sergiledikleri kesme, çizme ve sürme şeklinde hasar mekanizmalarının yanında kaplama yüzeyinde kırılma, dökülme, atma ve kalkma şeklinde meydana gelen bir malzeme kaybı söz konusudur. Dolayısıyla bu mekanizma ile meydana gelen hasar sonucu en yüksek erozyon oranına sahip olmaktadır. Bununla birlikte kaplamadaki ağırlık kaybı da en yüksek olmuştur. Şekil 5.53'te 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.53. 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü

90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırıcı partiküllerin plastik deformasyonu sonucu kaplama yüzeyinde krater oluşumları ve kraterlerin yanlarında dudakların oluştuğu gözlenmektedir. 90°'lik partikül çarpma açılarıyla kaplama yüzeyine tekrarlı darbeler sonucu kaplama yüzeyinde oluk şeklinde oluşumlarla birlikte mikro çatlakların gözlenmesi mümkündür. Bu tip yoğun ve bölgesel plastik deformasyon mekanizması yüzeye dik ve yaklaşık 90°'lik partikül çarpma açıları ile meydana gelmektedir (Wang

ve ark., 2016b; Wen ve ark., 2016). Şekil 5.54'te 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü ve elementel analizi verilmiştir.



Şekil 5.54. 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü ve elementel analizi

Şekil 5.54'te verilen 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırılan TBC'lerin üst yüzey SEM görüntüsü ve elementel analizi neticesinde kaplama yüzeyine aşındırıcı taneciğin saplandığı ve bu saplanan taneciğin alümina olduğu tespit edilmiştir.



### 5.5. TBC'lerin Sıcak Korozyon Sonrası Mikroyapısal Davranışların İrdelenmesi

APS tekniği ile üretilen TBC sistemlerinde çoğunlukla gözenekli yapı, yüksek oksit oranı ve kaplama yüzeyinde mikro çatlaklar bulunmaktadır. TBC'lerin üretiminde kullanılan APS tekniğinin belirtilen karakteristik özellikleri, sıcak korozyon testleri sonrasında ortaya çıkan hasar mekanizmalarının oluşumunda etkin bir rol oynamıştır. TBC'ler de ki ara kesit SEM görüntüsünden elde edilen gözlemler sonucunda, APS yönteminin prosese ait üretim şartlarının bir sonucu olarak bol miktarda gözenek içerdiği görülmüştür. Gözeneklerin yanı sıra yapıda aynı zamanda oksit ve mikro-çatlakların varlığı söz konusudur. TBC'lerin üretim sonrası sıcak korozyon testleri öncesi üst yüzey SEM görüntüleri incelendiğinde mikro çatlak ve gözenekler tespit edilmiştir. Literatürde APS yöntemi ile üretilen TBC'lerde benzer yapıların gözlemlendiği rapor edilmiştir (Ajay ve ark., 2015; Wang ve ark., 2015b; Tao ve ark., 2016).

Türbin bileşenlerin yanma odalarında, yüksek oranda safsızlıklar (S, V, Na, Ca, K ve P) içeren düşük kalitedeki yakıtların kullanımının sıcak korozyon odaklı hasarları teşvik ettiği bilinmektedir. Literatür çalışmaları esas alınarak gerçekleştirilen çalışmada, üretilen kaplamaların üst yüzeyine 10 mg/cm<sup>2</sup> oranında % 50 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve % 50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> korozif tuzların serpilmesinin ardından 1150 °C'de fırın ortamında TBC'lerin korozif tuzlarla etkileşimi izlenmiş ve hasar davranışları belirlenmiştir.

Gaz türbin motorlarının çalışma koşullarında oluşumuna sıklıkla rastlanılan, korozif tuzların seçimi yapılmıştır. Aynı zamanda yapılan çalışmalarda Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> korozif tuzların yanında farklı korozif tuzların farklı bileşen oranlarında yüksek sıcaklıklarda TBC'ler üzerinde etkileşiminin incelendiği görülmüştür (Sreedhar ve Raja, 2010; Li ve ark., 2011; Bhatia ve ark., 2014; Hajizadeh-Oghaz ve ark., 2016).

Ayrıca % 50 Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve % 50 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> korozif tuz karışımının kaplama yüzeyine dağılım oranının belirlenmesinde çalışma ortamı göz önünde bulundurularak gerçeğe en yakın oran düşünülmüş ve bu oran belirlenmiştir. Çalışmalar esas alınarak 10 mg/cm<sup>2</sup> miktarı oran olarak belirlenmiştir. Literatürde yapılan çalışmalarda farklı oranların da kullanıldığı görülmüştür (Sreedhar ve Raja, 2010; Dong ve ark., 2014).

TBC'ler de ki üst kaplamanın pürüzlü bir yapı ve mikro çatlaklar içermesi korozif tuzların kaplamanın hasara uğraması yönündeki etkileşimini daha da artırmıştır. Sreedhar ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada bu düşünceyi destekler niteliktedir (Sreedhar ve Raja, 2010). Aynı zamanda yüksek sıcaklıkta, kaplama

üzerinde biriken bu korozif tuzların tekrarlı bir şekilde erime/katılaşma çevrimleri sonucu doğrudan kimyasal etkileşime sebep olmasıyla TBC bileşenlerinin bozulmasına yol açmıştır. Bu etkileşim TBC'lerin hasara uğramasını, özellikle üst seramik (YSZ) kaplamanın yarı kararlı yapısının bozunmasını, TGO ( $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) yapısının oluşumunu, metalik bağ kaplamanın ve süperalaşım altlık malzemesinin sıcak korozyonun sebep olarak hasara uğramasını hızlandırmıştır.

TBC sistemini oluşturan YSZ üst kaplamanın yüksek sıcaklıklarda göstermiş olduğu yüksek performansın temelinde ZrO<sub>2</sub>'nin 1200 °C'lere kadar tetragonal kararlı faz yapısını koruyabildiği düşünülürse, 1000 °C gibi daha düşük sıcaklıklarda uygulanan sıcak korozyon testlerinin TBC'ler üzerindeki etkisi daha net görülebilmektedir. Aynı zamanda sıcak korozyon testleri 1000 °C sıcaklıkta tutularak korozif tuzlarının ergime sıcaklıklarının üzerine çıkılmış olup tamamen ergimeleri ve kaplama ile etkileşimleri sağlanmıştır. Burada ifade edilen düşünceyi Saremi ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma doğrular niteliktedir (Saremi ve ark., 2013). Korozif tuzların öncelikli olarak YSZ'nin stabilizörü olan yitriya ile reaksiyona girerek YSZ'nin kararlı yapısını bozduğu görülmüştür. Dolayısıyla stabilizör olan yitriya yapı içerisinde tükendikçe ZrO<sub>2</sub>'nin monoklinik faz yapısına dönüşümü gerçekleşmiştir. ZrO<sub>2</sub>'nin faz yapısının tetragonaldan monoklinik faz yapısına dönüşmesi TBC'lerin ömrünü büyük ölçüde olumsuz yönde etkilemiş ve beraberinde yapıda hacimsel değişikliğine sebep olarak hasara uğramalarına sebep olmuştur. YSZ kararlı faz yapısının ve dönüşümüne ait değişimlerin sıcak korozyon testleri sürecince izlenmesi ve hasar mekanizmasının ortaya konması büyük önem arz etmektedir.

Gözenekli bir yapıya sahip APS-YSZ üst kaplama yapısı boyunca korozif eriğin nüfuz etmesinden dolayı tekrarlanan katılaşma/çözülme sonucunda termo-mekanik hasar meydana gelmektedir. Strangman ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada, nüfuziyet yoluyla oluşan termo-mekanik hasarın YSZ'nin kararlı yapısını bozan reaksiyonlardan daha önemli olduğu ileri sürülmüştür (Strangman ve ark., 2007). Ancak, kimyasal hasarın derecesi, yakıt karışımlarındaki emprüte içeriğinin bir fonksiyonu olarak önemli ölçüde değişiklik göstermektedir. Ayrıca yapılan birçok çalışmada yüksek sıcaklıklarda erimiş tuzların YSZ üst kaplamadan tamamen nüfuz ettiği görüşü hâkimdir (Guo ve ark., 2017). Erimiş tuzların metalik bağ kaplama yapısı ile etkileşimi bunun açık bir delilidir.

Ayrıca Cho ve arkadaşları ile Zamani ve arkadaşının yapmış oldukları çalışmalarda yüksek sıcaklık uygulamalarında MCrAlY tipi kaplamaların

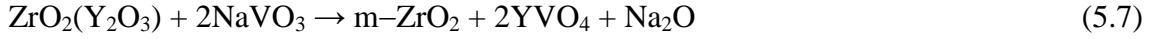
oksidasyon/sıcak korozyon direnci sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılmasına rağmen, erimiş tuzların varlığı koruyucu oksit tabakasını ( $Al_2O_3$  veya  $Cr_2O_3$ ) kolayca eritebildiği rapor edilmiştir. Bunun yanında belirtilen koruyucu tabakaların kalkmasıyla birlikte kaplamanın oksidasyona uğrayarak, kaplama bileşenlerinin tüketilmesine sebep olabildiği savunulmuştur (Cho ve ark., 2010; Zamani ve Valefi, 2017).

4'er saatlik çevrim süreçlerinde gerçekleştirilen toplam 12 çevrim sıcak korozyon testleri sonucunda üst seramik kaplama ile bağ kaplama yapısının ayrılarak hasara uğradığı görülmüştür. Mikroyapısal analizler sonrasında alınan SEM görüntülerinden üst kaplamanın bütünlüğünü ilk çevrim ile birlikte kaybetmeye başladığı anlaşılmıştır. Bu süreç en son çevrim olan 12. çevrime kadar devam etmiş ve TBC'nin bağ ve seramik kaplama ara yüzeyinden ayrılarak hasara uğradığı gözlenmiştir. Üst kaplamanın tamamen bağ kaplamadan ayrılıp atmasıyla oluşan hasarın nedeni sıcak korozyon süreci boyunca bağ ve seramik kaplama ara yüzeyinden oksijenin nüfuziyeti ve sonrasında oksidasyona uğramasıdır. Yapılan çalışmalarda da benzer şekildeki hasar oluşum mekanizması görülmekte ve oluşan TGO yapısındaki karışık oksitlerin yapı içerisinde gerilmeyi artırdığı bununla birlikte hasar oluşumunu hızlandırdığı ileri sürülmüştür (Mohan ve ark., 2007; Afrasiabi ve ark., 2008; Hajizadeh-Oghaz ve ark., 2016).

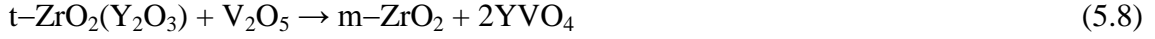
Her çevrim sonunda alınan SEM üst yüzey görüntülerinde korozyon ürünlerinin oluştuğu gözlenmiştir. Oluşan korozyon ürünlerinin çubuksu yapılarda ve düzensiz bir şekilde bilhassa kaplama yüzeyinin daha çok çukur kısımlarında çekirdeklendiği görülmüştür. Artan çevrim sayısı ile orantılı olarak oluşan korozyon ürünlerinin kaplama yüzeyine baskın olmaya başladığı ve boyutlarının büyüdüğü gözlenmiştir. Guo ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmada da artan çevrim sayısına paralel olarak korozyon ürününün de arttığı rapor edilmiştir (Guo ve ark., 2017).

XRD analizleri sonucunda oluşan korozyon ürünlerinin  $YVO_4$  olduğu tespit edilmiştir. Vanadat korozyon ürününün yanı sıra  $m-ZrO_2$  fazına rastlanılmıştır. Üst kaplama tabakasının  $Na_2SO_4$  ve  $V_2O_5$  korozif tuzları ile reaksiyona girmesi,  $YVO_4$ 'ün oluşumu ve  $t-ZrO_2$  fazının  $m-ZrO_2$  fazına dönüşmesi ve hasar oluşumlarının meydana geldiği görülmüştür. Meydana gelen reaksiyonlar aşağıdaki belirtildiği şekilde gerçekleşmektedir.

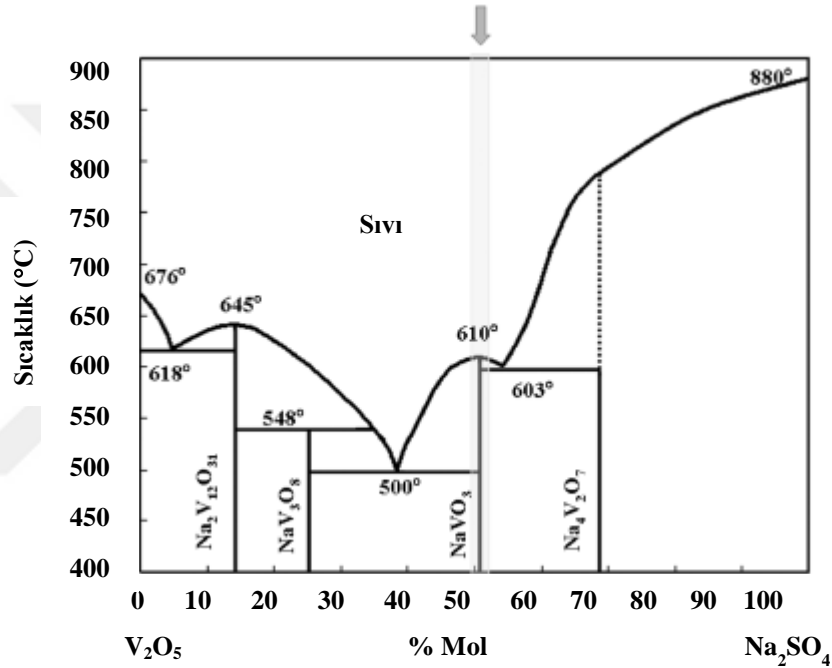




Ayrıca tetragonal zirkonya, vanadat ile tepkime sonrası yarı kararlı formunu giderek kaybetmiş ve monoklinik zirkonyaya dönüşümü gerçekleşmiştir. Oluşan tepkime ise aşağıdaki gibi ilerlemiştir.



