

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DERECELENDİRİLMİŞ MULLİT ESASLI ÇEVRESEL
BARIYER KAPLAMALARIN ÜRETİMİ VE TERMAL
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esat ÖZDEMİR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

OCAK 2025

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DERECELENDİRİLMİŞ MULLİT ESASLI ÇEVRESEL
BARİYER KAPLAMALARIN ÜRETİMİ VE TERMAL
DAVRANIŞININ İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Esat ÖZDEMİR

Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Garip ERDOĞAN

OCAK 2025

Esat ÖZDEMİR tarafından hazırlanan “DERECELENDİRİLMİŞ MULLİT ESASLI ÇEVRESEL BARIYER KAPLAMALARIN ÜRETİMİ VE TERMAL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 24.01.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı : Unvan Adı SOYADI
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : Unvan Adı SOYADI (Danışman)
Sakarya Üniversitesi

Jüri Üyesi : Unvan Adı SOYADI
Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Lisansüstü Eğitim-Öğretim Yönetmeliğine ve Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesine uygun olarak hazırlamış olduğum “DERECELENDİRİLMİŞ MÜLLİT ESASLI ÇEVRESEL BARIYER KAPLAMALARIN ÜRETİMİ VE TERMAL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ” başlıklı tezin bana ait, özgün bir çalışma olduğunu; çalışmamın tüm aşamalarında yukarıda belirtilen yönetmelik ve yönergeye uygun davrandığımı, tezin içerdiği yenilik ve sonuçları başka bir yerden almadığımı, tezde kullandığım eserleri usulüne göre kaynak olarak gösterdiğimi, bu tezi başka bir bilim kuruluna akademik amaç ve unvan almak amacıyla vermediğimi ve 20.04.2016 tarihli Resmi Gazete’de yayımlanan Lisansüstü Eğitim ve Öğretim Yönetmeliğinin 9/2 ve 22/2 maddeleri gereğince Sakarya Üniversitesi’nin abonesi olduğu intihal yazılım programı kullanılarak Enstitü tarafından belirlenmiş ölçütlere uygun rapor alındığını, çalışmamla ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun ortaya çıkması halinde doğabilecek her türlü hukuki sorumluluğu kabul ettiğimi beyan ederim.

(...../...../2025)

Esat ÖZDEMİR



Hastalıkta ve sağlıkta her daim yanımda olan aileme ve yeğenlerime



TEŞEKKÜR

Bu çalışmanın konusu, deneysel çalışmaların planlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazım sürecindeki değerli katkıları için hocam Dr. Öğr. Üyesi Garip ERDOĞAN'a ayrıca üniversite eğitim sürecimde, akademik ve kişisel gelişimime katkıda bulunan tüm hocalarıma ve arkadaşlarıma teşekkür ederim.



Esat ÖZDEMİR



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ.....	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR.....	xiii
ŞİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET.....	xxiii
SUMMARY.....	xxv
1. GİRİŞ	1
2. TERMAL BARIYER KAPLAMALAR.....	3
2.1. Termal Bariyer Kaplama Katmanları	4
2.1.1 Altlık (taban) malzemesi.....	5
2.1.2. Bağ kaplama	5
2.1.3. Termal gelişen oksit (tgo)	6
2.1.4. Seramik üst tabaka	6
2.2. Termal Bariyer KaplamaYöntemleri	8
2.2.1. Plazma sprej kaplama yöntemi	8
2.2.1.1. Atmosferik plazma sprej (aps) kaplama yöntemi.....	9
2.2.1.2. Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme (hvof) yöntemi	10
2.2.1.3. Soğuk sprej kaplama (cgds) yöntemi	10
3. ÇEVRESEL BARIYER KAPLAMALAR.....	13
3.1. Çevresel Bariyer Kaplamaların Gelişimi.....	15
3.2. Bir Kaplama Yaklaşımı Olarak Termal ve Çevresel Bariyer Kaplamalar	16
3.3. Çevresel Bariyer Kaplamalarda Nesil Kavramı	17
3.3.1. Birinci nesil çevresel bariyer kaplamalar.....	17
3.3.2. İkinci nesil çevresel bariyer kaplamalar	17
3.3.3. İleri (yeni) nesil çevresel bariyer kaplamalar	19
3.4. Çevresel Bariyer Kaplamalar İçin Üretim Yöntemleri.....	19
3.4.1. Atmosferik plazma sprej (aps)	19
3.4.2. Kimyasal buhar biriktirme	21
3.4.3. Sol-jel yöntemi.....	22

3.4.4. Elektron demeti fiziksel buhar biriktirme (eb-pvd)	23
3.5. Çevresel Bariyer Kaplamalardan Beklenen Özellikler.....	24
3.6. Çevresel Bariyer Kaplamalarda Su Buharı Etkileşimi	26
3.6.1. SiC- su buharı etkileşimi.....	26
3.6.2. Kaplama – su buharı etkileşimi.....	27
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	29
4.1. Kaplamada Kullanılan Tozlar	29
4.2. Altlık Malzeme	31
4.3. Kaplama Prosesi	33
4.4. Metalografi İşlemleri	35
4.5. Optik Mikroskop.....	35
4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM).....	36
4.7. XRD (X Işını Difraksiyon) Yöntemi	36
4.8. Termal Yayılım Testi.....	37
4.9. Termal Şok Testi	39
5. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ	43
5.1. Optik Mikroskop Analizi	43
5.2. SEM Analizi	44
5.3. XRD Analizi	52
5.3. Termal Yayılım Testi.....	53
5.4. Termal Şok Testi Sonuçlarının İncelenmesi	56
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	61
KAYNAKLAR.....	63
ÖZGEÇMİŞ.....	71

KISALTMALAR

APS	: Atmoserik plazma püskürtme
BC	: Bond coat
BSAS	: Baryum stronsiyum alüminyum silikat
CGDS	: Soğuk gaz dinamik spre
CMC	: Seramik matrisli kompozitler
ÇBK	: Çevresel bariyer kaplamalar
EBC	: Environmental barrier coatings
EB-PVD	: Elektron demeti fiziksel buhar biriktirme
HVOF	: Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme
PS	: Plazma spre
TBK	: Termal bariyer kaplamalar
TGO	: Termal gelişen oksit
XRD	: X ışını difraksiyon
YSZ	: İtiryum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit



SİMGELER

°C	: Santigrat derece
Ni	: Nikel
Co	: Kobalt
Fe	: Demir
µm	: Mikrometre [10^{-3} mm]
SiC	: Silisyum karbür
Al	: Aluminyum
O	: Oksijen
Si	: Silisyum



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 3.1. Çeşitli Termal Bariyer Kaplama Malzemelerinin TGK Değerleri [41,42,43,44,45].....	19
Tablo 4.1. Plazma Sprey Parametreleri.	34





ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1. ZrO_2 a Y_2O_3 eklenmesinden sonra oksijen boşluğu oluşumu şeması [10].	4
Şekil 2.2. Termal Bariyer Kaplama Katmanları [3].	5
Şekil 2.3. Termal Bariyer Kaplamaların Bileşimi [15].	7
Şekil 2.4. Termal Bariyer Kaplama Uygulanmış Türbin Kanatları [16].	8
Şekil 2.5. Plazma Sprey Prosesinin Şematik Olarak Gösterimi [17].	9
Şekil 2.6. HVOF Kaplama Yöntemi [19].	10
Şekil 2.7. CGDS Kaplama Yönteminin Şematik Gösterimi [20].	11
Şekil 3.1. SiC/SiC Kompozit Altlığın Yüksek Sıcaklıkta Oksijen ve Su Buharı ile Tepkime Şeması [23].	14
Şekil 3.2. Gaz Türbinin Temel Prensibi [24].	14
Şekil 3.3. Gaz türbinlerinin yanma sıcaklığı kabiliyeti gelişimi [30].	16
Şekil 3.4. Plazma Torcu Bölümlerinin Şematik Gösterimi: (1) anot; (2) katot; (3) su çıkış ve katot konnektörü; (4) su giriş ve anot konnektörü; (5) çalışma gaz girişi; (6) toz enjektörü; (7) elektrik yalıtkanı [49].	20
Şekil 3.5. Termal Bariyer Kaplama ve APS Sisteminin Şematik Gösterimi [50].	21
Şekil 3.6. Kimyasal Buhar biriktirme Prosesinin Tipik Adımlarının Şematik Gösterimi [53].	22
Şekil 3.7. EB-PVD Ekipmanının Şeması (Aşama 1) ve Kaplama İçin Film Üretimi [59].	24
Şekil 3.8. Kaplama ile altlık arasındaki TGK uyumsuzluğunun etkisi a) Kaplama çekme gerilmesi altında, iç bükey b) Kaplama basma gerilmesi altında, dışbükey [61].	25
Şekil 3.9. Kaplama malzemesi seçiminde dikkat edilmesi gereken konular [60].	25
Şekil 3.10. Buhar döngüsü sırasında su buharının ve oksidasyonun etkileri altında yüzey çatlamasına bağlı olarak üst kaplama yüzeyinde kaplamanın parçalanması nedeniyle içsel hasar mekanizması [64].	26
Şekil 3.11. Silisyum karbürün 1300°C deki zamana bağlı oksit kalınlığındaki artışı [66].	27
Şekil 3.12. Sıcak buharın bir silisyum nitrür altlık üzerindeki, çevresel bariyer kaplama tabakasında neden olduğu korozyon saldırısının şeması, SiO_2 tane sınırının buharlaşmasını ve oksitleyicilerin alt tabakaya erişimini göstermektedir [22].	28
Şekil 4.1. Kaplama Sisteminin Şematik Görünümü	29
Şekil 4.2. Toz besleme ünitesi (hopper).	31
Şekil 4.3. Mullit-Yitriya kaplanmış paslanmaz çelik numune.	32
Şekil 4.4. Kaplama numunesinin görünümü. a) Kaplanmamış arka yüzey, b) Kaplama yapılan ön yüzey.	32