Şekil 5.55'te  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$  sisteminin denge faz diyagramı verilmiştir.



Şekil 5.55.  $\text{Na}_2\text{SO}_4\text{-V}_2\text{O}_5$  sisteminin denge faz diyagramı (Mohan ve ark., 2007)

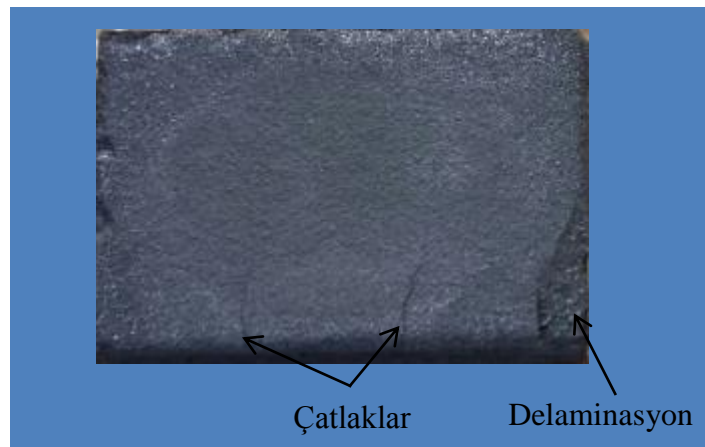
Deneysel çalışmalarda gerçekleşen reaksiyonlar literatürde yapılan çalışmalar ile karşılaştırılmış ve benzer nitelikte olduğu görülmüştür. Sıcaklığın artışı ile  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ 'ün kendisi direkt olarak YSZ üzerinde herhangi bir kimyasal reaksiyon göstermemiştir. Ancak ortamda bulunan  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  korozif tuzu ile  $\text{SO}_3(\text{g})$ , nispeten kısmi basınç altında  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ile reaksiyona girerek YSZ'nin kararlı yapısı bozulmuştur (Mohan ve ark., 2007; Ahmadi-Pidani ve ark., 2012).  $\text{ZrO}_2$ 'nin yarı kararlı forma geçmesini sağlayan  $\text{Y}_2\text{O}_3$  etkileşimin ardından  $\text{Y}_2(\text{SO}_4)_3$ 'ün oluştuğu düşünülmüştür. Bunun sonucunda, diğer eriyik çökeltiler ile birlikte  $\text{SO}_3$ 'ün varlığı bozunma mekanizmasını hızlandırmıştır.

Sıcak korozyon sürecinde korozif tuzlara direkt maruz kalan ve hasara uğrayan üst kaplamanın yanında bağ ve seramik kaplama ara yüzeyinde TGO yapısının oluşumu

da gözlenmiştir. Ayrıca TBC sistemlerinde, seramik üst kaplamanın sinterleşmesi elektriksel iletkenliğin ve elastik modülün artmasına neden olmuştur. Bu artış aynı zamanda metalik altlığın yüzey sıcaklığının artmasına da sebep olmuştur. Yüzey sıcaklığının artması, metalik bağ kaplamanın oksidasyon ve sürünme mekanizmalarının ilerlemesini beraberinde getirmiştir. Dolayısıyla hacim değişikliği ile birlikte üst kaplama ve TGO ara yüzeyinde oluşan gerilmelerin ilerlemesi sonucunda kaplama kenar kısımlarından itibaren dökülmeler meydana gelmiştir.

TBC sistemlerinde, TGO ve bağ kaplama tabakaları arasında termal genişleme uyumsuzluğundan kaynaklı gerilmeler meydana gelmektedir. Bunun yanında bağ ve seramik üst kaplama (YSZ) ara yüzeyindeki TGO tabakasının ilerlemesi ve bağ kaplamanın oksidasyonu TGO ile bağ kaplamanın ara yüzeyindeki gerilmelerin ortaya çıkmasına sebep olmuştur. Diğer yandan TGO bağ kaplama bileşimde yer alan alüminyumun tükenmesi spinel  $[(Ni,Co)(Al_2Cr)_2O_4]$  gibi istenmeyen oksit yapılarının oluşumlarına neden olmuştur.

TBC'lerde sıcak korozyon çevrim süreçleri devam ederken çatlakların çekirdeklenerek oluştuğu ve çatlakların birleşerek ilerlediği gözlenmiştir. Çatlak ilerlemesi ve yayılması aşamasında; ilk önce küçük çatlaklar ve ayrılmalar TGO tabakasında ya da ara yüzeye yakın bölgelerde meydana gelmiştir. İkinci olarak çekirdeklenmeler meydana gelmiş bunu takiben küçük çatlaklar genişlemiş ve birleşmiştir. Geline bu aşamada, kaplama sistemi işlevini görmeye devam etmektedir. Şekil 5.56'da 12 çevrim sıcak korozyon testi sonrası TBC sisteminin üst yüzey makro görüntüsü verilmiştir.



Şekil 5.56. 12 çevrim sıcak korozyon testi sonrası TBC sistemine ait üst yüzey makro görüntüsü

Ancak oluşan bölgesel hasarlar ile birlikte, bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde delaminasyonlar (katman şeklinde ayrılma) meydana gelmiştir. Belirtilen hasar ve delaminasyonların beraberlerinde daha geniş dağılmalara ve kenar delaminasyonlarına sebebiyet verdiği gözlenmiştir.

Bağ kaplama yapısı yüksek sıcaklığın etkisiyle sürünme odaklı hasara maruz kalmaktadır. Bu durum metalik bağ/seramik üst kaplama ara yüzey bütünlüğünün bozulmasına sebebiyet vermiş ve bunun sonucu olarak ise delaminasyon ve çatlakların oluşumu meydana gelmiştir.

APS tekniği ile üretilen TBC'ler, üretim prosesinin bir fonksiyonu olarak diğer termal sprej yöntemleriyle üretilen TBC'lerden mikroyapı, morfoloji ve termo-fiziksel özellikler açısından farklılık göstermektedir. Bu sebepten dolayı sıcak korozyon hasarı gibi maruz kalınan çevresel koşulların oluşum mekanizmaları da farklı olacaktır.

YSZ üst seramik kaplamada oluşan çatlakların alt katmanlara paralel olarak ilerlediği gözlenmiştir. Bu hasar mekanizması oksijenin çatlaklardan nüfuzuyla üst kaplamanın atması şeklinde kendini göstermiş ve hasara uğramıştır. Yapılan çalışmalarda TBC'ler de sıcak korozyon odaklı bir başka hasarda çatlakların oluşumu ile oksijenin alt katmanlara nüfuziyetinin arttığı ve hasar oluşumunu hızlandırdığı savunulmuştur (Chen ve ark., 2011; Keyvani ve ark., 2011).

Sıcak korozyon çevrimleri süresince soğuma esnasında metalik bağ ve seramik üst kaplama arasındaki termal genişleme uyumsuzluğu gerilmelerin ortaya çıkmasına sebebiyet vermektedir. YSZ üst kaplama yapısının sinterleşmesi ile birlikte oluşan gerilmelerin artışı tetiklemiştir. Yapılan çalışmalarda APS yöntemiyle üretilen TBC'lerin bağ kaplama ile üst kaplama ara yüzey pürüzlülüğünün, üst kaplama ile TGO ara yüzeyinde gerilmelerin oluşması ve ilerlemesinde önemli rol oynadığı rapor edilmiştir. Söz konusu bölgelerdeki yükseltilerde çekme gerilmesi ve çukurlarda ise basma gerilmesi oluşumlarının termo-mekanik hasar oluşumunu tetikleyerek YSZ-TGO ara yüzeyinde çatlak oluşumuna sebebiyet verdiği rapor edilmiştir (Huang ve ark., 2011; Hajizadeh-Oghaz ve ark., 2016).

## 5.6. TBC'lerin Termal Çevrim Testi Sonrası Mikroyapısal Değişim, TGO Oluşum ve Büyüme Davranışlarının İrdelenmesi

Termal çevrim çalışmalarında kullanılan TBC'lerin bağ ve seramik üst kaplamaları APS yöntemi ile üretilmiştir. Literatürdeki güncel çalışmalarda TBC sistemlerinin bağ kaplamalarının üretilmesinde HVOF ve CGDS gibi farklı kaplama tekniklerinin de kullanıldığı rapor edilmiştir (Kovarık ve ark., 2015; Tang ve ark., 2016). TBC'lerin termal çevrim şartları altında TGO oluşum ve büyüme davranışlarının üretilen TBC sistemlerinin termal çevrim ömrünün belirlenmesinde etkin rol oynadığı görülmüştür.

Termal çevrim testleri öncesi TBC'lerden alınan ara yüzey kesit görüntüsünden APS ile üretilen TBC'lerde porozite ve oksit içeriğinin oldukça fazla olduğu gözlemlenmiştir. Literatürde yapılan benzer çalışmalarda bu durumu doğrular niteliktedir (Richer ve ark., 2010; Bai ve ark., 2014; Zhe, 2013).

APS ile üretilen TBC'lerin, literatürde yer alan HVOF ve CGDS teknikleriyle üretilen TBC'ler ile kıyaslandığında daha yüksek oksit ve porozite içeriğine sahip bir kaplama yapısına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum kullanılan proses ve parametrelerinin kaplama mikroyapısı üzerinde etkin rol oynadığının açık bir delilidir. (Bkz. Tablo 4.5) Özellikle prosesin atmosfere açık olarak uygulanması ve kaplama birikiminin splatlar şeklinde olması sonucunda, APS ile üretilen TBC'lerin karakteristik mikro yapısal özellikleri ortaya çıkmıştır (Karaoglanli ve ark., 2014; Gao ve ark., 2015; Kovarik ve ark., 2015; Schmitt ve ark., 2015; Wang ve ark., 2016a; Wu ve ark., 2016).

Yüksek çalışma sıcaklıklarında, TBC'lerin termal çevrim ömrünü kaplama yapısının oksit içeriğinin fazla olması, ara yüzeydeki gerilmeler ve sonucunda oluşan termo-mekanik odaklı hasarların oluşması birinci derecede etkilemektedir. APS ile üretilen TBC'lerde oksit kusurları gerilme bölgelerinin oluşumuna sebep olmuştur. Bu durum termal çevrimle birlikte kaplamada çatlaklara yol açmıştır. Çatlaklar termal çevrim ilerledikçe birleşerek ayrılmalara ve pullanarak kalkmalara neden olmuştur. TBC'lerde TGO oluşumuna dolayısıyla hasar oluşumuna sebep olan termo-mekanik odaklı hasarların oluşumunda ise, ısıl durum ön plana çıkmaktadır. Termal çevrimlere maruz kalan TBC'lerde özellikle de ara yüzey TGO yapısında soğuma esnasında büzülme meydana gelmiştir. Dolayısıyla TGO tabakasının kalınlığı kritik sınıra erişmeden hasara uğramaktadır. Literatürde yer alan ve APS tekniği ile üretilen TBC'lere nispeten daha az porozite ile oksit içeriğine sahip olan HVOF ve CGDS

teknikleri ile üretilen TBC'lerin daha uzun çevrim süreçlerinde hasara uğradığı görülmüştür (Karaoglanli ve ark., 2014; Yuan ve ark., 2017). Buradan hareketle kaplama yapısında porozite ve oksit gibi kusurların varlığının TBC'lerin çevrim ömrü üzerinde negatif bir etkiye sebep olduğu sonucu çıkarılmaktadır.

TBC'lerde termal çevrim süresince oksijenin penetrasyonu sonucu oluşan oksidasyon ile bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde TGO tabakasının oluştuğu görülmüştür. Literatürde bulunan benzer çalışmalarda bu durum rapor edilmiştir (Zang ve ark., 2012; Dong ve ark., 2015; Kovarik ve ark., 2015;. Wu ve ark., 2016; Wang ve ark., 2016). Termal çevrim sırasında oksidasyon sonucu bağ ve üst kaplama ara yüzeyinde oluşan TGO yapısının başlangıçta üniform bir özellik gösterdiği ancak oksijenin penetrasyonunun devam etmesiyle yapı içindeki alüminyum konsantrasyonun azalması sonucu karışık oksit tabakasının oluştuğu ve TGO yapısının bu üniform özelliğini yitirdiği görülmüştür. Dolayısıyla termal çevrim sonrasında oluşan TGO yapısının başlangıç ve sonrasındaki üniform olmayan içeriğinden bahsetmek mümkündür.

Literatürde yeralan çalışmalarda kullanılan SEM/EDS mikroyapısal karakterizasyon analizleri sonucunda TGO yapısının oluşum mekanizmaları ortaya konmaktadır. Genel olarak TGO yapısındaki oksit içeriklerinin koyu siyah ve açık siyah olmak üzere iki farklı renkte oluşum gözlemlendiği rapor edilmiştir (Sun ve ark., 2010; Gao ve ark., 2015). EDS analizlerine göre; oluşan bu oksit tabakalarından koyu siyah renkli olan kısım ağırlıklı olarak  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> iken, açık siyah (gri) renkte olan kısımlar ise; Ni(Al,Cr)<sub>2</sub>O<sub>4</sub> (spinel) ve NiO gibi karışık oksit oluşumlarıdır. Ayrıca bu karışık oksit oluşumlarında, metalik bağ/seramik üst kaplama (YSZ) ara yüzeyinde bulunan Cr, Ni, Al ve O gibi elementler yer almaktadır (Gao ve ark., 2015). Oksidasyonun ilk süreçlerinde TGO yapısının ağırlıklı olarak  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> formunda meydana geldiği gözlenirken TGO'nun üst seramik kaplamaya yakın bölgelerinde ise zamanla açık gri renkte karışık oksit oluşumların oluştuğu görülmüştür. TBC'lerin termal çevrim öncesi ile termal çevrim sonrası bağ/üst kaplama ara yüzeyini mikroyapısal olarak karşılaştırılırsa; termal çevrim öncesi bağ kaplama (CoNiCrAlY) tabakasında alüminyum konsantrasyonunun bağ kaplamanın bütününde üniform olarak yer aldığı görülmüştür. Buna karşın termal çevrim sonrasında oksidasyon reaksiyonları sonrasında alüminyumun kaplama içerisindeki bu dağılımını kaybettiği görülmüştür (Bkz. Şekil 5.3 ve 5.37 ). Yapılan benzer çalışmalarda da aynı durum ifade edilmiştir (Fan ve ark.,



2017; Yuan ve ark., 2017). CoNiCrAlY bağ ve YSZ üst kaplama ara yüzeyinde bulunan  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tabakası kararlı ve genelde üniform bir yapı teşkil ettiği görülmüştür.

Üst seramik kaplama tabakasında çatlak ve süresiz açıklıkların bulunduğu görülmektedir. Dolayısıyla bu çatlakların ilerlemesinin süresiz boşluklara bağlı olarak gelişmekte olduğu gözlemlenmiştir. Burada ifade edilen TGO yapısına ait benzer durum, yapılan farklı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Xu ve ark., 2015; Yu ve Cen, 2017).

TGO yapısının oluşumu oksijenin kaplamaya nüfuzu ile birlikte alüminyumun oksijene olan yüksek ilgisinden dolayı bağ kaplamadan ara yüzeye difüzyonu sonucu meydana gelmiştir. Dolayısıyla TBC sistemlerinde yüksek sıcaklıklarda ısınma-soğuma rejimi ile gerçekleşen termal çevrim sonrası işletme ömrünü tamamlamasında en önemli etmenlerden birisi de TGO yapısının oluşumu ve TGO odaklı hasarlardır. TBC'lerin termal çevrim sürecindeki dayanımını etkileyen faktörlerden biri olarak TGO yapısının oluşumu ve büyüme hızının belirlediği düşünülmektedir. Yapılan benzer çalışmalarda da benzer mekanizmalar görülmektedir (Guo ve ark., 2014; Lu ve ark., 2014).

TGO yapısında oluşan karışık oksitlerin yapı ve farklılıklarını (üniform ve üniform olmayan oksit yapıları), oksijenin bağ/üst kaplama ara yüzeyine nüfuziyeti ile meydana gelen oksidasyon reaksiyonları (TGO'nun büyümesi) sonucu bağ kaplamada alüminyumun tükenmesine bağlamak mümkündür. Literatürde yapılan çalışmalarda çatlak oluşumunun temelinde TGO'nun büyüme sırasında ortaya çıkan gerilmelerin varlığı ve değişimleri rapor edilmiştir (Mahade ve ark., 2016). Splatlar şeklinde biriken üst kaplamada bulunan splatlar arası boşluklar bağ kaplamanın oksidasyona uğramasına ve ara yüzey gerilmelerinin artmasına sebep olmuştur. Karışık oksit yapılarının hızlı bir şekilde büyümesi hacimsel değişimleri de beraberinde getirmiştir. Bunun neticesinde TBC sistemlerinde ara yüzeye uygulanan gerilmelerde artış meydana gelmiştir. Termal çevrimin ilerlemesiyle oluşan gerilmeler belli bir seviyeye ulaşarak kaplamada kalkmaların ve ayrılmaların meydana gelmesine sebep olmuştur. Literatürde yer alan benzer çalışmalarda da benzer durum rapor edilmiştir (Estarki ve ark., 2014; Dong ve ark., 2015; Zhou ve ark., 2017).

APS kaplamalarda görülen spineller, lokal olarak yer almakta ve çok hızlı hacim artışına sebep olmakla birlikte yapı olarak gözenekli ve kırılgeçirirler. YSZ ve TGO oksit tabakası ara yüzeyinde yapışma mukavemetini zayıflatarak çatlakların oluşumuna sebep olurlar. Bununla birlikte TGO ile üst kaplama ara yüzeyinde termal genleşme

uyumsuzluğundan kaynaklı olarak soğuma sırasında kaplama ara yüzeyi boyunca ilerleyen çatlakları meydana getirmiştir. Bu durum servis koşulları sırasında termal çevrim süresince TBC'lerde tekrarlı bölgesel kalkmalar ve atmalar sonucu daha büyük hasar oluşumlarını beraberinde getirmektedir.

Diğer bir unsur,  $Al_2O_3$ 'nin farklı yapılarda (dalgalı/üniform) büyümesiyle, spinel ve/veya karışık oksit tabakasının hızlı büyümesi sonucunda oluşan TGO yapısında istenmeyen gerilmelere ve beraberinde çatlak oluşumlarına rastlanmaktadır. Çatlakların oluşumunda, itici güç olan ara yüzey gerilmeleri, kaplama ara yüzeyinin pürüzlü olmasından dolayı yüzeye dik olan oksit tabakaların uç kısmında yoğunlaşarak hasarların neticelenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Şekil 5.36'da APS-TBC sistemi 40 saatlik termal çevrim testi sonrasında seramik üst kaplamanın bağ kaplama yüzeyinden ayrılmalar ve dökülmeler meydana gelmiş ve hasara uğradığı görülmüştür. TBC'lerin termal çevrim testleri sonrasında mikroyapısal incelemeler gerçekleştirilmiş, TBC bağ ve seramik kaplama ara yüzeyinde meydana gelen değişimler gözlenmiştir. Şekil 5.37'de gerçekleştirilen termal çevrim testleri sonrasında TGO yapısının bağ ve seramik ara yüzeyi boyunca oluştuğu görülmüştür.

TBC'lerin termal çevrim testleri öncesi ve termal çevrim testleri sonrası üst yüzey SEM görüntüleri karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak; başlangıçta seramik üst kaplama mikroyapısının porozite ve mikro çatlak benzeri oluşumlar içerdiği gözlenmiştir. Buna karşın termal çevrim testleri sonrasında ise üst kaplamada sinterleşme etkisiyle mikro çatlaklar kapanmış ve porozite oranı düşmüştür. Bununla birlikte oluşan iç gerilmelerinin de etkisiyle üst kaplamada yeni çatlak oluşumları gözlenmiştir. Yapılan çalışmalarda da bu düşünceleri doğrular yönde veriler rapor edilmiştir (Lv ve ark., 2017). Ayrıca yapılan gözlemlerde, APS-TBC'lerin sinterleşme prosesi süresince en önemli oluşan mikroyapısal değişimlerinin splatlar arasındaki boyun oluşumu olduğu rapor edilmiştir. Bununla birlikte sinterleşme sonucu oluşan boyunun splattan splata olan ısı akışını hızlandırdığı ve böylece termal iletkenliği artırdığı ifade edilmiştir. Bu iki temel etkinin yanı sıra, sinterleşme boyununun oluşumu, çatlak yüzeylerine köprü kurarak ve daha fazla temas yeri oluşturarak mikroyapı geometrisini değiştirdiği rapor edilmiştir. Sinterleşme prosesinin ilerleyen süreçlerinde splatların kaymasının daha ince çatlakların kapanmasına sebep olmasına rağmen daha büyük çatlakların yayılmasını teşvik ettiği yönünde de bilgiler rapor edilmiştir (Lv ve ark., 2017).

Termal çevrim esnasında oluşan TGO yapısında oluşan oksit tabakasının büyümesi ve gerilmelerin artması hasar oluşumunu artırmaktadır. Bununla birlikte TGO yapısı oluşurken ısı çevrimlerin etkisiyle genişleme ve büzölmelere maruz kalmaktadır. Diğer bir ifadeyle TGO yapısının yüksek sıcaklıklarda uzaması ve soğuma rejiminde ise basma gerilmesi ile ilk haline gelme eğilimi söz konusudur. Ancak ısı genişleme katsayısındaki farklılıklardan dolayı bu oluşan gerilmeyi TGO yapısı bünyesinden istenen ölçüde uzaklaştırılmamaktadır. Sonuç olarak TGO'nun uzaması yapı içindeki gerilmenin sönümüne sebebiyet vermekte ve ara yüzey orjinli hasarlar meydana gelmektedir.

### **5.7. TBC'lerin Katı Partikül Erozyonu Testleri Sonrası Eroziyon Aşınma Davranışlarının İrdelenmesi**

Malzeme grupların birçoğunun eroziyon aşınma sonucu gevrek veya sünek davranış sergilemekte olduğu yönünde genel bir görüş vardır. Bu durumda ise genelde katı partikül erozyonuna uğrayan malzemelerin gevrek veya sünek davranış sergileyecekleri anlamına gelir. Malzemelerin sergiledikleri bu iki durum, aşındırıcı partiküllerin farklı çarpma açılarında yüzeye çarpmasıyla sergiledikleri plastik deformasyon ve erozyon oranının değişimi olarak ortaya çıkmaktadır. Literatürdeki genel görüş; sünek malzemelerin yaklaşık 30°'lik partikül çarpma açılarında ve gevrek malzemelerin ise yaklaşık 90°'lik partikül çarpma açılarında en yüksek erozyon oranına sahip oldukları yönündedir (Krishnamurthy ve ark., 2012; Fang ve ark., 2015; Naveed ve ark., 2015). APS tekniği ile üretilen TBC'lerin katı partikül erozyonu sonucunda elde edilen analiz sonuçlarına göre yarı gevrek bir davranış sergiledikleri görölmüştür.

Literatürde kaplamaların eroziyon aşınma davranışlarının incelenmesine ilişkin partikül çarpma açısının etkisi birçok çalışmada incelenmiştir. Bununla birlikte 30°, 45°, 60° ve 90°'lik farklı partikül çarpma açılarında eroziyon aşınma oranlarının değişimi kademeli olarak test edildiği gözlemlenmiştir (Amirthan ve ark., 2010; Cernuschi ve ark., 2011; Imrek ve ark., 2011). Buradan hareketle tez çalışmasında TBC'ler 30°, 60° ve 90°'lik partikül çarpma açılarında katı partikül erozyonuna uğratılmış ve TBC'lerin farklı miktarlarda ağırlık kaybına uğradığı görölmüştür. Dolayısıyla TBC'lerin aşındırıcı partiküllerin farklı partikül çarpma açılarında maruziyeti sonucunda her bir farklı partikül çarpma açılarında farklı aşınma davranışı sergilemiştir.

En yüksek erozyon oranı  $60^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarındaki gerçeşleşirken en düşük erozyon oranı ise  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarındaki gerçeşleşmiştir. Başka bir değişle en yüksek aşınma miktarı  $60^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarındaki gerçeşleşmiştir. TBC'ler üzerinde yapılan başka çalışmaları, burada ortaya çıkan sonuçları destekler niteliktedir. (Amirthan ve ark., 2010; Ramesh ve ark., 2010; Krishnamurthy ve ark., 2012).

Krishnamurthy ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada, aşındırıcı partiküllerin katı partikül erozyonu  $15^\circ$ ,  $45^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarındaki gerçeşleştirilmiştir. Sonuçta en fazla erozyon oranının  $45^\circ$ 'lik çarpma açısında gerçeşleştiği ortaya konulmuştur. Dolayısıyla kaplamanın gevrek ile sünek arasında yarı gevrek bir davranış sergilediği ifade edilmiştir (Krishnamurthy ve ark., 2012). Krishnamurthy ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışma ile bu çalışmadaki TBC'lerin katı partikül erozyonu davranışları kıyaslandığında her iki çalışmadaki kaplamaların benzer mekanizmada aşınma sergilediği söylenebilir.

Bu çalışmada elde edilen erozyon oranı sonucunun aksine Cernuschi ve arkadaşlarının yapmış olduğu bir çalışmada TBC'lerin katı partikül erozyonu sonucunda en yüksek erozyon oranının  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açısında gerçeşleştiği rapor edilmiştir (Cernuschi ve ark., 2016). Ramesh ve arkadaşlarının yapmış olduğu çalışmada ise, üretilen TBC'lerin katı partikül erozyonu testlerini gerçeşleştirmişlerdir.  $30^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarındaki gerçeşleştirilen testler sonucunda en fazla erozyon oranının  $90^\circ$ 'lik çarpma açısında gerçeşleştiği ortaya konmuştur (Ramesh ve ark., 2010). Hem literatürde yer alan çalışmalarda hem de bu çalışmada ortaya konan erozyon oranındaki bu farklılığı katı partikül erozyonu TBC'lerin sergilemiş oldukları plastik deformasyon ile açıklamak mümkündür.

Kaplama yüzeyine aşındırıcı parçacığın farklı açılarda çarpması sonucu partikül çarpma açısının bir fonksiyonu olarak kaplamalar farklı aşınma mekanizmaları sergilemektedir. Şöyle ki; TBC'lerin  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açısı ile tekrarlı maruziyeti sonunda kaplama yüzeyinde çatlamlar meydana gelmiştir. Bununla birlikte kaplamada daha düşük miktarda malzeme kaybına meydana gelmiştir. Bunun aksine  $60^\circ$  ve  $30^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarındaki ise kaplama yüzeyinde vadiler ve oyuklar oluşmuş bunun sonucunda ise daha yüksek miktarda malzeme kaybı gerçeşleştiği görülmüştür.