Şekil 4.5. Kaplama işlemi sonrası altlıktan ayrılmış kaplamaların ve kalıba alınmış kaplamaların görüntüsü a) Alümina - Müllit b) Alumina -Zirkon kaplaması.	33
Şekil 4.6. Kaplama Üretim Sistemi.....	34
Şekil 4.7. MultiCoat Operatör Masası.	35
Şekil 4.8. Zeiss AxioCam Mrc5 Optik Mikroskop	36
Şekil 4.9. Termal Yayılım Ölçüm Metodu [70]......	37
Şekil 4.10. Linseis LFA 1000 lazer flaş ısı yayılım katsayı analiz cihazı [70].	38
Şekil 4.11. a) Lazer flaş metodunun şematik gösterimi, b) Linseis LFA 1000 lazer flaş sisteminde elde edilen grafit referans numunesinin sinyal profili ve model uyumu [71].	38
Şekil 4.12. Termal şok testi görüntüsü.	40
Şekil 4.13. Termal kamera ile test esnasında alınan görüntü. a) Kaplanmış ön yüzey, b) Kaplamanın olmadığı arka yüzey.....	41
Şekil 5.1. Alumina-Müllit kaplaması optik mikroskop görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme.....	43
Şekil 5.2. Alumina-zirkon kaplamasının optik mikroskop görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme	44
Şekil 5.3. Müllit-yitriya kaplamasının optik mikroskop görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme.....	44
Şekil 5.4. Müllit-yitriya toz karışımlarının SEM görüntüleri, a) %75 müllit - %25 yitriya b) %50 müllit - %50 yitriya c) %25 müllit - %75 yitriya.	45
Şekil 5.5. Müllit-yitriya kaplamasının SEM görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme.	45
Şekil 5.6. Müllit-Yitriya mikroyapısında çatlak görüntüsü.	46
Şekil 5.7. Müllit-Yitriya kaplamasının haritalama görünümü.	47
Şekil 5.8. Müllit-Yitriya kaplamasının EDX görünümü.....	47
Şekil 5.9. Müllit-Alumina toz karışımlarının SEM görüntüleri, a) %75 müllit - %25 alumina b) %50 müllit - %50 alumina c) %25 müllit - %75 alumina.	48
Şekil 5.10. Müllit-Alumina kaplamasının SEM görüntüleri, a)genel görünüm b) yüksek büyütme.	48
Şekil 5.11. Alumina-Müllit kaplamasının haritalama görünümü.	49
Şekil 5.12. Alumina-Müllit kaplamasının EDX görünümü.	49
Şekil 5.13. Zirkon-Alumina toz karışımlarının SEM görüntüleri, a) %75 zirkon - %25 alumina b) %50 zirkon - %50 alumina c) %25 zirkon - %75 alumina. ..	50
Şekil 5.14. Zirkon-Alumina kaplamasının SEM görüntüleri, a)genel görünüm b) yüksek büyütme.	50
Şekil 5.15. Alumina- Zirkon kaplamasının haritalama görünümü.....	51
Şekil 5.16. Alumina- Zirkon kaplamasının EDX görünümü.	51
Şekil 5.17. Müllit-Alumina kaplamasının XRD analizi.....	52
Şekil 5.18. Zirkon-alumina kaplamasının XRD analizi.	53
Şekil 5.19. Yitriya – Müllit kaplamasının XRD analizi.	53
Şekil 5.20. Müllit-alumina kaplamasının termal yayılım ölçüm değerleri.	54
Şekil 5.21. Zirkon-alumina kaplamasının termal yayılım ölçüm değerleri.	54
Şekil 5.22. Müllit-Yitriya kaplamasının termal yayılım ölçüm değerleri.	55
Şekil 5.23. Müllit-forsterit kaplanmış numunenin termal yayılım değerlerinin sıcaklık ile değişimi [75]......	56

- Şekil 5.24.** a) Mullit-Yitriya kaplamasının optik mikroskop görüntüleri a) Termal şok öncesi b) 50 çevrim termal şok sonrası c) 100 çevrim termal şok sonrası d) 150 çevrim termal şok sonrası..... 57
- Şekil 5.25.** Müllit-Yitriya kaplamasının 150 çevrim termal şok sonrası XRD analizi. 58
- Şekil 5.26.** Karbon – Karbon kompoziti üzerine yapılan Müllit-Yitriya kaplamasının a) Termal çevrim öncesi SEM görüntüsü b) 150 çevrim sonrası yüksek büyütme c) 150 çevrim sonrası genel görünüm. 59





DERECELENDİRİLMİŞ MULLİT ESASLI ÇEVRESEL BARIYER KAPLAMALARIN ÜRETİMİ VE TERMAL DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

ÖZET

Gaz türbinlerinde yaygın olarak kullanılan termal bariyer kaplamalar, gaz türbinlerinin metalik bileşenlerini yüksek sıcaklıktan korumakla birlikte yanma sıcaklığının artırılarak daha verimli gaz türbinleri üretilmesine olanak vermektedir. Daha yüksek yanma sıcaklığı gereksinimi ile yüksek sıcaklıklara ($>1300^{\circ}\text{C}$) dayanıklı malzemelere ihtiyaç ortaya çıkmaktadır. Süper alaşım esaslı metalik malzemelerin kullanımı yerine gaz türbinlerinde seramik matrisli kompozitlerin (CMC) kullanımı ortaya çıkmıştır. CMC yüksek sıcaklıklarda üstün mekanik özellikler sağlasa dahi yanma atık gazlarında bulunan su buharı ile korozyona uğramaktadırlar. Bu nedenle çevresel bariyer kaplama olarak adlandırılan ve seramik matrisli kompozitleri su buharından koruyacak kaplamalara ihtiyaç duyulmaya başlanmıştır.

Yanma odalarında kullanılan CMC genellikle SiC/C kompozitlerinden üretilmekle birlikte oksit malzemelere göre nispeten düşük termal genleşme özelliğine sahiptirler. Bu nedenle kaplama malzemesi olarak kullanılabilinecek Çevresel Bariyer Kaplamalar (ÇBK) termal genleşme katsayısını sağlayabilecek malzemeler genellikle silikat esaslı malzemelerden seçilmektedir ve silikat esaslı malzemelerde de su buharı korozyonu problemi ortaya çıkmaktadır. Çalışmanın amacı, termal genleşme katsayısı yüksek olsa dahi su buharı korozyonuna daha dayanıklı olan oksit kaplamaların termal genleşme katsayısı CMC ile uyumlu olan silikat esaslı oksitler ile altlıktan en dışa doğru kompozisyonu değiştirilerek en dışta oksit esaslı kaplama katmanı elde edilmesi ve altlık kaplama arayüzünde ise silikat esaslı malzeme uygulanarak TKG uyumsuzluğunun giderilmesidir.

Bu amaç doğrultusunda dört farklı kaplama tozu, müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3.2\text{SiO}_2$), zirkon (ZrSiO_4), alüminyum oksit (Al_2O_3), yitriya (Y_2O_3) tercih edilmiştir. Müllit- Yttria, Zirkon-Alumina ve Müllit-Alumina olacak şekilde 3 farklı kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen farklı kaplamalarda her katman sonrası kompozisyon oksit diğer oksit bileşenin kompozisyonu %25 artırılarak kaplamalar elde edilmiştir. Kaplama yöntemi olarak plazma sprej püskürtme (APS) yöntemi kullanılmıştır. Kaplamaların optik mikroskop, SEM, XRD, termal yayılım ve termal şok analizleri yapılmıştır. Yapılan deneysel sonuçlar neticesinde termal yayılım değerlerinin artan sıcaklık ile azaldığı görülmüştür fakat düşük termal yayılım her zaman düşük termal iletim katsayısına denk gelmeyeceği göz önüne alınmalıdır. Ancak yapılan çalışmanın özü itibari ile kaplamada beklenen termal yayılım değerinin sıcaklığa bağlı değişimi literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir.



GRADED MULLITE BASED ENVIRONMENTAL BARRIER COATINGS PRODUCTION AND THERMAL BEHAVIOR INVESTIGATION

SUMMARY

High-temperature industrial applications, particularly in the energy and aerospace sectors, place extreme demands on materials used in critical components. These components must endure severe thermal, chemical, and mechanical stresses, often in highly oxidative and corrosive environments. As a result, the need for advanced materials and surface modification techniques that can withstand these harsh conditions is crucial. Among the various approaches, thermal spray technologies have become one of the most important methods for enhancing material properties, offering solutions for wear resistance, thermal insulation, and corrosion protection.