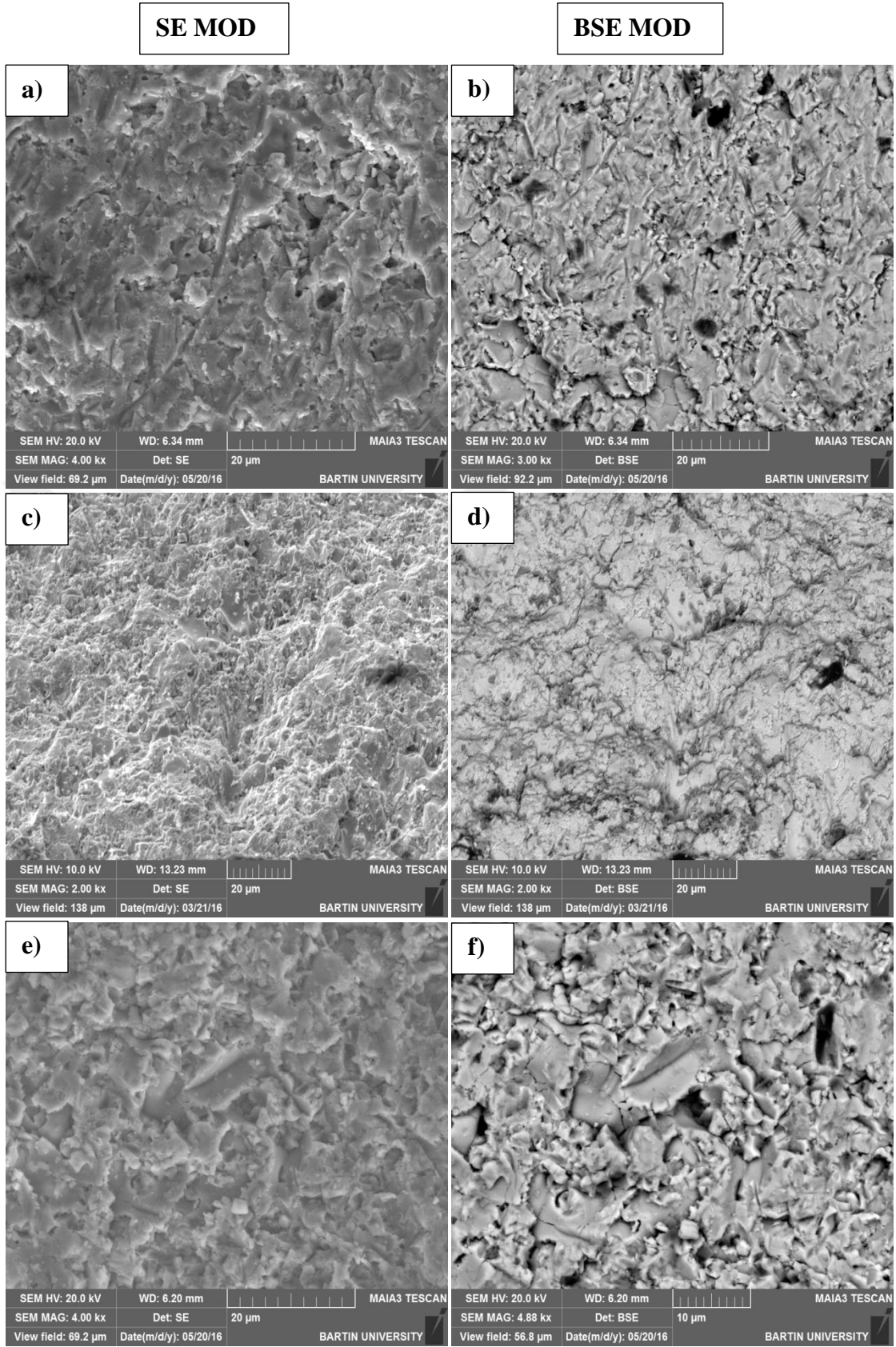
Kaplamaların katı partikül erozyonu davranışları incelenen çalışmalarda genellikle çizgisel pürüzlük değerlerinin dikkate alındığı görülmektedir (Wada ve ark., 1988; Telling ve ark., 1997; Wheeler ve Wood, 1999; Wei ve ark., 2006; Wheeler ve

Wood, 2006; Wang ve ark., 2015a). Bu doğrultuda TBC'lerin çizgisel pürüzlülük testleri elde edilmiştir. Kaplamaların maksimum yükseltilerine (Rp) erozyon öncesi kaplamada tespit edilmiştir. Bunu sırasıyla 60°, 30° ve 90°'lik partikül çarpma açılarıyla aşınmaya uğrayan kaplamalar izlemiştir. Minimum çukur (Rv) ise aynı şekilde aşınmaya uğramamış kaplamada olduğu ve bunu sırasıyla 60°, 90° ve 30°'lik partikül çarpma açılarıyla aşınmaya uğrayan kaplamaların takip ettiği gözlenmiştir.

Ancak bu şekilde çizgisel bir hat üzerinde okunan pürüzlülük değeri gerçek pürüzlülük değerini tamamen yansıtmayabilir. Çünkü çizgisel pürüzlülük malzemenin tamamını temsil etmemektedir. Buna karşın alansal pürüzlülük değeri belirlenirken malzemenin erozif aşınma yüzeyinin neredeyse tamamı tarandığı için malzemenin tamamı hakkında daha kapsamlı ve doğru bir bilgiye ulaşmak mümkündür. Dolayısıyla alansal bir tarama yapılması durumunda erozif aşınmaya uğrayan malzemelerin pürüzlülüğü hakkında daha tutarlı yorum yapma imkânı sağlanmış olmaktadır. TBC'lerin çizgisel pürüzlülük değerleri ile alansal pürüzlülük değerleri her ne kadar birbirini teyit eder nitelikte olsa da alansal pürüzlülük değerinin gerçeğe daha yakın bir sonuç verdiği açıktır. Yapılan çalışmalarda bu düşünceyi doğrular yönündedir (Cai ve ark., 2015; Karabay ve ark., 2015).

Katı partikül erozyonu deneyleri sonucunda TBC'lerde maksimum pürüzlük değeri 60°'lik partikül çarpma açısıyla yapılan erozif aşınma sonucu meydana gelmiştir (Bkz. Şekil 5.43). 90°'lik partikül çarpma açısı ile yapılan erozif aşınma sonucu kaplamada minimum erozif aşınmanın meydana gelmesi yanında olağanüstü bir şekilde ortalama pürüzlülük değerinin düşük olmasına rağmen ciddi çukurların meydana geldiği görülmüştür. Bunun sebebi ise, erozif aşınma sırasında 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırıcı partiküllerin yüksek enerji ile aşınma yüzeyine dik çarpmasıdır. Böylelikle aynı noktalara tekrarlı aşındırıcı partiküllerin çarpması o bölgeden aşırı bir malzeme kaybına ve kaplama yüzeyinde ciddi çukurların oluşmasına sebep olmuştur. Literatürde yeralan çalışmalarda, hızlandırılarak yüzeye dik gönderilen aşındırıcı partiküllerin maruziyeti sonucunda yüzeyde yırtılmaların meydana geldiği rapor edilmiştir. Bunun yanında yüzeye çarpan partikül miktarı arttıkça kaplama yüzeyinde oluşan plastik deformasyon miktarı artacağı ve yerel delaminasyonların meydana geldiği rapor edilmiştir. Ayrıca aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyine çarpmasıyla yüzeyde meydana getirdiği gerilmelerin kaplamanın çatlamasına sebep olduğu ve bunun sonucu olarak da kaplamanın hasara uğradığı savunulmuştur (Bousser ve ark., 2014; Wang ve ark., 2017).

Üç boyutlu yüzey topografyasının değişimi sonucunda elde edilen sonuçlara göre; 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğramış kaplama yaklaşık 230 µm'lik bir erozif aşınmaya uğramıştır. Bu 230 µm'lik bir erozif aşınma değeri çalışma boyunca TBC'lerde gözlenen en yüksek erozif aşınma değeridir. Bu erozif aşınma değerini, sırasıyla 116 µm ve 75 µm'lik aşınma değerleri ile 30° ve 90°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğrayan TBC'lerde gözlenmiştir. Bu yönüyle 3 boyutlu yüzey topografyasından elde edilen değerler TBC'lerin erozyon oranı, çizgisel ve alansal pürüzlülük değerlerini teyit ettiği görülmüştür. Aynı şekilde bu üç analiz değerlerinin birbirini teyit ettiği yapılan farklı çalışmalarda ortaya konmuştur (Kaundal, 2014; Bora ve ark., 2015). Dolayısıyla TBC'lerin yarı gevrek bir davranış sergilediği 3 boyutlu yüzey topografyası ile bir kez daha doğrulanmıştır. Şekil 5.57'de katı partikül erozyonu sonrası, a) ve b) 30°'lik partikül çarpma açısı, c) ve d) 60°'lik partikül çarpma açısı ve e) ve f) 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşınan TBC'lerin sırasıyla SE ve BSE modlarda üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 5.57.** Katı partikül erozyonu sonrası, a) - b) 30°'lik partikül çarpma açısı, c) - d) 60°'lik partikül çarpma açısı ve e) - f) 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşınan TBC'lerin sırasıyla SE ve BSE modlarda üst yüzey SEM görüntüsü

Şekil 5.57 a) ve Şekil 5.57 b)'de katı partikül erozyonu sonrası sırasıyla SE ve BSE modlarındaki SEM görüntüleri incelendiğinde aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinin plastik deformasyona uğradığı açık bir şekilde gözlenmektedir. Aynı şekilde aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinde oluşturdukları yatayda oluşan derin oyuk (*ploughing*) çizgileri yoğun bir şekilde görülmektedir. Şekil 5.57 a-b'de görüldüğü gibi partikül çarpma yönünde aşınmanın meydana geldiği ve bu aşınmanın daha çok çizme ve kesme şeklinde oluştuğunu söylemek mümkündür. Bununla birlikte erozyon sonucunda kaplama yüzeyinde kraterler ve vadiler oluşmuştur. 3 boyutlu yüzey topografya analizi sonucunda da ortaya çıktığı gibi 30°'lik çarpma açısı ile hasara uğrayan kaplamalarda oluşan kraterler ve vadiler daha sığdır. Başka bir deyişle, kaplama yüzeyi tekrarlı aşındırıcı partiküllerin maruziyeti sonucu malzeme kaybı meydana gelmiş ve hasara uğramıştır. Ancak 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğratılan kaplamalar ile kıyaslandığında daha az bir ağırlık kaybı söz konusudur.

Malzeme kaybının 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna uğratılan kaplamalara kıyasla daha az olmasının nedeni; kaplamanın 30°'lik partikül çarpma açısı sonucunda sergilemiş olduğu davranış şeklinde yorumlanabilir. Şöyle ki; kaplama yüzeyi açının bir fonksiyonu olarak plastik deformasyona uğramıştır. Ancak bu deformasyon daha kesme, sürme çapalama şeklinde olmuştur. Bununla birlikte; yüzey morfolojisi, mikro-kırma şeklinde çok sayıda çizik oluşumuyla yoğun plastik akışı sergilemiştir. Dolayısıyla kaplamanın 30°'lik partikül çarpma açısı sonucunda kısmen sünek bir davranış sergilediği söylenebilir. Bundan mütevellit kaplamada ciddi oranda malzeme kaybı olmamıştır.

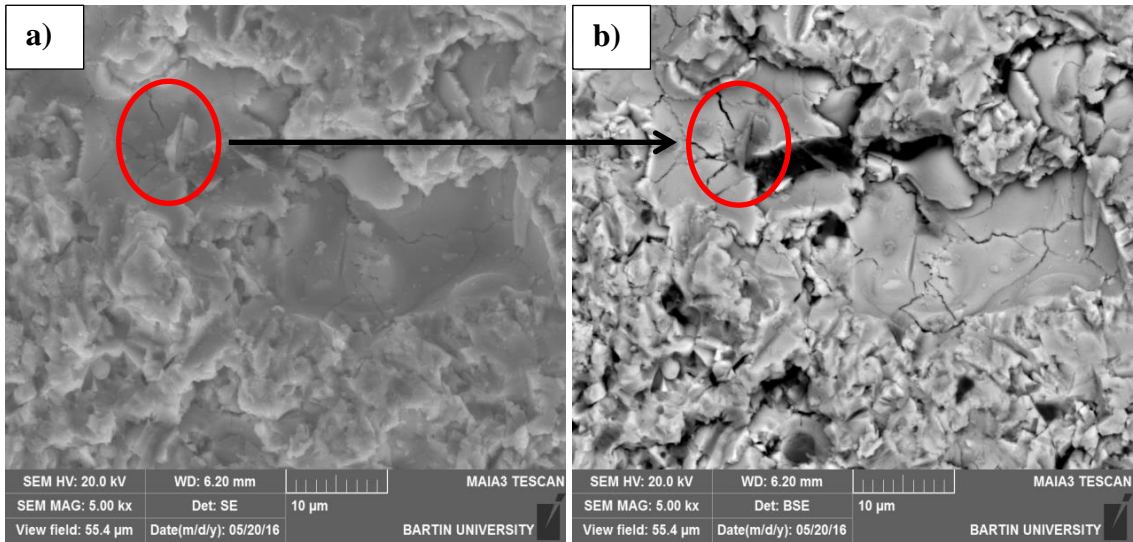
Wang ve ark. ve Harsha ve arkadaşlarının yapmış oldukları çalışmalarda benzer mekanizmalar gözlenip, kaplama yüzeyinin kırılğan olmasının bir sonucu olan, oyukların ve oyuğa yakın yerlerde dudakların oluşumuna neden olan yoğun ve lokalize plastik deformasyon gözlenmemiştir. Bundan ziyade aşındırıcı partiküllerin 30°'lik partikül çarpma açısı sonucunda aşınma mekanizması daha çok çizik oluşumu şeklinde karakterize edildiği rapor edilmiştir (Harsha ve Bhaskar, 2008; Wang ve ark., 2014a).