Thermal spray coatings involve the deposition of molten or semi-molten particles onto a substrate, which solidify to form a protective layer. This process is particularly beneficial in applications where direct exposure to extreme conditions would lead to rapid degradation of the structural components. By forming a strong, durable protective barrier, thermal spray coatings improve the performance and longevity of critical parts under extreme operating conditions. The flexibility of thermal spray methods allows for the selection of a wide range of coating materials, offering significant versatility in tailoring coatings for specific needs.

Among the various thermal spray coatings, thermal barrier coatings (TBCs) are particularly significant due to their role in protecting metallic substrates from high temperatures. TBCs are widely used in gas turbines, where they prevent thermal damage to the turbine components, enabling the production of more efficient engines by increasing the combustion temperature. By insulating the turbine blades from the extreme heat generated during operation, TBCs allow for a higher combustion efficiency, which in turn leads to improved overall energy production and reduced fuel consumption. This is essential in industries that demand maximum energy efficiency, such as power generation and aviation.

As operational temperatures in turbines continue to rise to meet the demand for more efficient engines, traditional metallic materials have begun to show their limitations. Materials such as superalloys, although capable of withstanding high temperatures, eventually fail under the extreme conditions present in modern gas turbines. This has led to the development of ceramic matrix composites (CMCs), which offer superior mechanical and thermal properties at elevated temperatures compared to traditional superalloys. CMCs, particularly those composed of silicon carbide (SiC/C), offer high thermal stability, low density, and exceptional resistance to creep and thermal fatigue, making them ideal for use in combustion chambers and other high-stress environments.

Despite their advantages, CMCs are not immune to corrosion. One of the major challenges they face is corrosion caused by water vapor present in combustion gases. This issue is especially significant in environments with high humidity or in

applications where the combustion gases contain high levels of water vapor. If left unprotected, CMCs can degrade quickly due to the effects of water vapor, which attacks the material, leading to the formation of detrimental phases that reduce its mechanical properties and thermal stability. As a result, the need for specialized coatings referred to as environmental barrier coatings (EBCs) has arisen. EBCs are designed to protect CMCs from water vapor corrosion, ensuring their long-term durability and performance in high-temperature environments.

To address this issue, the selection of suitable EBC materials is essential. Materials for environmental barrier coatings are typically chosen from silicate-based compounds, as they offer thermal expansion coefficients that are more compatible with the CMCs' low expansion properties. This compatibility is crucial to minimize thermal stresses that can occur due to the expansion mismatch between the coating and the substrate. However, while silicate-based materials offer the necessary thermal properties, they also present challenges in terms of water vapor corrosion resistance. Silicates can react with water vapor, leading to the formation of hydrated phases that reduce the coating's effectiveness and durability over time. Therefore, a critical challenge in developing EBCs is balancing the need for both thermal expansion compatibility and resistance to water vapor corrosion.

To overcome these challenges, advanced deposition techniques such as Atmospheric Plasma Spray (APS) have become crucial in the development of effective environmental barrier coatings. APS is a widely used thermal spray technology that allows for the deposition of a variety of materials onto substrates with high precision. In the APS process, coating powders are introduced into a high-temperature plasma jet, where they are rapidly heated and accelerated to high velocities. The molten or semi-molten particles are then sprayed onto the substrate surface, where they solidify to form a dense, adherent coating. This process provides several advantages, including precise control over the coating thickness and microstructure, which are essential for achieving the desired performance characteristics in environmental barrier coatings.

APS is particularly suitable for the deposition of multi-layered coatings, which is essential when designing coatings with gradient structures. In the case of CMC protection, a multi-layer coating system can be designed to have a silicate-based material near the substrate, where the primary concern is thermal expansion compatibility, and an oxide-based material on the outermost layer, where water vapor resistance is more critical. By using APS, it is possible to achieve coatings that provide both the necessary mechanical properties and corrosion resistance while minimizing thermal expansion mismatch.

The versatility of APS also extends to material selection. Coating powders such as mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), zircon (ZrSiO_4), aluminum oxide (Al_2O_3), and yttria (Y_2O_3) are commonly used in EBC applications. These materials were selected for their excellent thermal properties, adhesion strength, and corrosion resistance. For this study, coatings were produced in combinations such as Mullite-Yttria, Zircon-Alumina, and Mullite-Alumina to evaluate their performance in protecting CMCs from water vapor corrosion while maintaining the thermal compatibility needed for high-temperature applications.

The results of the study indicate that the multi-layer coatings produced using the APS method demonstrate improved performance over single-layer coatings. The gradient structure, with a transition from silicate-based to oxide-based materials, enhances both thermal expansion compatibility and water vapor resistance. This development not

only addresses the issues associated with traditional EBCs but also provides a pathway for designing coatings that can significantly extend the lifespan of CMCs in aggressive high-temperature environments.

In conclusion, the integration of APS with advanced material selection offers a promising solution for the protection of ceramic matrix composites in high-temperature applications. The combination of high thermal performance, corrosion resistance, and structural compatibility makes the developed coatings an ideal choice for use in the next generation of gas turbines and other critical components in the energy and aerospace industries. This research provides valuable insights into the future of environmental barrier coatings and their role in enhancing the performance of high-temperature materials in extreme operating conditions.

Thermal barrier coatings, which are widely used in gas turbines, in conjunction with protect the metallic components of gas turbines from high temperatures and enable the production of more efficient gas turbines by increasing the combustion temperature.

With the requirement for higher combustion temperatures, need for materials resistant to high temperatures ($>1300^{\circ}\text{C}$) show up. The use of ceramic matrix composites (CMC) in gas turbines has emerged instead of the use of superalloy-based metallic materials. Even though CMC provide superior mechanical properties at high temperatures, they are corroded by water vapour in combustion waste gases. For this reason, a need has arisen for coatings called environmental barrier coating and that it will be protect CMCs from water vapor.

CMC used in combustion chambers are generally produced from SiC/C composites, they have relatively low thermal expansion properties compared to oxide materials. For this reason, the materials that can provide the thermal expansion coefficient for Environmental Barrier Coatings (EBC) that can be used as coating materials are generally selected from silicate-based materials and water vapour corrosion problem arises in silicate-based materials.

The aim of the study is to obtain at the outermost oxide-based coating layer by changing the composition from the substrate to the outermost with silicate-based oxides whose thermal expansion coefficient is compatible with CMC, which are more resistant to water vapor corrosion even if the thermal expansion coefficient of oxide coatings is high, and to eliminate the CTE incompatibility by applying silicate-based material at the substrate-coating interface.

For this purpose, four different coating powders, mullite ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), zircon (ZrSiO_4), aluminum oxide (Al_2O_3), yttria (Y_2O_3), were preferred. Three different coatings were produced as Mullite-Yttria, Zircon-Alumina and Mullite-Alumina. Atmospheric plasma spray (APS) method was used as coating method.



1. GİRİŞ

Günümüzde birçok sektörde yaygın olarak kullanılan malzemeler, çeşitli sorunlarla karşı karşıya kalmaktadır. Aşınma ve korozyon gibi malzemenin yapısını doğrudan etkileyen ve bütünlüğünü tehlikeye atan mekanizmalar, modern teknoloji ve mühendislik açısından önemli bir endişe kaynağıdır. Bu problemler, malzemenin ömrünü kısaltmanın ötesinde, güvenlik, performans ve maliyet konularında da ciddi risklere yol açmaktadır.

Hızla ilerleyen teknoloji, dayanıklılığı yüksek malzemelere duyulan ihtiyacı artırırken, bu malzemelerin özelliklerini zararlı çevresel faktörlerden koruma gerekliliğini de beraberinde getirmektedir. Bu amaçla geliştirilen kaplama yöntemleri, malzeme yüzeylerini çevresel etkilerden korumak için en yaygın kullanılan çözümler arasında yer almaktadır.

Enerji ve hammadde kaynaklarının hızla tükenmesi ile endüstriyel alanda aşınma ve korozyondan kaynaklanan ekonomik kayıplar, yüzey kaplama tekniklerine olan ilgi ve yönelimi önemli ölçüde artırmıştır [1].

Yüzey kaplama teknikleri oldukça geniş bir çeşitlilik göstermektedir ve bu yöntemler arasında termal spreycaplamalar, teknolojik ilerlemelerle birlikte daha yaygın bir kullanım alanı bulmuştur. Termal spreycaplama, toz veya tel formundaki kaplama malzemesinin elektrik arkı, alev ya da plazma ile ertgitilip, püskürtme gazı yardımıyla ertgimiş parçacıkların altlık malzemeye yapışmasını sağlayan bir yöntemdir. Bu kaplamalar, korozyon, abrazyon, erozyon ve oksidasyon gibi aşınma problemlerini önlemenin yanı sıra ısı yalıtımı, elektrik iletimi ya da yalıtımı amacıyla kullanılabilir. Ayrıca, yenileme, onarım ve dekoratif amaçlar için de tercih edilmektedir. [2]

Termal bariyer kaplamalar (TBK), gaz türbinlerinde metalik bileşenleri yüksek sıcaklıklara karşı yalıtım amacıyla kullanılan yapılardır. Bu kaplamalar, türbin bileşenlerinin ömrünü uzatırken aynı zamanda gaz türbinlerinin verimliliğini artırır. Gaz türbinli motorlarda verimliliği artırmanın bir yolu, motorun çalışma sıcaklığını yükseltmektir. Bu sayede daha fazla enerji üretimi ve daha yüksek itki sağlanabilir. Ancak, çalışma sıcaklığının yükselmesi motor bileşenlerini daha yüksek sıcaklıklara

maruz bırakır ve ek önlemler gerektirir [3]. Bu da bileşenlerin ömrünü kısaltır ve çeşitli hasarlara yola açabilir.