Şekil 5.57 c) ve Şekil 5.57 d)'de Katı partikül erozyonu sonrası sırasıyla SE ve BSE modlarda SEM görüntüleri incelendiğinde 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamaların da aynı şekilde plastik deformasyona uğradıkları gözlenmektedir.



Ancak 60°'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamalarda daha geniş ve daha derin vadiler oluşmuştur. Bu durum 60°'lik çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamalarda oluşan hasarın büyüklüğünü açık bir şekilde ortaya koymaktadır. 60°'lik çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamaların sergiledikleri kesme, çizme ve sürme şeklinde hasar mekanizmalarının yanında kaplama yüzeyinde kırılma, dökülme, atma ve kalkma şeklinde meydana gelen bir malzeme kaybı söz konusudur. Dolayısıyla bu mekanizma ile meydana gelen hasar sonucu en yüksek erozyon oranına sahip olmaktadır. Bununla birlikte kaplamadaki ağırlık kaybı da en yüksek olmuştur.

Şekil 5.57 e) ve Şekil 5.57 f)'de katı partikül erozyonu sonrası sırasıyla SE ve BSE modlarda SEM görüntüleri incelendiğinde ise, 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırıcı partiküllerin plastik deformasyonu sonucu kaplama yüzeyinde krater oluşumları ve kraterlerin yanlarında dudakların oluştuğu gözlenmektedir. 90°'lik partikül çarpma açılarıyla kaplama yüzeyine tekrarlı darbeler sonucu kaplama yüzeyinde oluk şeklinde oluşumlarla birlikte mikro çatlaklar gözlenmektedir. Bu tip yoğun ve bölgesel plastik deformasyon mekanizması yüzeye dik ve yaklaşık 90°'lik partikül çarpma açıları ile meydana gelmektedir. Bu düşünce, yapılan farklı çalışmalarda da rapor edilmiştir (Wang ve ark., 2016b; Wen ve ark., 2016). Şekil 5.58'de katı partikül erozyonu sonrası, sırasıyla a) SE ve b) BSE modlarda 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşınan TBC'lerin üst yüzey görüntüsü verilmiştir.



**Şekil 5.58.** Katı partikül erozyonu sonrası, sırasıyla a) SE ve b) BSE modlarda 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşınan TBC'lerin üst yüzey görüntüsü

Şekil 5.58’de kaplama yüzeyine aşındırıcı alümina parçacığının saplandığı görülmektedir. EDS analiziyle yüzeye gömülen parçacığın aşındırıcı olarak kullanılan alümina olduğu tespit edilmiştir. Kaplama yüzeyine gömülen parçacıktan alınan EDS analizi sonucu Al ve O pikleri gözlenmiştir (Bkz Şekil 5.54). Aynı şekilde literatürde EDS analizi sonucu yüzeye gömülen aşındırıcı partiküllerin tayini gerçekleştirilmiştir (Yildiran ve ark., 2014; Liu ve ark., 2015; Cernuschi ve ark., 2016). Bununla birlikte saplanan alümina parçacığı çarpmanın etkisiyle oluşan gerilme sonucu kaplama yüzeyinde mikro çatlaklar ve kaplama malzemesinin atması gözlenmiştir.

Sert seramik kaplamaların literatürde tipik olarak gevrek bir davranış sergiledikleri savunulmaktadır. Çünkü aşınma sonrası baskın olan mekanizma mikro-kesme ve mikro-kalkma şeklinde ifade edilmektedir (Zhang ve ark., 2015; Cernuschi ve ark., 2016; Kumar ve Sidhu, 2016). Bu çalışmalardan elde edilen bulgular, TBC’lerin literatürün aksine yarı-gevrek bir davranış sergilediğini göstermektedir. Bunun sebebi olarak mikro-kesme ve mikro-kalkmanın bu çalışmada daha az görülmesi verilebilir. Dolayısıyla bu TBC’lerin katı partikül erozyonu davranışı sonucunda elde edilen veriler ışığında, TBC’lerin yarı gevrek davranış sergilemeleri TBC’lerin erozif aşınma mekanizmasının anlaşılması adına literatüre önemli bir katkı sağlayacağı açıktır.

## 6. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

### 6.1 Genel Sonuçlar

Nikel esaslı süper alaşım olan Inconel 718 altlık malzeme üzerine, termal spreycaplamaya yöntemlerinden APS tekniği kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamaya ve  $ZrO_2+Y_2O_3$  içerikli YSZ seramik üst kaplamaya sahip TBC numuneleri üretilmiştir. Üretilen TBC'lerin servis kullanım koşulları esnasında karşılaşılan termal çevrim, sıcaklık korozyon ve katı partikül erozyonu hasarlarının laboratuvar ortamlarında testleri gerçekleştirilmiştir. TBC'lerin gerçekleştirilen testler sonucunda sergilemiş oldukları karakteristik özellikler gözlemlenerek incelenmiştir.

Gerçekleştirilen deneysel çalışmaların genel sonuçları aşağıda maddeler halinde özetlemiştir:

1. Inconel 718 altlık malzeme üzerine APS tekniği kullanılarak CoNiCrAlY içerikli metalik bağ kaplamaların ve metalik bağ kaplamaların üzerine YSZ içerikli seramik üst kaplamaların üretimleri başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.
2. TBC'lerin fırın termal çevrim testleri, hasar oluşum mekanizmaları ve kullanım ömürlerini belirlemek amacıyla 1150 °C sıcaklıkta ve 60 dakikalık ısıtma-soğutma çevrim süreçleri halinde gerçekleştirilmiştir. Her bir çevrimin 7 dakikasını fırının 1150 °C'ye kadar ısıtılması, 45 dakikasını fırın içinde tutulması ve 8 dakikasını ise soğutma işlemi oluşturmaktadır. TBC sistemlerinin termal çevrim testlerine 40 çevrim sonuna kadar devam edilmiştir. Bu çevrim ile birlikte kaplama yüzeyinde meydana gelen alansal olarak % 25'lik makro hasar kriteri sonucunda termal çevrim testleri sonlandırılmıştır. Termal çevrim testleri sonrasında yapılan incelemelerde kaplama üst yüzeyinin bütünlüğünü kaybettiği ve kaplamanın altlık yüzeyinden attığı gözlenmiştir.
3. Mikroyapısal incelemeler sonrasında, CoNiCrAlY bağ ve YSZ üst kaplamaya sahip TBC sistemlerinde üretim sonrası seramik üst tabaka mikroyapısının gözenek ve çatlak benzeri süreksiz yapılara sahip olduğu görülmüştür. Yüksek sıcaklık testleri sonucunda CoNiCrAlY içerikli bağ ve YSZ içerikli üst kaplama ara yüzeyleri boyunca TGO yapısının oluştuğu ve

oluşan yapının oksidasyonun ilk süreçlerinde  $Al_2O_3$  formunda bulunduğu gözlenmiştir. TGO'yu oluşturan  $Al_2O_3$  tabakasının kararlı ve genelde üniform bir yapıda olduğu görülmüştür. Oksidasyonun ilerleyen süreçlerinde ise  $Al_2O_3$  yapısının kararlılığını kaybederek karışık oksit yapılarının oluşum gösterdiği belirlenmiştir.

4. Termal çevrim testleri sonrası üst kaplamanın faz yapısındaki farklılığı görebilmek amacıyla yapılan XRD analizlerinde üst kaplamayı oluşturan faz yapısının kararlılığını koruduğu gözlenmiştir. Tetragonal faz yapısının monoklinik faz yapısına dönüşmediği saptanmıştır.
5. Sıcak korozyon testlerine tabi tutulan TBC'lerin üst yüzeylerine çalışma ortamlarında yer alan emprütelerden  $Na_2SO_4$  ile  $V_2O_5$  tuzları güncel literatür çalışma ve uygulama koşulları esas alınarak % 50 oranında ve yüzeyde  $10 \text{ mg/cm}^2$  gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Sıcak korozyon testleri fırın ortamında  $1000 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta dörder saatlik çevrim süreçlerinde gerçekleştirilmiştir. Toplam 48 saatlik çevrim süreci sonunda TBC numunesinin bağ/seramik kaplama ara yüzeyinden ayrılarak hasara uğradığı görülmüştür.
6. Sıcak korozyon testleri sonrasında TBC'lerde  $Na_2SO_4+V_2O_5$  ergimiş tuzlarının etkisiyle çevrim süresince kaplama kenarlarından merkeze doğru hasar oluştuğu gözlenmiştir.  $Na_2SO_4+V_2O_5$  tuz karışımı yaklaşık  $900 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta eriyerek kaplama yüzeyinin çukur kısımlarında katılmıştır. Bununla birlikte eriyen tuz karışımı kaplama yüzeyinde bulunan çatlaklardan bağ kaplamaya doğru nüfuz ederek hasar oluşumlarına sebebiyet vermiştir.
7. Sıcak korozyon testlerinin mikroyapısal incelemeleri sonrasında ilk çevrim ile birlikte 12. çevrime kadar olan süreçte korozyon ürünü olan çubuksu yapıların kaplama yüzeyine gömülü olarak düzensiz bir şekilde çekirdeklendiği gözlenmiştir. Elde edilen görüntülerde gözlenen çubuksu yapıların EDS analizleri ile  $YVO_4$  bileşikler olduğu anlaşılmıştır. Artan çevrim süreci ile birlikte sıcak korozyon çevrim miktarının bir fonksiyonu olarak oluşan  $YVO_4$  yapılarının daha belirgin bir şekilde çekirdeklendiği ve boyutlarının daha da büyüdüğü gözlenmiştir. Aynı zamanda üst yüzey SEM görüntüsünde YSZ seramik üst kaplamayı oluşturan  $ZrO_2$  konsantrasyonunun çevrim miktarı arttıkça azaldığı da gözlenmiştir.

8. Sıcak korozyon testleri sonrası gerçekleştirilen XRD analizleri neticesinde faz dönüşümlerinin gerçekleştiği gözlenmiştir. Ortamda bulunan  $V_2O_5$  ve  $Na_2SO_4$  korozif tuzlarının, zirkonyanın tetragonal faz yapısında yarı kararlı halde bulunmasını sağlayan  $Y_2O_3$  fazı ile reaksiyona girerek monoklinik faz yapısına dönüşümüne sebep olduğu anlaşılmıştır.
9. TBC'lerin  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik çarpma açılarında katı partikül erozyonu deneyleri gerçekleştirilmiş ve sergiledikleri davranışlar incelenmiştir. Katı partikül erozyon testleri sonucunda elde edilen veriler ışığında TBC'lerin yarı gevrek bir davranış sergiledikleri sonucuna varılmıştır. Farklı partikül çarpma açılarında katı partikül erozyonuna maruz kalan ve katı partikül erozyonuna maruz kalmayan (erozyon öncesi) kaplamaların çizgisel ve alansal pürüzlülük analizleri sonrasında katı partikül erozyonuna uğrayan kaplamalardan maksimum pürüzlülük değerleri sırasıyla  $60^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik çarpma açılarında gerçekleştiği görülmüştür.
10. Katı partikül erozyon testleri sonrasında en fazla erozyon oranı  $60^\circ$ 'lik partikül çarpma açısında daha sonra sırasıyla  $30^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarında gerçekleştiği görülmüştür.
11. Üç boyutlu yüzey topografya analizleri sonrasında  $30^\circ$ ,  $60^\circ$  ve  $90^\circ$ 'lik partikül çarpma açılarında gerçekleştirilen TBC'lerin sırasıyla  $116 \mu m$ ,  $230 \mu m$  ve  $75 \mu m$ 'lik derinlik değerlerinde aşınmaya maruz kaldıkları anlaşılmıştır.
12. Katı partikül erozyonu sonrası SEM incelemeleri ile aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeylerini plastik deformasyona uğrattığı ve aşındırıcı partiküllerin kaplama yüzeyinde oluşturdukları ploughing (derin oyuk) çizgileri yoğun bir şekilde gözlenmiştir.
13.  $30^\circ$ 'lik partikül çarpma açısı ile hasara uğrayan kaplamalarda aşınmanın partikül çarpma yönünde meydana geldiği ve oluşan aşınmanın daha çok çizme ve kesme şeklinde gerçekleştiği gözlenmiştir. Eroziyon aşınma sonrasında kaplama yüzeylerinde kraterlerin ve vadilerin oluştuğu görülmüştür.
14.  $60^\circ$ 'lik partikül çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamalarda diğer partikül çarpma açılara oranla daha geniş ve daha derin vadiler oluşmuştur. Bu durum  $60^\circ$ 'lik çarpma açısı ile katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamalarda oluşan hasarın büyüklüğünün ölçüsünü göstermesi açısından önem arz etmektedir.  $60^\circ$ 'lik çarpma açısı ile

katı partikül erozyonuna maruz bırakılan kaplamalarda gerçekleşen kesme, çizme ve sürme şeklinde hasar mekanizmalarının yanında kaplama yüzeylerinde kırılma, dökülme, atma ve kalkma şeklinde malzeme kayıpları meydana gelmiştir.

15. 90°'lik partikül çarpma açısı ile aşındırıcı partiküllerin plastik deformasyonu sonucu kaplama yüzeyinde krater ve kraterlerin yanlarında ise lip (dudak) oluşumları gözlenmiştir. Kaplama yüzeylerine tekrarlı darbeler sonucunda oluk şeklinde oluşumlarla birlikte mikro çatlaklar meydana gelmiştir.