Uzay araçları ve havacılık alanında, motor verimliliğini artırmak ve gaz emisyonlarını azaltmak büyük bir öneme sahiptir. Bu doğrultuda, motorlarda metal malzemeler yerine daha yüksek yanma sıcaklıklarına dayanabilen kompozit malzemeler kullanılmaya başlanmıştır. Kompozit malzemeler, metal malzemelere kıyasla hafiflik, yüksek mukavemet ve üstün termal iletkenlik gibi pek çok avantaj sunmaktadır [4]. Ancak, kompozit malzemelerin kullanımıyla birlikte bazı sorunlar da ortaya çıkmıştır. Bu sorunlardan biri, kompozit malzemelerin çevresel faktörler nedeniyle korozyona uğramasıdır. Bu durum, kompozit malzemedan yapılan motor bileşenlerinin ömrünü kısaltmaktadır. Çevresel bariyer kaplamalar (ÇBK), bu sorunu çözmek için geliştirilmiş bir teknolojidir. ÇBK, kompozit malzemelerin yüzeyine uygulanan bir tabaka olup, yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve diğer korozyif maddelere karşı etkili bir koruma sağlar. [5].

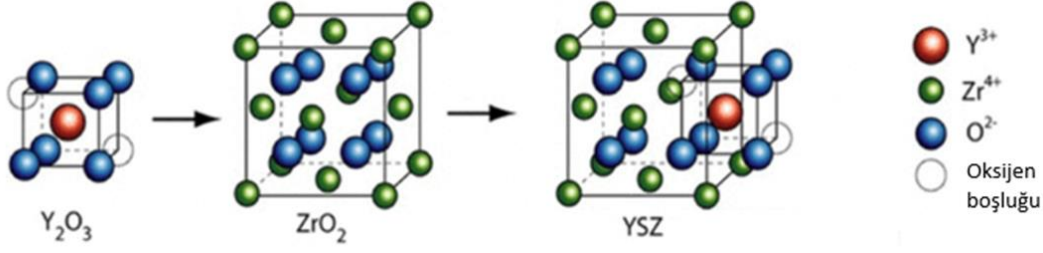
2. TERMAL BARİYER KAPLAMALAR

Ekonomik ve çevresel faktörler, yakıt tüketimini azaltan yeni nesil gaz türbinlerinin geliştirilmesini her geçen gün daha önemli hale getirmektedir. Bu türbinlerin performansını artırmak için taban malzemelerin termal yalıtımı kritik bir rol oynamaktadır. Bunun başlıca nedeni, türbin verimliliğini artırmanın, çalışabileceği sıcaklık aralığını olabildiğince genişletmeyi gerektirmesidir.

Termal bariyer kaplamaların temel amacı, özellikle gaz türbinleri ve dizel motorlar gibi yüksek sıcaklıkta çalışan sistemlerde metalik bileşenleri korumaktır. Bu kaplamalar, kalınlıkları ve termal özellikleri sayesinde metal yüzeylerin sıcaklığını 100-300 °C arasında düşürebilir. Bu sıcaklık azalması, metal bileşenlerin oksitlenme hızını yavaşlatırken mekanik mukavemetlerini korumada önemli bir avantaj sunar. Parçaların sıcaklığının düşürülmesi, gereken soğuma havası miktarını azalttığından sistemin verimini önemli ölçüde arttırmaktadır [6].

Termal bariyer kaplamalar, farklı uygulama teknikleriyle üretilmektedir. Bu yöntemler arasında elektron demeti fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD), plazma sprej (PS), yüksek hızlı oksijen-yakıt püskürtme (HVOF) ve kimyasal lazer buhar çökertme gibi çeşitli teknolojiler yer almaktadır [7]. Termal bariyer kaplamalar genellikle altlık malzemenin sıcaklıktan korunmasını sağlayan seramik üst katman ile oksidasyon direncini arttıran metalik altlık arasındaki ısıl genleşme farklarını dengeleyen bir bağ katmanından oluşur. Günümüz endüstrisinde en yaygın olarak kullanılan termal bariyer kaplama türü, % 6-8 oranında itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit (YSZ) kaplamadır [8].

Bunun nedeni, YSZ'nin düşük termal iletkenliği ve altlık malzeme ile olan termal uyumsuzluğu minimize eden yüksek termal genleşme özelliğine sahip olmasıdır [9]. Şekil 2.1'de zirkonyum oksite, itriyum oksit eklendikten sonra oksijen boşluğu oluşumu şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 2.1. ZrO_2 a Y_2O_3 eklenmesinden sonra oksijen boşluğu oluşumu şeması [10].

Bir termal bariyer kaplama malzemesi seçerken dikkate alınması gereken birçok faktör bulunmaktadır ve malzemenin belirli özelliklere sahip olması istenir. Bu özellikler şu şekilde sıralanabilir:

- Yüksek erime noktası,
- Ağır çalışma ortamında faz dönüşümü göstermemesi,
- Altlık malzeme ile seramik katmanın TGK değerlerinin uyumlu olması,
- Yüksek aşınma ve korozyon direnci,
- Kimyasal kararlılık (oksitlenmeye karşı dayanım),
- Düşük maliyet,
- Düşük elastisite modülü,
- Metalik altlık ile uygun ısı genleşme davranışı,
- Altlık malzemeye iyi yapışma özelliği,
- Düşük sinterleme oranı [8].

Termal bariyer kaplama malzemesi, bu özelliklerin tümünü karşılayabilme kapasitesine sahip olsa da, tüm bu özellikleri taşıyan malzeme sayısı sınırlıdır.

2.1. Termal Bariyer Kaplama Katmanları

Termal bariyer kaplamalar genellikle birkaç temel bileşenden oluşur. Kaplamanın temelini, yüksek sıcaklıklara dayanıklı bir süper alaşım altlık oluşturur. Bu altlık üzerine, kaplama sürecinde ve çalışma sırasında oluşan termal gelişen oksit (TGO) adı verilen bir ara tabaka meydana gelir. TGO, kaplamanın yapısal bütünlüğünü korumada önemli bir rol oynar. Bunun üzerinde, seramik üst kaplamanın metalik altlığa yapışmasını sağlayan ve aynı zamanda altlığı oksitlenmeye karşı koruyan bağ kaplama (bond coat) bulunur. En üstte ise, sıcaklık yalıtımı sağlayarak termal performansı artıran seramik bir üst kaplama yer alır. [3]. Altlık üzerine uygulanan ara bir kaplama, termal bariyer kaplamaların ısıya dayanıklılığını ve kullanım ömrünü belirleyen

unsurlar arasında yer alır. Bu kaplama, oksit katmanlarının temel yüzey özelliklerini sunar ve seramik üst tabaka ile metalik bağ tabakası arasında bağlantı sağlar. Şekil 2.2’de görülen termal bariyer kaplamaların katmanları malzemenin yüksek sıcaklıklarda performansını ve ömrünü artırır.



Şekil 2.2. Termal Bariyer Kaplama Katmanları [3].

2.1.1 Altlık (taban) malzemesi

Altlık malzemesi metal alaşımlardan veya seramiklerden oluşabilir. Alt tabaka parçanın dayanıklılığını ve nükavemetini sağlar. Gaz türbinli motorlarda altlık malzemesi genellikle nikel, İnidyum veya krom esaslı süperalaşımlar olup 1100-1200 °C’ya kadar olan sıcaklıklara dayanım gösterebilmektedir. Ortam koşullarına karşı son derece dirençli olan bu süper alaşımlar, ergime noktalarının yaklaşık % 90’ına ulaşan sıcaklıklara kadar çalışabilmektedir. Mekanik yükü taşıyan süper alaşım altlıktır [3].

2.1.2. Bağ kaplama

Kaplama uygulamalarında karşılaşılmaması en mümkün ve en yaygın hata, kaplamanın kaplanacak yüzeye olan bağlanma hatasıdır. Bu durumun temel sebebi, kaplama ile altlığın arasındaki bağlanmanın yetersizliği ve zayıflığıdır. Bu nedenle termal bariyer kaplama sistemlerinde asıl yapılmak istenen seramik üst kaplamadan önce altlığa ince bir kaplama tabakası püskürtülür ve bu tabakaya bağ kaplama denir.

Bağ kaplamanın ana işlevi, seramik üst kaplama ile altlığın bağlantısını güçlendirmek ve oksidasyonun alt katmanlara ulaşmasının önüne geçmektir. Bağ kaplama,TBK sistemleri için dayanımı arttırmaktadır. Ayrıca metal ve seramik kaplamanın farklı genleşme katsayılarının ayarlanmasında da bağ kaplamanın önemi büyüktür [11]. Gaz türbinlerinde bağ kaplama olarak genellikle MCrAlY genel formülüne sahip bağ kaplamalar tercih edilmektedir. Formüldeki “M” arzu edilen kaplama niteliğine göre

nikel (Ni), kobalt (Co), demir (Fe) veya bileşimleri şeklinde uygulanabilmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, farklı kaplama bileşimlerinin farklı oksidasyon ve korozyon özelliklerine sahip olduğunu ortaya koymuştur. Oksidasyonun daha etkin bir hasar mekanizması olduğu yüksek sıcaklıklarda (900 °C'nin üzerinde) yüksek miktarda krom bulunduran NiCoCrAlY kaplamalar iyi oksidasyon direnci göstermektedir. [12].

2.1.3. Termal gelişen oksit (tgo)

Termal gelişen oksit, genellikle metalik alaşım tabakasının oksidasyonu ile başlar. Bu oksitlenme durumu, genellikle seramik üst kaplama katmanının kaplanmaya başladığı süreçte oluşmaktadır. Kaplama süreci ve kullanımı esnasında, bağ kaplama ile seramik kaplama arasında giderek büyümeye başlayan Al_2O_3 esaslı termal gelişen oksit katmanı, diğer katmanlarla mukayese edildiğinde çok daha ince bir yapıda olmasına karşın bağ kaplama katmanı ile gösterdiği yüksek termal genleşme katsayısı uyumsuzluğundan ötürü kaplama içersinde gerilme oluşumunu tetiklemektedir. Bu uyumsuzluğun nedeni, yüksek yoğunluklu metalden düşük yoğunluklu oksit forma geçiş yaparken oluşan hacim kısıtlamalarıdır. TBK katmanlarının ihtiva edebileceği bu gerilmeler, özellikle oksitlenme özelliği fazla ve yüksek sıcaklıklardaki kullanım koşullarında ortaya çıkmaktadır [3]. Bu şartlar altında termal gelişen oksit tabakasının kalınlığı artmakta ve artan gerilimler ile birlikte termal bariyer kaplama sisteminde çatlamalar ve ayrışmalar gözlenmektedir.

TGO'nun kalınlaşması her ne kadar kaplamanın ömrünü olumsuz etkilese de, kaplama yapısındaki rolü oldukça kritiktir. TGO, seramik yalıtım katmanının metalik bağ katmanına tutunmasını sağlar ve bağ katmanını oksitlenmeye karşı koruyarak kaplamanın verimliliğini artırır. [13].

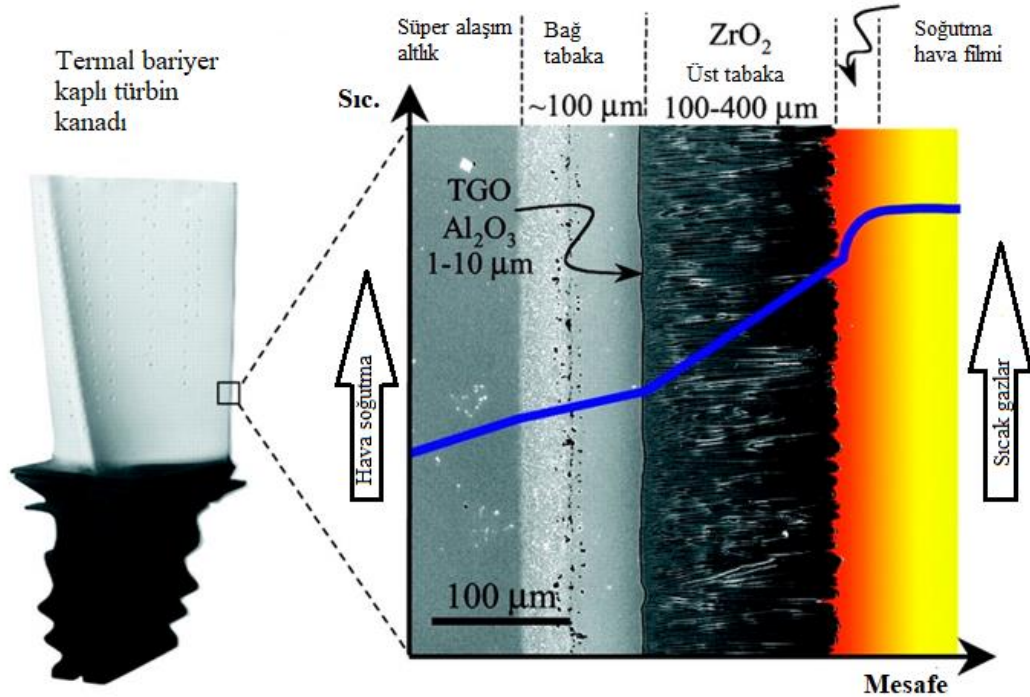
2.1.4. Seramik üst tabaka

Termal bariyer kaplama sistemlerinin bir parçası olan seramik üst kaplama, motorun çalışma koşullarında yüksek sıcaklıklara doğrudan maruz kalan bir katmandır. Termal bariyer kaplama katmanlarının en üst katmanı seramik üst kaplamadır. Ana işlevi sıcak gazlara ve motorun çalışma sıcaklığına dayanıklı bir koruma sağlayarak altındaki malzemeyi ve bağ kaplama tabakasını izole etmektir.

Bugüne kadar gelişmiş olan üst kaplamalar arasında en iyisi olarak görülen ve kullanım açısından en yaygın kullanılmakta olan seramik üst kaplama %6-8 itriyum

oksit ile stabilize edilmiş zirkonyum oksittir (YSZ). Bunun sebebi YSZ'nin düşük termal iletkenlik, yüksek termal genleşme katsayısı, aşınma ve korozyon direnci, termal ve kimyasal açıdan kararlı yapı gibi istenen özelliklere sahip olmasıdır.

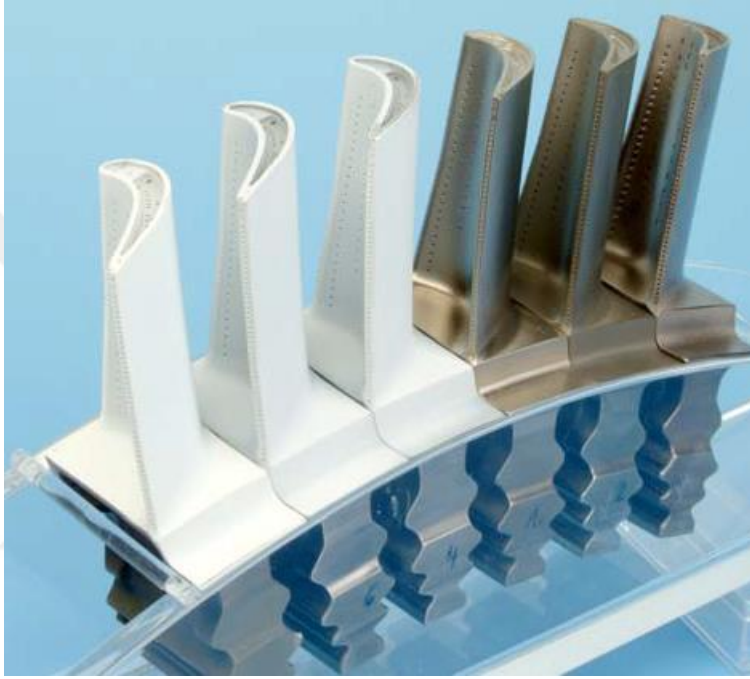
Zirkonya (ZrO_2), $25^\circ C$ ile $1170^\circ C$ arasında monoklinik kristal yapıya sahiptir ve artan sıcaklıkla birlikte $1170^\circ C$ ile $2370^\circ C$ arasında tetragonal yapıya, $2700^\circ C$ 'nin üzerinde ise kübik kristal yapıya dönüşür. Bu dönüşümler genellikle %3-5'lik bir hacim değişimine yol açar [14]. Bu durum kaplamanın bütünlüğüne hasar verir, bozar ve ömrünü kısaltır. Tetragonal ve kübik fazın stabilizasyonunu sağlamak için zirkonyaya magnezyum oksit (MgO), itriyum oksit (Y_2O_3), kalsiyum oksit (CaO) gibi oksitler eklenir. Bu eklemeler arasında uzun süre çalışma koşullarına dayanabilen itriyum oksit (Y_2O_3) en yaygın tercih edilenidir. Zirkonyum oksit, itriyum ile stabilize edildiğinde itriyum ile stabilize edilmiş zirkonyum oksit (YSZ) adını alır. Seramik esaslı kaplamanın ısı yalıtımı gibi görevlerini tam olarak yerine getirebilmesi için taban malzemeye sağlam bir şekilde yapışması oldukça önemlidir. Şekil 2.3'te sıcak gazların türbin kanadına olan mesafesine bağlı olarak sıcaklık değişimi gösterilmektedir.



Şekil 2.3. Termal Bariyer Kaplamaların Bileşimi [15].

2.2. Termal Bariyer KaplamaYöntemleri

Seramik ve diğer kaplama malzemeleri için birçok kaplama yöntemi mevcuttur. Termal spreycaplama işlemlerinde sıcaklık ve parçacık hızı gibi parametrelerin kontrolü ve istenen değer aralığında tutulması oldukça zor olabilir. Bu nedenle bu yöntemler yaygın olarak kullanılmasına rağmen; kaplamayı yöneten operatör, kaplamada kullanılan yöntem ve cihaz kaplamanın kalitesini dolayısıyla kullanıcıyı da etkileyebilir. Şekil 2.4'te TBK uygulanmış türbin kanatları görülmektedir.