## 6.2 Öneriler

Bu tez çalışmasından elde edilen sonuçlar göz önüne alındığında gelecek çalışmalar için öneriler aşağıda maddeler halinde verilmiştir:

1. TBC sistemlerinin termal çevrim testleri sonrası TGO oluşum ve büyüme davranışlarının incelenmesi amacıyla kullanılan CoNiCrAlY bağ kaplama içeriğinden farklı olarak CoCrAlY, NiCrAlY ve NiCoCrAlY gibi bileşimlerin kullanılması ve TBC'lerin termal çevrim davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi,
2. TBC'lerin sıcak korozyon testlerinde kullanılan Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tuzlarının farklı oranlarda ve bileşimlerde kullanılmasıyla TBC'lerin sıcak korozyon davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi,
3. TBC'lerin katı partikül erozyonu testlerinde değişken olarak kullanılan partikül çarpma açısının yanında, aşındırıcı partikül cinsi ve sayısı, partikül boyutu, nozul mesafesi, çarpma basıncı, kütle debisi ve erozyon süresi gibi parametrelerin bir veya birkaçı da dahil edilerek, TBC'lerin katı partikül erozyonu davranışları üzerindeki etkisinin incelenmesi,
4. Son olarak, erozyona dayanıklı kaplamalar alanında son zamanlarda kaydedilen teknolojik ilerlemelerle birlikte gelişmiş simülasyon modelleme yaklaşımları ile daha koruyucu kaplama sistemlerinin geliştirilmesi, gelecek çalışmalar için düşünülebilir.

## KAYNAKLAR

- Afrasiabi, A., Saremi, M. ve Kobayashi, A., 2008, A comparative study on hot corrosion resistance of three types of thermal barrier coatings: YSZ, YSZ+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, *Materials Science and Engineering: A*, 478 (1-2), 264-269.
- Ahmadi-Pidani, R., Shoja-Razavi, R., Mozafarinia, R. ve Jamali, H., 2012, Evaluation of hot corrosion behavior of plasma sprayed ceria and yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings in the presence of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> molten salt, *Ceramics International*, 38 (8), 6613-6620.
- Ajay, A., Raja, V. S., Sivakumar, G. ve Joshi, S. V., 2015, Hot corrosion behavior of solution precursor and atmospheric plasma sprayed thermal barrier coatings, *Corrosion Science*, 98, 271-279.
- Amirthan, G., Udayakumar, A., Bhanu Prasad, V. V. ve Balasubramanian, M., 2010, Solid particle erosion studies on biomorphic Si/SiC ceramic composites, *Wear*, 268 (1-2), 145-152.
- Avcu, E., Fidan, S., Yıldıran, Y. ve Sınmazçelik, T., 2013, Solid particle erosion behaviour of Ti6Al4V alloy, *Tribology - Materials, Surfaces & Interfaces*, 7 (4), 201-210.
- Aygun, A., 2008, Novel thermal barrier coatings (TBCs) that are resistant to high temperature attack by CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> (CMAS) glassy deposits, Ph.D thesis, *The Ohio State University*, Ohio, ABD, 176.
- Bai, Y., Zhao, L., Liu, K., Tang, J. J. ve Han, Z. H., 2014, Fine-lamellar structured thermal barrier coatings fabricated by high efficiency supersonic atmospheric plasma spraying, *Vacuum*, 99, 119-123.
- Bajpai, P., Das, A., Bhattacharya, P., Madayi, S., Kulkarni, K. ve Omar, S., 2015, Hot corrosion of stabilized zirconia thermal barrier coatings and the role of Mg inhibitor, *Journal of the American Ceramic Society*, 98 (8), 2655-2661.
- Barton, F., 2016, Engineered coating solutions, Erişim tarihi: 25.05.2016, Erişim adresi: <http://www.tstcoatings.com>
- Bhatia, R., Singh, H. ve Sidhu, B. S., 2014, Hot corrosion studies of HVOF-sprayed coating on T-91 boiler tube steel at different operating temperatures, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23 (2), 493-505.
- Bhushan, B., 2001, Materials Coatings and Industrial Applications, *Modern tribology handbook*, CRC Press, 1760.
- Bolcavage, A., Feuerstein, A., Foster, J. ve Moore, P., 2004, Thermal shock testing of thermal barrier coating/bondcoat systems, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 13 (4), 389-397.
- Bora, M. O., Fidan, S., Coban, O. ve Yucel, Z., 2015, Scratch behavior of glass fiber reinforced polyester matrix composite after solid particle erosion, *Polymer Composites*, 36 (11), 1958-1966.
- Bose, K., Wood, R. J. K. ve Wheeler, D. W., 2005, High energy solid particle erosion mechanisms of superhard CVD coatings, *Wear*, 259 (1-6), 135-144.
- Bose, S., 2007, High temperature coatings, *Butterworth-Heinemann*, USA, 293.
- Bosscher, W. D., Delrue, H., Blondeel, A. and Holsbeke J. V., 2008, Thermal spray as a sputter target production method, New trends in rotatable target manufacturing for coating applications on glass, 83, 518-521.
- Boudi, A. A., Hashmi, M. ve Yilbas, B. S., 2004, HVOF coating of Inconel 625 onto stainless and carbon steel surfaces: corrosion and bond testing, *Journal of Materials Processing Technology*, 155, 2051-2055.



- Bousser, E., Martinu, L. ve Klemberg-Sapieha, J. E., 2014, Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications, *Surface & Coatings Technology*, 257, 165-181.
- Cai, F., Huang, X. ve yang, Q., 2015, Mechanical properties, sliding wear and solid particle erosion behaviors of plasma enhanced magnetron sputtering CrSiCN coating systems, *Wear*, 324, 27-35.
- Cai, L. X., Mao, J. R., Wang, S. S. ve Feng, Z. P., 2016, New features of solid particle erosion damage of control stage blades in supercritical steam turbine, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part A-Journal of Power and Energy*, 230 (1), 76-85.
- Camp, E. M., 2016, Single Crystal Superalloys, Erişim tarihi: 20.03.2016, Erişim adresi: <http://wwwmekazine.com>
- Cao, X. Q., Vassen, R. ve Stoeber, D., 2004, Ceramic materials for thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 24 (1), 1-10.
- Cernuschi, F., Lorenzoni, L., Capelli, S., Guardamagna, C., Karger, M., Vassen, R., von Niessen, K., Markocsan, N., Menuey, J. ve Giolli, C., 2011, Solid particle erosion of thermal spray and physical vapour barrier coatings, *Wear*, 271 (11-12), 2909-2918.
- Cernuschi, F., Guardamagna, C., Capelli, S., Lorenzoni, L., Mack, D. E. ve Moscatelli, A., 2016, Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings, *Wear*, 348, 43-51.
- Chen, X., Zhao, Y., Gu, L., Zou, B., Wang, Y. ve Cao, X., 2011, Hot corrosion behaviour of plasma sprayed YSZ/LaMgAl<sub>11</sub>O<sub>19</sub> composite coatings in molten sulfate–vanadate salt, *Corrosion Science*, 53 (6), 2335-2343.
- Cho, S. H., Park, S. B., Kang, D. S., Jeong, M. S., Park, H., Hur, J. M. ve Lee, H. S., 2010, Corrosion behavior of plasma-sprayed Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coatings in hot lithium molten salt, *Journal of Nuclear Materials*, 399 (2–3), 212–218.
- Concordia, 2016, Thermal spray and multiphase flow laboratories department of mechanical and industrial engineering, Concordia university, Erişim tarihi: 23.12.2016, Erişim adresi: <http://users.encs.concordia.ca>.
- Dalkılıç, S., 2007, Bir termal bariyer kaplama sisteminin yorulma davranışının incelenmesi, Doktora Tezi, *Anadolu Üniversitesi*, 167.
- David Clarke R., Oechsner, M. ve Padture, N., 2012, Thermal barrier coatings for more efficient gas turbine engines, *Materials Research Society*, 37 (10), 891-895.
- Davis, J. R., 2004, Handbook of thermal spray technology, *Materials Park, OH*, ASM International, p. 338.
- Di Ferdinando, M., Fossati, A., Lavacchi, A., Bardi, U., Borgioli, F., Borri, C., Giolli, C. ve Scrivani, A., 2010, Isothermal oxidation resistance comparison between air plasma sprayed, vacuum plasma sprayed and high velocity oxygen fuel sprayed CoNiCrAlY bond coats, *Surface & Coatings Technology*, 204 (15), 2499-2503.
- Doleker, K. M. ve Karaoglanli, 2017, Comparison of oxidation behavior of YSZ and Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings (TBCs), *Surface & Coatings Technology*, 318, 198–207.
- Donachie, M. J. ve Donachie, S. J., 2002, Superalloys : A technical guide, *Materials Park*, 2nd Edition, ASM International, 439.
- Dong, H., Ren, Y., Wang, D., Li, X., Bai, Y., Wang, J. ve Ma, W., 2014, Hot corrosion behaviors of SrZrO<sub>3</sub> ceramic co-doped with Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in molten Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, and Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> salts mixture, *Journal of the European Ceramic Society*, 34 (15), 3917-3924.

- Dong, H., Yang, G. J., Cai, H. N., Li, C. X., 2015, Propagation feature of cracks in plasma-sprayed YSZ coatings under gradient thermal cycling, *Ceramics International*, 41 (3), 3481-3489.
- Dusa, K. M., 1997, News from the ASM thermal spray society, *Advanced Materials & Processes*, 152 (2), 36-36.
- Dwivedi, G., Viswanathan, V. ve Sampath, S., 2013, Multilayer thermal barrier coatings for gasified coal based turbine engines, *Advanced Materials & Processes*, 171 (5), 49-51.
- Eliasz, G. S., R. M. Latanision, 2002, Hot corrosion in gas turbine components, *Engineering Failure Analysis*, 9, 31-43.
- Estarki, M. R. L., Ravazi, R. S., Edris, H., Pourbafrany, M., 2014, Life time of new YSZ thermal barrier coatings produced by plasma spraying method under thermal shock test and high temperature treatment, *Ceramics International*, 40(1), 1405-1414.
- Evans, A. G., Fleck, N. A., Faulhaber, S., Vermaak, N., Maloney, M. ve Darolia, R., 2006, Scaling laws governing the erosion and impact resistance of thermal barrier coatings, *Wear*, 260 (7-8), 886-894.
- Evans, A. G., D. R. Mumm, J.W. Hutchinson, G. H. Meier, F. S. Pettit, 2001, Mechanism controlling the durability of thermal barrier coatings, *Progress in Materials Science*, 46, 505-553.
- Fan, W., Bai, Y., Li, J. R., Gao, Y., Chen, H. Y., Kang, Y. X., Shi, W. J. ve Li, B. Q., 2017, Microstructural design and properties of supersonic suspension plasma sprayed thermal barrier coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 699, 763-774.
- Fang, M. H., Liu, F. J., Huang, Z. H., Min, X., Liu, Y. G., Ji, H. P., Tang, H., Wu, X. W. ve Peng, F., 2015, Erosion wear behaviour of 3 mol-% yttria-stabilised zirconia ceramics by solid particle impact at elevated temperatures, *Materials Research Innovations*, 19, S359-S363.
- Gao, L. H., Guo, H. B., Wei, L. L., Li, C. Y. ve Xu, H. B., 2015, Microstructure, thermal conductivity and thermal cycling behavior of thermal barrier coatings prepared by plasma spray physical vapor deposition, *Surface & Coatings Technology*, 276, 424-430.
- Ghasemi, R., Shoja-Razavi, R., Mozafarinia, R., Jamali, H., Hajizadeh-Oghaz, M. ve Ahmadi-Pidani, R., 2014, The influence of laser treatment on hot corrosion behavior of plasma-sprayed nanostructured yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 34 (8), 2013-2021.
- Guo, L., Guo, H. B., Peng, H. ve Gong, S. K., 2014, Thermophysical properties of Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> doped Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and thermal cycling durability of (Gd<sub>0.9</sub>Yb<sub>0.1</sub>)<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/YSZ thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 34 (5), 1255-1263.
- Guo, L., Zhang, C., Li, M., Sun, W., Zhang, Z. ve Ye, F., 2017, Hot corrosion evaluation of Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> co-doped Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> stabilized ZrO<sub>2</sub> thermal barrier oxides exposed to Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> molten salt, *Ceramics International*, 43 (2), 2780-2785.
- Gupta, M., Skogsberg, K. ve Nylen, P., 2014, Influence of topcoat-bondcoat interface roughness on stresses and lifetime in thermal barrier coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 23 (1-2), 170-181.
- Gupta, M., 2015, Design of thermal barrier coatings a modelling approach, Springer Briefs in Materials, Sweden, 82.