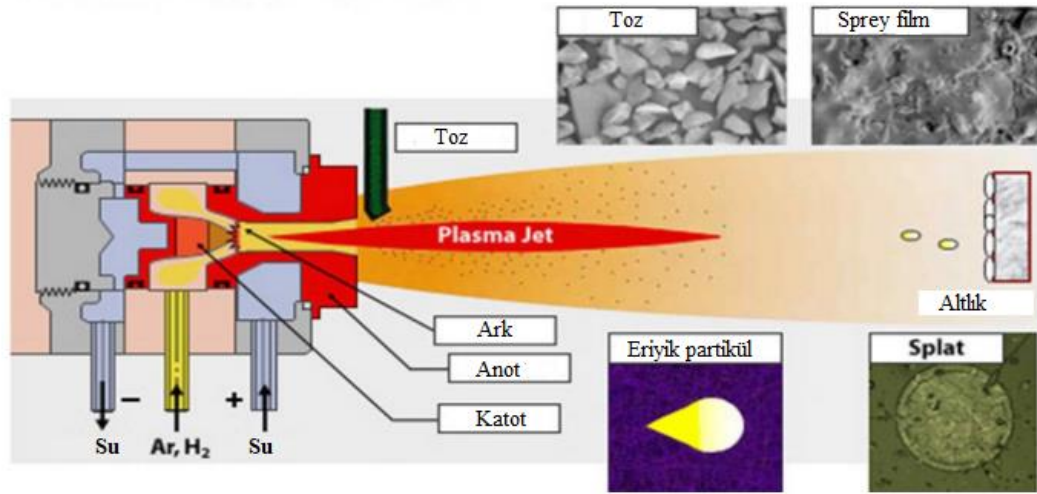


Şekil 2.4. Termal Bariyer Kaplama Uygulanmış Türbin Kanatları [16].

2.2.1. Plazma spreycaplama yöntemi

Metallerin korozyon, yüksek sıcaklık oksidasyonu ve aşınmaya karşı dirençlerinin artırılması seramik kaplamalarla sağlanabilir. Bu tür kaplamaların uygulanmasında plazma spreycaplama teknolojisi de kullanılabilir. Bu yöntem, hem bahsedilen direnç özelliklerini kazandırırken hem de ana metalin tokluk ve şekil değiştirme yeteneği gibi üstün özelliklerini korur. Böylece, metal ve seramik malzemelerin en iyi özelliklerinden birlikte faydalanılmış olur. Plazma spreycaplama, yüksek ergime derecesine sahip malzemelerin kaplanmasında kullanılan bir yöntemdir. Bu süreçte elektrik arkı nozula gönderilir. Kaplama işlemi, basınçlı inert gazların (argon, helyum, azot, hidrojen gibi) elektrotlar arasından geçirilmesiyle başlar. Gaz, çok yüksek sıcaklıklara ulaşarak plazma hâline dönüşür. Plazma spreycaplama sistemi; güç kaynağı, gaz kaynağı, spreycaplama tabancası ve toz besleme ünitelerinden oluşur.

Plazma sprej kaplama yönteminde sıcaklık 20.000 K'nin üzerine çıkabilir. Bu aşırı yüksek sıcaklık, kaplama malzemesinin ergimesini sağlar. Ancak bu süreçte altlık malzeme, yüksek sıcaklığa doğrudan maruz kalmadığı için mikroyapısında herhangi bir değişim meydana gelmez. Plazma sprej kaplama, plazmanın sağladığı bu yüksek sıcaklık sayesinde seramik, metal ve polimer gibi tüm malzeme türlerini kaplayabilme özelliğine sahiptir. Şekil 2.5'te plazma sprej yöntemi; kaplama prosesi, splat yapısı ve kullanılan tozun mikroyapısı ile birlikte şematik olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.5. Plazma Sprej Prosesinin Şematik Olarak Gösterimi [17].

Kaplama tozu, taşıyıcı gaz aracılığıyla plazmaya üst kısımdan beslenir. Bu süreçte taşıyıcı gazın debisi kritik bir rol oynar. Gaz debisinin düşük olması, tozun yeterince beslenememesine ve plazma içine aktarılamamasına neden olabilir. Aşırı yüksek gaz debisinde ise fazla miktarda toz beslenir, bu da partiküllerin tam olarak ergimemesine yol açabilir. Hatta bazı toz parçacıkları plazmanın altına geçip kaplamaya dahil olmayabilir, bu durum da prosesin verimliliğini olumsuz etkiler [17].

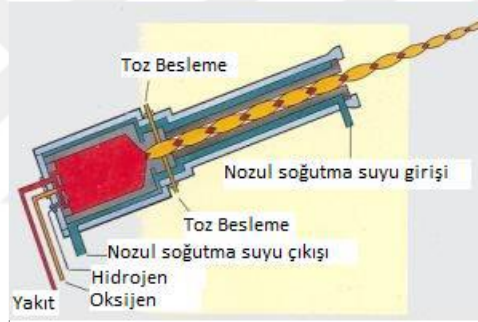
2.2.1.1. Atmosferik plazma sprej (aps) kaplama yöntemi

APS yöntemi, en yaygın kullanılan plazma kaplama tekniklerinden biridir. Bu yöntemde, tabancadan püskürtülen kaplama tozu, eriyik hale gelerek atmosferle reaksiyona girer ve kaplanacak yüzeye oksitlenmiş bir formda ulaşır. Plazma oluşturmak için genellikle argon, hidrojen ya da bu iki gazın karışımı kullanılır ve doğru akımı uygulanır. Kaplama tozu, inert bir gaz yardımıyla sisteme beslenir. Plazma tabancasının püskürtme hızı; kullanılan plazma gazları, toz besleme sistemi, tozun

boyut dağılımı ve tercih edilen sprej tabancasının tasarımı gibi faktörlere bağlıdır. [18].

2.2.1.2. Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme (hvof) yöntemi

Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme yöntemi, yüksek basınç altında oksijen ve yakıt gazlarının yanmasıyla çalışır. Bu süreçte, uzun bir nozul kullanılarak kaplama tozu hem ısıtılır hem de yüksek hızla yüzeye yönlendirilir. Kullanılan yakıt karışımları arasında propilen, propan, kerosen veya hidrojen gibi gazlar yer alabilir [19]. Yüksek hızlı oksijen yakıt püskürtme işlemi, parçanın yüzey özelliklerini iyileştirmek veya onarmak için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde erimiş veya yarı erimiş malzemeler, yüksek sıcaklık ve yüksek hızlı gaz akışıyla parçanın yüzeyine püskürtülerek son derece düzgün ve dayanıklı bir kaplama oluşturulur. Bu sayede parça daha dayanıklı hale gelir ve ömrü uzatılır. Şekil 2.6'da HVOF kaplama yöntemi şematize edilmiştir.



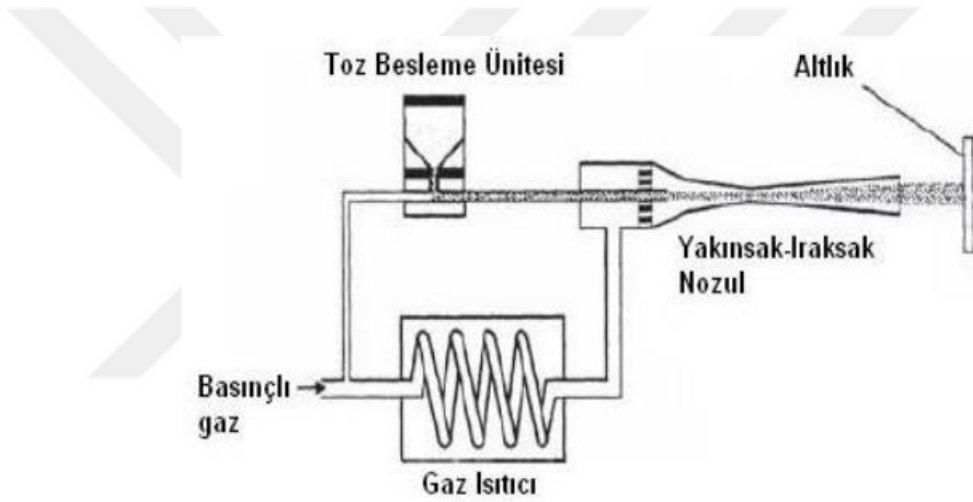
Şekil 2.6. HVOF Kaplama Yöntemi [19].

2.2.1.3. Soğuk sprej kaplama (cgds) yöntemi

CGDS (Soğuk Gaz Dinamik Sprej) tekniğinde kaplama işlemi, parçacıkların yüksek sıcaklık yerine yüksek hızda hareket etmesi prensibine dayanır. Bu sayede işlem sıcaklıkları, diğer termal sprej yöntemlerine kıyasla oldukça düşük seviyelere indirilebilir. Katı haldeki parçacıklar, genellikle 300-1200 m/s hız aralığında, ses hızını aşan "inert" bir gaz akımıyla ivmelendirilir. Biriktirme için gereken enerji, altlık yüzeyine çarpan parçacıkların sahip olduğu kinetik enerjiden sağlanır.