- Habibi, M. H., Wang, L., Liang, J. D. ve Guo, S. M., 2013, An investigation on hot corrosion behavior of YSZ-Ta<sub>2</sub>O<sub>5</sub> in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> salt at 1100 degrees C, *Corrosion Science*, 75, 409-414.
- Hajizadeh-Oghaz, M., Razavi, R. S., Ghasemi, A. ve Valefi, Z., 2016, Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> molten salts corrosion resistance of plasma-sprayed nanostructured ceria and yttria co-stabilized zirconia thermal barrier coatings, *Ceramics International*, 42 (4), 5433-5446.
- Harsha, A. P., Tewari, U. S. ve Venkatraman, B., 2003, Solid particle erosion behaviour of various polyaryletherketone composites, *Wear*, 254 (7-8), 693-712.
- Harsha, A. P. ve Bhaskar, D. K., 2008, Solid particle erosion behaviour of ferrous and non-ferrous materials and correlation of erosion data with erosion models, *Materials & Design*, 29 (9), 1745-1754.
- Hua, J. J., Zhang, L. P., Liu, Z. W., Wang, Y. Z., Lin, C. C., Zeng, Y. ve Zheng, X. B., 2012, Progress of research on the failure mechanism of thermal barrier coatings, *Journal of Inorganic Materials*, 27 (7), 680-686.
- Huang, H., Liu, C., Ni, L. ve Zhou, C., 2011, Evaluation of microstructural evolution of thermal barrier coatings exposed to Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> using impedance spectroscopy, *Corrosion Science*, 53 (4), 1369-1374.
- Imrek, H., Bagci, M. ve Khalfan, O. M., 2011, Solid particle erosion as influenced by tensile axial loads, *Tribology Transactions*, 54 (5), 779-783.
- Jing, L., 2004, Effects of bond coat surface preparation on thermal cycling lifetime and failure characteristic of thermal barrier coatings, Master of Science Thesis, *University of Central Florida*, USA, 128.
- John Rajesh, J., Bijwe, J., Venkataraman, B. ve Tewari, U. S., 2004, Effect of impinging velocity on the erosive wear behaviour of polyamides, *Tribology International*, 37 (3), 219-226.
- Jones, R. L., 1997, Some aspects of the hot corrosion of thermal barrier coatings, *Journal of Thermal Spray Technology*, 6 (1), 77-84.
- Kakuda, T. R., Levi, C. G. ve Bennett, T. D., 2015, The thermal behavior of CMAS-infiltrated thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, 272, 350-356.
- Kaplan, M., Karaoglanli, A. C., Uyaner, M., 2016, Solid particle erosion and importance on engineering materials, *Journal of Bartin University Engineering and Technological Sciences*, 4 (1), 31-34.
- Karabay, S., Bayraklilar, M. S. ve Balci, E., 2015, Influence of different heat treatments on the solid particle erosion behavior of aluminum alloy AA 7075 in industrial applications, *Acta Physica Polonica A*, 127 (4), 1052-1054.
- Karaoglanli, A. C., Erdogan, G., Kahraman, Y., Turk, A., Ustel, F. ve Ozdemir, I., 2012, Study of the microstructure and oxidation behavior of YSZ and YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> TBCs with HVOF bond coatings, *Materiali in Tehnologije*, 46 (5), 439-444.
- Karaoglanli, A. C., Caliskan, H., Gok, M. S., Erdogan, A. ve Turk, A., 2014, A comparative study of the microabrasion wear behavior of CoNiCrAlY coatings fabricated by APS, HVOF, and CGDS techniques, *Tribology Transactions*, 57 (1), 11-17.
- Karaoglanli, A. C., 2015, Effects of plastic deformation on isothermal oxidation behavior of CoNiCrAlY coatings, *Science of Advanced Materials*, 7 (1), 173-177.

- Karaoglanli, A. C., Doleker, K. M., Demirel, B., Turk, A. ve Varol, R., 2015, Effect of shot peening on the oxidation behavior of thermal barrier coatings, *Applied Surface Science*, 354, 314-322.
- Karaoğlanlı, A. C., 2013, Termal bariyer kaplamalarda bağ tabakasının farklı yöntemlerle üretilmesi ve özelliklere etkisi, Doktora tezi, *Sakarya Üniversitesi*, Sakarya, Türkiye, 250.
- Kaundal, R., 2014, Role of process variables on the solid particle erosion of polymer composites: a critical review, *Silicon*, 6 (1), 5-20.
- Keyvani, A., Saremi, M. ve Sohi, M. H., 2011, An investigation on oxidation, hot corrosion and mechanical properties of plasma-sprayed conventional and nanostructured YSZ coatings, *Surface & Coatings Technology*, 206 (2-3), 208-216.
- Schneider K. E., Belashchenco V., Dratwinski M, Siegmann S., Zagorski A., 2006, Thermal spraying for power generation components, *Wiley*, 285.
- Koolloos, M. F. J. ve Houben, J. M., 2000, Behavior of plasma-sprayed thermal barrier coatings during thermal cycling and the effect of a preoxidized NiCrAlY bond coat, *Journal of Thermal Spray Technology*, 9 (1), 49-58.
- Koolloos, M. F. J., 2001, Behaviour of low porosity microcracked thermal barrier coatings under thermal Loading, Ph.D Thesis, Technische Universiteit Eindhoven, *NLR*, Nedherland, 168.
- Kovarik, O., Hausild, P., Siegl, J., Chraska, T., Matejicek, J., Pala, Z. ve Boulos, M., 2015, The influence of substrate temperature on properties of APS and VPS W coatings, *Surface & Coatings Technology*, 268, 7-14.
- Krishnamurthy, N., Murali, M. S., Venkataraman, B. ve Mukunda, P. G., 2012, Characterization and solid particle erosion behavior of plasma sprayed alumina and calcia-stabilized zirconia coatings on Al-6061 substrate, *Wear*, 274, 15-27.
- Kumar, P. ve Sidhu, B. S., 2016, Characterization and high-temperature erosion behaviour of HVOF thermal spray cermet coatings, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25 (1), 250-258.
- Landolt, D., 2007, Corrosion and surface chemistry of metals, EPFL press, Switzerland, 400.
- Li, S., Liu, Z.-G. ve Ouyang, J. H., 2011, Study on hot corrosion reactions between SmYbZr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> ceramic and vanadium pentoxide at temperatures of 600-1000 °C in air, *Materials Chemistry and Physics*, 130 (3), 1134-1138.
- Liu, H. F., Xiong, X., Li, X. B. ve Wang, Y. L., 2014, Hot corrosion behavior of Sc<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-ZrO<sub>2</sub> thermal barrier coatings in presence of Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> molten salt, *Corrosion Science*, 85, 87-93.
- Liu, R., Yao, J. H., Zhang, Q. L., Yao, M. X. ve Collier, R., 2015, Sliding wear and solid-particle erosion resistance of a novel high-tungsten Stellite alloy, *Wear*, 322, 41-50.
- Lu, Z., Myoung, S. W., Kim, E. H., Lee, J. H. ve Jung, Y. G., 2014, Microstructure Evolution and Thermal Durability with Coating Thickness in APS Thermal Barrier Coatings, *Materials Today: Proceedings*, 1 (1), 35-43.
- Lugscheider, E., Doepper, G., Mayer, H. G., Seidel, A. ve Dreier, W., 2000, EB-PVD zirconia thermal barrier coatings for experiments in space, *High Temperature Surface Engineering*, 77-84.
- Lv, B., Fan, X., Xie, H. ve Wang, T. J., 2017, Effect of neck formation on the sintering of air-plasma-sprayed thermal barrier coating system, *Journal of the European Ceramic Society*, 37 (2), 811-821.

- Mahade, S., Curry, N., Björklund, S., Markocsan, N. ve Nylén, P., 2016, Failure analysis of  $Gd_2Zr_2O_7/YSZ$  multi-layered thermal barrier coatings subjected to thermal cyclic fatigue, *Journal of Alloys and Compounds*, 689, 1011-1019.
- Mann, B. S., 1999, Solid-particle erosion and protective layers for steam turbine blading, *Wear*, 224 (1), 8-12.
- Miller, R. A., 1997, Thermal barrier coatings for aircraft engines: History and directions, *Journal of Thermal Spray Technology*, 6 (1), 35-42.
- Mohan, P., Yuan, B., Patterson, T., Desai, V. H. ve Sohn, Y. H., 2007, Degradation of yttria-stabilized zirconia thermal barrier coatings by vanadium pentoxide, phosphorous pentoxide, and sodium sulfate, *Journal of the American Ceramic Society*, 90 (11), 3601-3607.
- Monceau, D., Oquab, D., Estournes, C., Boidot, M., Selezneff, S. ve Ratel-Ramond, N., 2010, Thermal barrier systems and multi-layered coatings fabricated by spark plasma sintering for the protection of Ni-base superalloys, *Materials Science Forum*, 1-3 (654-656), 1826-1831.
- Naveed, M., Renteria, A. F., Nebel, D. ve Weiss, S., 2015, Study of high velocity solid particle erosion behaviour of Ti<sub>2</sub>AlC MAX phase coatings, *Wear*, 342, 391-397.
- Nicholls, J. R., 2000, Foresight in Surface Engineering, *Document Compiled by The Surface Engineering Committee of The Institute of Materials*, 23.
- Osorio, J. D., Toro, A. ve Hernandez-Ortiz, J. P., 2012, Thermal barrier coatings for gas turbine applications: failure mechanisms and key microstructural features, *Dyna-Colombia*, 79 (176), 149-158.
- Özgürlük, Y., 2015, Soğuk gaz dinamik sprey (CGDS) kaplama yöntemiyle üretilen termal bariyer kaplamaların (TBC) sıcak korozyon davranışlarının incelenmesi, Yüksek lisans tezi, Bartın Üniversitesi, Bartın, Türkiye, 111.
- Park, S. Y., Kim, J. H., Park, C. G., Kim, M. C. ve Song, H. S., 2003, Hot corrosion behavior of yttria and ceria stabilized ZrO<sub>2</sub> thermal barrier coatings, *Thermec'2003*, 1-5, (426-4), 2593-2598.
- Pawlowski, L., 2008, The science and engineering of thermal spray coatings, 2nd Edition, John Wiley & Sons, England, 656.
- Ramesh, M. R., Prakash, S., Nath, S. K., Sapra, P. K. ve Venkataraman, B., 2010, Solid particle erosion of HVOF sprayed WC-Co/NiCrFeSiB coatings, *Wear*, 269 (3-4), 197-205.
- Richer, P., Yandouzi, M., Beauvais, L. ve Jodoin, B., 2010, Oxidation behaviour of CoNiCrAlY bond coats produced by plasma, HVOF and cold gas dynamic spraying, *Surface & Coatings Technology*, 204 (24), 3962-3974.
- Ruud, J. A., Bartz, A., Borom, M. P. ve Johnson, C. A., 2001, Strength degradation and failure mechanisms of electron-beam physical-vapor-deposited thermal barrier coatings, *Journal of the American Ceramic Society*, 84 (7), 1545-1552.
- Saman, S., 2011, Microstructure, Oxidation & mechanical properties of as-sprayed and annealed HVOF & VPS CoNiCrAlY coatings, Phd Thesis, *University of Nottingham*, 1-259.
- Saremi, M., Valefi, Z. ve Abaeian, N., 2013, Hot corrosion, high temperature oxidation and thermal shock behavior of nanoagglomerated YSZ-alumina composite coatings produced by plasma spray method, *Surface and Coatings Technology*, 221, 133-141.
- Saremi M., A. A., Kobayashi A., 2007, Bond coat oxidation and hot corrosion behavior of plasma sprayed YSZ coating on Ni superalloy, *Transactions of JWRI*, 36 (1), 41-45.
- Sarıkaya, Ö., 2007, Aşınmaya karşı yüzey mühendisliği yöntemleri, *Sakarya*, 321.

- Schmitt, M. P., Rai, A. K., Zhu, D. M., Dorfman, M. R. ve Wolfe, D. E., 2015, Thermal conductivity and erosion durability of composite two-phase air plasma sprayed thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, 279, 44-52.
- Sinmazcelik, T. ve Sari, N. Y., 2009, Erodent size effect on the erosion of polyphenylene sulfide composite, *Polymer Composites*, 31 (6), 985-994.
- Soboyejo, W., Mensah, P. ve Diwan, R., 2010, Interfacial kinetics of high temperature oxidation in YSZ thermal barrier coatings with bond coatings of NiCoCrAlY with 0.25% Hf, *Imece 2009, Proceedings of the Asme International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 9, 2055-2062.
- Spitsberg, I. T., Mumm, D. R. ve Evans, A. G., 2005, On the failure mechanisms of thermal barrier coatings with diffusion aluminide bond coatings, *Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing*, 394 (1-2), 176-191.
- Sreedhar, G. ve Raja, V. S., 2010, Hot corrosion of YSZ/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dispersed NiCrAlY plasma-sprayed coatings in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-10 wt.% NaCl melt, *Corrosion Science*, 52 (8), 2592-2602.
- Strangman, T., Rayboul, D., Jameel, A. ve Baker, W., 2007, Damage mechanisms, life prediction, and development of EB-PVD thermal barrier coatings for turbine airfoils, *Surface & Coatings Technology*, 202 (4-7), 658-664.
- Struers, 2016, Metallographic preparation of thermal spray coatings, Application notes, Erişim tarihi: 04.07.2016, Erişim adresi: [www.struers.com](http://www.struers.com).
- Sulzer, M., 2015, Erişim tarihi: 09.10.2015, Erişim adresi: [www.sulzer-metco.com](http://www.sulzer-metco.com).
- Sun, J., Zhang, L. L. ve Zhao, D., 2010, Microstructure and thermal cycling behavior of nanostructured yttria partially stabilized zirconia (YSZ) thermal barrier coatings, *Journal of Rare Earths*, 28, 198-201.
- Tang, J. J., Bai, Y., Liu, K., Zhang, P., Li, B. Q. ve yang, J. F., 2016, Microstructural evolution of SAPS/HVOF CoNiCrAlY alloy coating during thermal cycling test, *Oxidation of Metals*, 86 (1-2), 75-87.
- Tao, C., Wang, L., Cheng, N. L., Hu, H. F., Liu, Y. ve Song, X., 2016, Hot corrosion performance of AlO-CrO/NiCoCrAlYTa and AlO/NiCoCrAlYTa coatings deposited by atmospheric plasma spraying, *Journal of Thermal Spray Technology*, 25 (4), 797-805.
- Telling, R. H., Jilbert, G. H. ve Field, J. E., 1997, The erosion of aerospace materials by solid particle impact, *Window and Dome Technologies and Materials V*, 3060, 56-67.
- Tolpygo, V. ve Clarke, D. R., 2003, Morphological evolution of thermal barrier coatings induced by cyclic oxidation, *Surface & Coatings Technology*, 163, 81-86.
- Tsai, P. C., Tseng, C. F., Yang, C. W., Kuo, I. C., Chou, Y. L. ve Lee, J. W., 2013, Thermal cyclic oxidation performance of plasma sprayed zirconia thermal barrier coatings with modified high velocity oxygen fuel sprayed bond coatings, *Surface & Coatings Technology*, 228, S11-S14.
- Tucker, R. C., 2002, Thermal spray coatings: Broad and growing applications, *International Journal of Powder Metallurgy*, 38 (7), 45-53.
- Verbeek, A. T. J., 1992, Plasma sprayed thermal barrier coatings production, characterization and testing, Ph.D Thesis, *Technische Universiteit Eindhoven*, Netherlands, 253.
- Vipul, G., 2014, Principle of Tribology, PPT, Erişim tarihi: 20.05.2016, Erişim adresi: [www.mecheng.iisc.ernet.in](http://www.mecheng.iisc.ernet.in).