HVOF yönteminden farklı olarak CGDS tekniğinde, gaz sıcaklığı parçacıkların erimesini engelleyecek kadar düşük seviyelerde tutulur. Genellikle taşıyıcı gaz olarak kullanılan azot veya helyum, yaklaşık 700°C'ye kadar önceden ısıtılır. Bu ön ısıtmanın temel amacı, parçacıkların termal enerjisini artırmak yerine gaz akışının hızını yükselterek parçacıkların kinetik enerjisini artırmaktır.

Bu yöntemde, ısıtılan gaz, özel olarak tasarlanmış yakınsak ve ıraksak nozullara yönlendirilir. Bu nozullar sayesinde, gaz ile karışan parçacıklar ses üstü hızlara ulaştığından HVOF yönteminde olduğu gibi şok dalgaları oluşmaz. Taşıyıcı gaz ve parçacıklar, nozula yatay veya dikey olarak enjekte edilebilir. Nozul içinde gazlar karıştıktan sonra ani genleşme ile ivmelenir. Bu süreçte, gaz sıcaklığı hızla düşer ve parçacıklara ısı aktarımı gerçekleşmeden, spreyn tabancası içinde ısı enerjisi kinetik enerjiye dönüşür. Gaz ve parçacıklar ses üstü hızlara çıkmış olur. CGDS yönteminde, belirli bir kritik hıza ulaşamayan parçacıklar ya yüzeyden geri seker ya da altlık malzemedeki erozyona neden olur. Ancak, kritik hızın üstüne çıkıldığında, parçacıkların altlık yüzeyinde birikme oranı hız arttıkça yükselir. Şekil 2.7’de CGDS kaplama yöntemi şematik olarak gösterilmiştir [20].



Şekil 2.7. CGDS Kaplama Yönteminin Şematik Gösterimi [20].



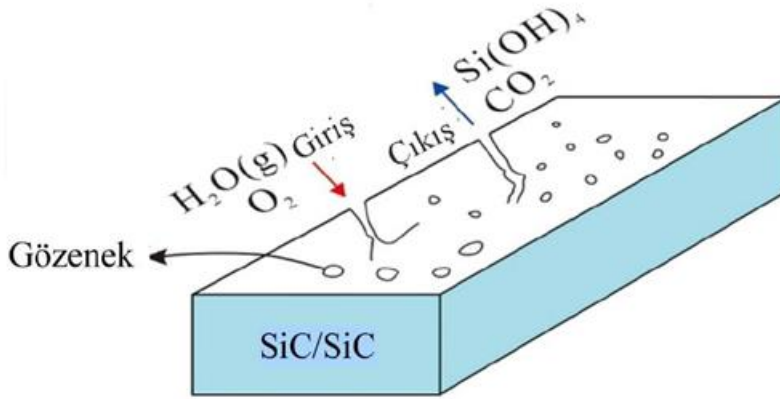
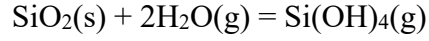
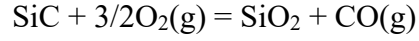
3. ÇEVRESEL BARIYER KAPLAMALAR

Çevresel bariyer kaplamalar (ÇBK), yüksek sıcaklığa ve çevre koşullarına maruz kalan malzemeleri korumak için kullanılan bir kaplama türüdür. Bu kaplama, altlığı su buharının ve bozulmaya yol açabilecek diğer çevresel faktörlerin aşındırıcı etkilerinden korunmak için tasarlanmış olup özellikle havacılık ve enerji sektörlerinde yüksek sıcaklık uygulamalarına yönelik geliştirilmiştir.

Gaz türbin motorlarının performansını arttırmak için motorların yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerinde kullanılan metal esaslı malzemeler, günümüzün sürekli ivmelenen teknolojisi için yetersiz kalmaktadır. Bu yetersizliğin önüne geçebilmek adına yüksek sıcaklığa karşı metalik malzemelerden daha dayanıklı malzemelere gereksinim duyulmaktadır. Gaz türbin motorlarının yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerinde kullanılan nikel esaslı süper alaşımlardan üretilen parçalar, yüksek sıcaklığa karşı dirençli ve düşük termal iletkenlik katsayısına sahip seramik esaslı TBK uygulanarak yapılmaktadır. Her ne kadar bu kaplamalar termal yalıtım amacıyla kullanılsa da 1200 °C ve üzeri sıcaklıklarda zamanla hasara uğrayarak yüksek sıcaklık değerlerinde yalıtım özelliğini kaybetmektedir [21]. Bu durum kaplamanın metalik parçaları yüksek sıcaklık etkisinden koruyamamasına neden olmaktadır. Silisyum esaslı seramikler ve silisyum kompozitleri, yüksek sıcaklıklarda sergiledikleri kararlılık ve dayanım ile gaz türbin motor parçaları üretiminde kullanılması kuvvetle muhtemel yeni nesil teknolojik gelişmelere yeni bir perspektif kazandırmıştır.

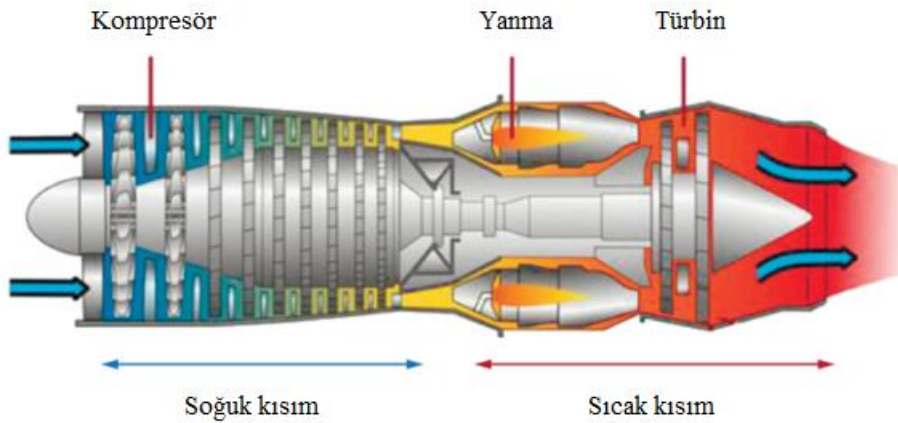
Silisyum tabanlı seramik malzemeler, metalik malzemelere kıyasla oldukça hafiftirler. Bu sayede gaz türbin motoru sistemleri daha az yakıt tüketerek daha fazla itme gücüne sahip olmaktadır. Bu duruma ek olarak, silisyum tabanlı malzemelerin yüksek sıcaklıklara karşı gösterdikleri üstün direnç ve oksidasyona karşı olan dayanım, mevcut motorlardan daha güçlü motorlar üretmeyi mümkün kılmaktadır. Bütün bu parametreler göz önünde bulundurulduğunda silisyum tabanlı malzemeler her ne kadar doğrudan kullanıma uygun görülse de yüksek sıcaklıklarda su buharı ile tepkimeye girmesi, yapının silisyum hidroksit $[Si(OH)_4]$ oluşturarak malzemenin yapısal

bütünlüğünü bozar ve uygulamalarda kullanışsız hâle getirir [22]. Bu sürecin kimyasal gösterimi aşağıdaki gibidir. Şekil 3.1’de de tepkime şematize edilmiştir.



Şekil 3.1. SiC/SiC Kompozit Altlığın Yüksek Sıcaklıkta Oksijen ve Su Buharı ile Tepkime Şeması [23].

Mühendislik perspektifinden bakıldığında, çevresel bariyer kaplamalar ile seramik matrisli kompozitlerin (CMC) bir arada kullanılması, seramik tabanlı gaz türbinlerinin üretimini mümkün kılan devrim niteliğinde teknolojiler olarak öne çıkmaktadır. Şekil 3.2’de gaz türbinin temel prensibi şematik olarak verilmiştir.



Şekil 3.2. Gaz Türbinin Temel Prensibi [24].

Yanma odaları bağlamında ÇBK malzemelerin çalışma sıcak aralığını genişletmek açısından büyük bir öneme sahiptir. Örneğin ileri gaz türbinli motor sistemlerinde,

seramik matrisli kompozit yanma odası kaplamaları ile kanatçıkların oksitleyici ve su buharı içeren yanma ortamlarında 1650 °C'ye kadar çalışma sıcaklığını arttırmak amacıyla ÇBK geliştirilmektedir. Böylece motorun düşük emisyon ve yüksek verimlilik hedeflerine ulaşmasına yardımcı olur. [25].

Çevresel bariyer kaplamalar için kullanılan malzemeler, yüksek sıcaklıklara ve aşındırıcı ortamlara dayanma yeteneklerine göre seçilmektedir. İtriya ile stabilize edilmiş zirkonya (YSZ) ve baryum stronsiyum alüminosilikat (BSAS) gibi seramik malzemeler, yüksek korozyon dirençleri ve termal kararlılıkları nedeniyle uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılır. Bu malzemeler tipik olarak elektron ışınyla fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD), atmosferik plazma püskürtme (APS) ve kimyasal buhar biriktirme (CVD) gibi teknikler kullanılarak yanma odası bileşenlerinin yüzeyinde biriktirilir [26-27]. Düşük maliyetli püskürtme yöntemleriyle uygulanabilirliği, bu kaplama türünü daha da cazip kılmaktadır. Özetle çevresel bariyer kaplamalar uygulanacağı alan için aşağıdaki gibi bazı koşulları sağlamalıdır.