- Wada, S., Watanabe, N. ve Tani, T., 1988, Solid particle erosion of brittle materials, The Erosive Wear of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC Particle Composites, *Nippon Seramikkusu Kyokai Gakujutsu Ronbunshi-Journal of the Ceramic Society of Japan*, 96 (7), 755-759.
- Wang, D. S., Tian, Z. J., Shen, L. D., Liu, Z. D. ve Huang, Y. H., 2014a, Effects of laser remelting on microstructure and solid particle erosion characteristics of ZrO<sub>2</sub>-7wt%Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> thermal barrier coating prepared by plasma spraying, *Ceramics International*, 40 (6), 8791-8799.
- Wang, D. S., Tian, Z. J., Wang, S. L., Shen, L. D. ve Huang, Y. H., 2015a, Solid particle erosion behaviour of plasma-sprayed conventional and nanostructured Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-13 wt% TiO<sub>2</sub> ceramic coatings, *Transactions of the Indian Ceramic Society*, 74 (2), 90-96.
- Wang, L., Zhong, X. H., Zhao, Y. X., Yang, J. S., Tao, S. Y., Zhang, W., Wang, Y. ve Sun, X. G., 2014b, Effect of interface on the thermal conductivity of thermal barrier coatings: A numerical simulation study, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 79, 954-967.
- Wang, L., Liu, C. G., Zhong, X. H., Zhao, Y. X., Zhao, H. Y., Yang, J. S., Tao, S. Y. ve Wang, Y., 2015b, Investigation of crack propagation behavior of atmospheric plasma-sprayed thermal barrier coatings under uniaxial tension using the acoustic emission technique, *Journal of Thermal Spray Technology*, 24 (3), 296-308.
- Wang, L., Yang, J. S., Ni, J. X., Liu, C. G., Zhong, X. H., Shao, F., Zhao, H. Y., Tao, S. Y. ve Wang, Y., 2016, Influence of cracks in APS-TBCs on stress around TGO during thermal cycling: A numerical simulation study, *Surface & Coatings Technology*, 285, 98-112.
- Wang, X., Shen, X., Sun, F. ve Shen, B., 2017, Influence of boron doping level on the basic mechanical properties and erosion behavior of boron-doped microcrystalline diamond (BDMCD) film, *Diamond and Related Materials*, 73, 218-231.
- Wang, Y., Liu, J. W., Kang, N., Darut, G., Poirier, T., Stella, J., Liao, H. L. ve Planche, M. P., 2016, Cavitation erosion of plasma-sprayed CoMoCrSi coatings, *Tribology International*, 102, 429-435.
- Wei, R., Langa, E., Rincon, C. ve Arps, J., 2006, Solid particle erosion protection of turbine blades with thick nitride and carbonitride coatings from magnetron sputter deposition, *Surface Engineering, Proceedings*, 78-84.
- Wellman, R. G. ve Nicholls, J. R., 2008, Erosion, corrosion and erosion-corrosion of EB PVD thermal barrier coatings, *Tribology International*, 41 (7), 657-662.
- Wen, Z. H., Bai, Y., Yang, J. F. ve Huang, J., 2016, Effect of vacuum re-melting on the solid particles erosion behavior of Ni60-NiCrMoY composite coatings prepared by plasma spraying, *Vacuum*, 134, 73-82.
- Wheeler, D. W. ve Wood, R. J. K., 1999, Solid particle erosion of CVD diamond coatings, *Wear*, 233, 306-318.
- Wheeler, D. W. ve Wood, R. J. K., 2006, Solid particle erosion behaviour of CVD boron phosphide coatings, *Surface & Coatings Technology*, 200 (14-15), 4456-4461.
- Wu, H. X., Ma, Z., Liu, L., Liu, Y. B. ve Wang, D. Y., 2016, Thermal cycling behavior and bonding strength of single-ceramic-layer Sm<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and double-ceramic-layer Sm<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>/8YSZ thermal barrier coatings deposited by atmospheric plasma spraying, *Ceramics International*, 42 (11), 12922-12927.

- Xu, Z. H., Wang, Z. L., Huang, G. H., Mu, R. D. ve He, L. M., 2015, Morphology, bond strength and thermal cycling behavior of (Ni, Pt)Al/YSZ EB-PVD thermal barrier coatings, *Journal of Alloys and Compounds*, 651, 445-453.
- Xu, Z., He, L., Chen, X., Zhau, Y., Mu, R., He, S., Cao, X., 2010, Thermal cycling behavior of  $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$  coating with the addition of  $\text{Y}_2\text{O}_3$  by EB-PVD, *Journal of Alloys and Compounds*, 508 (1), 85-93.
- Yildiran, Y., Avcu, E., Sahin, A. E., Fidan, S., Yetistiren, H. ve Sinmazcelik, T., 2014, Effect of particle impact angle, erodent particle size and acceleration pressure on the solid particle erosion behavior of 3003 aluminum alloy, *Acta Physica Polonica A*, 125 (2), 523-525.
- Yong Hu, L. R., 2012, Effect of particulate reinforcement on wear behavior of magnesium matrix composites, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22 (11), 2659-2664.
- Young, D. J., 2008, High temperature oxidation and corrosion of metals, Amsterdam, Elsevier, 592.
- Yu, Q. M. ve Cen, L., 2017, Residual stress distribution along interfaces in thermal barrier coating system under thermal cycles, *Ceramics International*, 43 (3), 3089-3100.
- Yuan, K., Yu, Y. ve Wen, J.-F., 2017, A study on the thermal cyclic behavior of thermal barrier coatings with different MCrAlY roughness, *Vacuum*, 137, 72-80.
- Zamani, P. ve Valefi, Z., 2017, Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  and  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-Al}_2\text{O}_3$  composite coatings, *Surface & Coatings Technology*, 316, 138-145.
- Zhang, X. F., Zhou, K. S., Dong, S. J., Xu, W., Song, J. B. ve Liu, M., 2015, Effect of Al-deposition on erosion resistance of plasma sprayed thermal barrier coating, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 25 (8), 2587-2593.
- Zhang, Y. Y., Deng, H. X., Shi, H. J., Yu, H. C., Zhong, B., 2012, Failure characteristics and life prediction for thermally cycled thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, 206 (11-12), 2977-2985.
- Zhao, Y. X., Li, D. C., Zhong, X. H., Zhao, H. Y., Wang, L., Shao, F., Liu, C. G. ve Tao, S. Y., 2014, Thermal shock behaviors of YSZ thick thermal barrier coatings fabricated by suspension and atmospheric plasma spraying, *Surface & Coatings Technology*, 249, 48-55.
- Zhao, S., Zhau, Y., Zou, B., Fan, X., Xu, J., Hui, Y., Zhou, X., Liu, S. Cau, X., 2014, Characterization and thermal cycling behavior of  $\text{La}_2(\text{Zr}_{0.7}\text{Ce}_{0.3})_2\text{O}_7/8\text{YSZ}$  functionally graded thermal barrier coating prepared by atmospheric plasma spraying, *Journal of Alloys and Compounds*, 592, 109-114.
- Zhou, F., Wang, Y., Cui, Z., Wang, L., Gou, J., Zhang, Q., 2017, Thermal cycling behavior of nanostructured 8YSZ, SZ/8YSZ and 8CSZ/8YSZ thermal barrier coatings fabricated by atmospheric plasma spraying, *Ceramics International*, 43 (5), 4102-4111.
- Zhe, L. S., W. M.; Yeon, G., J.; Govindasamy, B.; Jeongseung, L.; Ungyu, P., 2013, Thermal fatigue behavior of air-plasma sprayed thermal barrier coating with bond coat species in cyclic thermal exposure, *Materials*, 6 (8), 3387-3403.



## ÖZGEÇMİŞ

### KİŞİSEL BİLGİLER

**Adı Soyadı** : Mustafa KAPLAN  
**Uyruğu** : TC  
**Doğum Yeri ve Tarihi** : KONYA- 04.06.1981  
**Telefon** : +90 505 287 16 33  
**Faks** :  
**E-mail** : mkaplan5442@gmail.com

### EĞİTİM

Derece	Adı, İlçe, İl	Bitirme Yılı
Lise	: Karatay Lisesi, Karatay, Konya	2000
Üniversite	: Sakarya Üniversitesi, Serdivan, Sakarya	2005
Yüksek Lisans:	Sakarya Üniversitesi, Serdivan, Sakarya	2008
Doktora	: Selçuk Üniversitesi, Selçuklu, Konya	2017

### İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2012-2014	Rotasyon Metal/Döküm Ltd.Şti.	Üretim Mühendisi

### UZMANLIK ALANI

Termal bariyer kaplamalar

Döküm teknolojisi

### YABANCI DİLLER

İngilizce

### BELİRTMEK İSTEĞİNİZ DİĞER ÖZELLİKLER

### YAYINLAR

#### Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

**Kaplan M.**, Uyaner M., Karaoglanli A.C., 2017, Thermal Cycling Behavior of CoNiCrAlY Bond Coated Thermal Barrier Coatings (TBCs) Produced by Atmospheric Plasma Spraying (APS), *Materials and Technology*, (**Doktora tezinden üretilmiştir**)

**Kaplan M.**, Ebeoglugil M.F., Yigit R., Koseoglu K., Celik E., Avcı E., 2015, High Temperature  $Tb_2O_3-ZrO_2$  Insulation Coatings on Ag Tapes for Magnet Technology, *Jokull Journal*, vol:65, p:7. **(Yüksek lisans tezinden üretilmiştir)**

#### **Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan bildiri kitabında basılan bildiriler**

**Kaplan M.**, Karaoglanlı A.C., Uyaner M., 2016, Application of Thermal Spray Coatings Technology in Wear and Corrosion Related Damages, IV. International Metallurgical Engineering Conference (METECH16), İstanbul. **(Doktora tezinden üretilmiştir)**

**Kaplan M.**, Doleker K.M., Uyaner M., Karaoglanlı A.C., 2016, Thermal Cycling Behaviors of TBCs Consisting of HVOF and APS Bond Coats, 2st. International Advanced and Functional Materials Technologies (AFMAT2016), Antalya. **(Doktora tezinden üretilmiştir)**

#### **Ulusal hakemli dergilerde yayınlanan makaleler**

**Kaplan M.**, Karaoglanlı A.C., Uyaner M., 2016, Katı Partikül Erozyonu ve Mühendislik Malzemeleri Üzerindeki Önemi, Bartın Üniversitesi Mühendislik ve Teknoloji Bilimleri Dergisi, Cilt:4, Sayı:1 (31-34). **(Doktora tezinden üretilmiştir)**

**Kaplan M.**, Ebeoglugil M.F., Birlik I., Yigit R., Celik E., Avcı E., 2014, “High Temperature  $Yb_2O_3-ZrO_2$  Insulation Coatings on Ag Tapes for Magnet Technology”, Afyon Kocatepe University, Journal of Science and Engineering, AKÜ FEMÜBİD 14, OZ5719, (117-128). **(Yüksek lisans tezinden üretilmiştir)**

#### **Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan bildiri kitabında basılan bildiriler**

**Kaplan M.**, Ebeoglugil M.F., Birlik I., Yigit R., Celik E., Avcı E., 2012, Mıknatıs Teknolojisi İçin Ag Şeritler Üzerindeki Yüksek Sıcaklık  $Yb_2O_3-ZrO_2$  Yalıtkan Kaplamalar, (High Temperature  $Yb_2O_3-ZrO_2$  Insulation Coatings on Ag Tapes for Magnet Technology), VIII. Seramik Kongresi, Afyonkarahisar. **(Yüksek lisans tezinden üretilmiştir)**

**Ulusal kuruluşlarca desteklenen projede görev almak**

SÜ BAP-15201071 nolu, ‘Endüstriyel Atıklar Kullanılarak Üretilen Termal Sprey Kaplamaların ve Aşınma Davranışlarının İncelenmesi’, Bilimsel Araştırma Projesi, 10.06.2015- 23.05.2017, Araştırmacı.

**Ödüller ve burslar**

TÜBİTAK, 113R049 Numaralı “Gaz Türbinleri İçin Yenilikçi Kaplama Teknolojileri Kullanılarak Yeni Tip Termal Bariyer Kaplama (TBC) Malzemelerinin Geliştirilmesi, İzotermal ve Termal Çevrim Oksitlenme Davranışlarının İncelenmesi” isimli projede bursiyer öğrenci, 15.03.2014-15.04.2016.