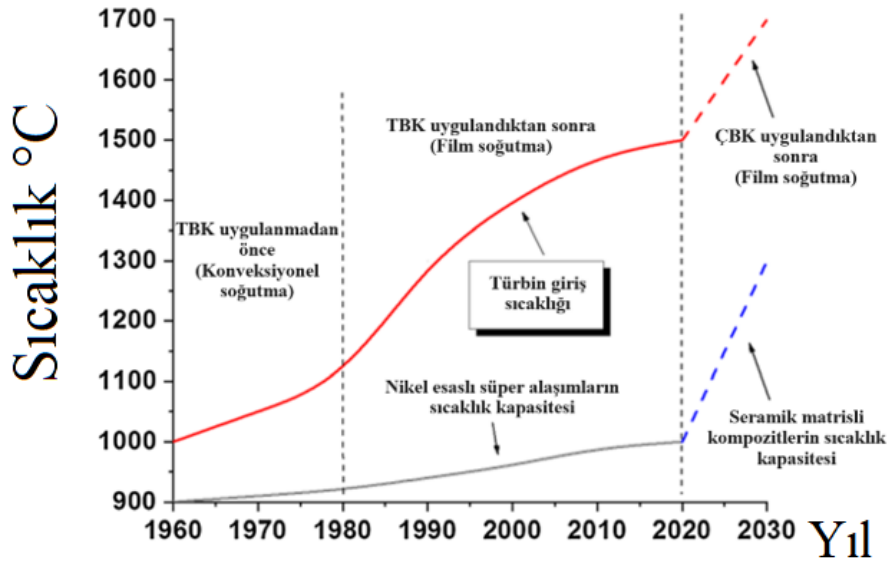
- Çevresel Stabilité (su buharına dayanıklılık, korozyon direnci),
- Yüksek sıcaklıklarda kaplama tabakalarının kimyasal uyumluluğu,
- Yüksek yapışma kabiliyeti,
- Düşük termal iletkenlik,
- Düşük kalıntı gerilme [28].

Çevresel bariyer kaplama malzemeleri için bu özelliklerin tümünün sağlanması istense de bütün özellikleri tek bir malzemede elde etmek mümkün değildir. Bu bilginin ışığında günümüzde geliştirilmekte olan kaplamaların odağı, çok katmanlılık ve işlevsellik olarak belirlenmiştir.

3.1. Çevresel Bariyer Kaplamaların Gelişimi

Günümüzde havacılık ve enerji üretim sektörleri için gaz türbin motorları, hızla büyümekte olan bir sahanın temelini oluşturmaktadır. Endüstrideki bu küresel artış, üretim süreçlerinin daha verimli ve kaliteli olmasını gerektirmektedir. İlk seramik matris kompozit bileşeninin 2016 yılında ticari bir motorda hizmete girmesinden sonra yapılan gözlemler ve analizler, bu gelişmenin devrim niteliğinde bir teknolojiye kapı araladığını göstermiştir. 2017-2031 yılları arasında dünyada gaz türbini motorlarının toplam satışına ilişkin portföyün 2 trilyon \$ olacağı tahmin edilmektedir [22].

Gaz türbin motorlarına gösterilen ilginin artması bu teknolojinin geliştirilmesini zorunlu kılmıştır. Uygulamalarda kullanılmak için geliştirilip üretilen seramik matrisli kompozitler ve bu kompozitleri çevresel etkenlerden, su buharından koruyan ÇBK bu ilginin ürünleridir. Seramik matrisli kompozitlerin piyasada kullanılması, yakıt tüketimini iki katına kadar azaltabilmeyi mümkün kılmaktadır. Bununla birlikte CMC'in hafif yapıları türbin bileşenlerinin ağırlığında da %50'den fazla azalmaya imkan sağlamaktadır [29]. Şekil 3.3'de gaz türbinlerinin yanma sıcaklığı kabiliyet gelişim grafiği gösterilmiştir.



Şekil 3.3. Gaz türbinlerinin yanma sıcaklığı kabiliyeti gelişimi [30].

3.2. Bir Kaplama Yaklaşımı Olarak Termal ve Çevresel Bariyer Kaplamalar

Çevresel bariyer kaplamalar ile termal bariyer kaplamalar bazı farklılıklar içermektedir. ÇBK ve TBK arasındaki önemli farklardan biri yüksek sıcaklık koşulları altındaki davranışlarıdır. ÇBK yüksek sıcaklıktaki gazların ve sıvıların aşındırıcı etkilerine dayanacak şekilde tasarlanırken, TBK sıcak gaz yolu ile altta yatan alt tabaka arasındaki ısı transferini azaltmak için tasarlanmıştır.

Aşınma direnci açısından. ÇBK genellikle katı partikül aşınmasına karşı TBK'den daha hassastır. Bunun nedeni ÇBK'in daha yüksek poroziteye ve daha açık bir mikroyapıya sahip olmasıdır. Bu da partiküllerin nüfuz etmesine ve zarar vermesine olanak tanır [31]. Öte yandan TBK daha yoğun bir mikroyapıya sahiptir ve katı partikül aşınmasına daha az yatkındır.

Termal şok direnci açısından TBK genellikle termal şoka karşı ÇBK'den daha dayanıklıdır. Bunun nedeni TBK'nin ÇBK'ye göre daha düşük termal genleşme katsayısına sahip olmasıdır, bu da kaplama üzerindeki termal stresi ve gerilimi azaltır [32-33].

3.3. Çevresel Bariyer Kaplamalarda Nesil Kavramı

Çevresel bariyer kaplamalar özellikle yeni nesil uygulamalara yönelik gelişmiş gaz türbinlerinin geliştirilmesinde önemli bileşendir. “Nesil” terimi, ÇBK'nin zaman içindeki gelişimini ifade etmekle birlikte bu kavramın adı altındaki her nesil performans ve dayanıklılıkta önemli iyileştirmeleri temsil etmektedir. ÇBK üç nesil bağılığı altında incelenmektedir.

3.3.1. Birinci nesil çevresel bariyer kaplamalar

Birinci nesil çevresel bariyer kaplama tanımı, genelde ilk kez geliştirilen ve uygulanan kaplama teknolojilerini ifade etmek için kullanılmaktadır. Bu kaplama sınıfı için kullanılan malzemeler mullit, YSZ, BSAS (Baryum Stronsiyum Alüminyum Silikat) tır [34]. Birinci nesil ÇBK'nin tarihçesi, 1990'lardaki ilk geliştirilme dönemlerinden itibaren mullit ve BSAS'ı içermekte ve 2000'li yılların başında nadir toprak silikatlarının tanıtılmasına kadar uzanmaktadır [22].

NASA'nın Yüksek Hızlı Araştırma-Tahrik Malzemeleri Programı (HSR-EPM) kapsamında geliştirilen birinci nesil çevresel bariyer kaplamaları iki katmandan meydana gelmekteydi. Bu katmanlar bir mullit ($3Al_2O_3-2SiO_2$) bağ katmanı ve YSZ (ZrO_2 -%8 ağırlıkça Y_2O_3) üst katmanından oluşmaktadır. Bu ÇBK ilk tasarımlara göre kayda değer gelişmeler gösterdi fakat performans ve dayanım açısından hâlâ sınırlara sahipti [35].

3.3.2. İkinci nesil çevresel bariyer kaplamalar

İkinci nesil çevresel bariyer kaplamalar, birinci nesil kaplamaların özelliklerinin geliştirilerek ve yeni teknolojilerin kullanımıyla daha ileri düzeyde performans sağlaması amacıyla ortaya çıkmıştır.

İlk ÇBK süreç denemelerinden bu yana elde edilen etkileyici ilerlemelere rağmen, mullit ve BSAS esaslı sistemlerin beklentileri karşılayamayacağı kısa sürede farkedildi. Bu beklentilerin karşılanması ve başarılı bir ÇBK sisteminin oluşturulabilmesi için birkaç temel kriter belirlendi.

İlk olarak, katmanlar ile SiC (Silisyum Karbür) altlık arasında termal genleşme katsayısı açısından uyumluluk, termal gerilmeleri ve çatlakların oluşumunu önlemek için oldukça elzemdir.

İkinci olarak, kaplamanın yüksek sıcaklığa maruz kalması sırasında herhangi bir faz dönüşümüne uğramaması gerekmektedir. Eğer bir faz dönüşümü gerçekleşirse, ilgili polimorfiklerin termal genleşme katsayısının sayısal değeri olarak birbirlerine yakın olması ve olabilecek en düşük miktarda hacimsel değişim gerçekleşmesi beklenmektedir.

Üçüncü olarak, çevresel bariyer kaplamaların farklı koşullar altında düşük silika faaliyetine sahip olması beklenmektedir; bu koşullar kuru ya da nemli ortamları içerebilir.

Son olarak, çok katmanlı sistemlerin gerekliliğini vurgulayan ve destekleyen deneysel kanıtların ışığında, farklı katmanların ilgili kompozisyonları arasında kimyasal uyumluluk bulunmalıdır. Bu uyum, arayüzelerde istenmeyen ve zararlı tepkime ürünlerinin oluşmasını önler. Aksi hâlde ÇBK'nin yapısal bütünlüğü risk altına girer ve kaplamanın koruyuculuğu sektöre uğrar [22].

Mullit ve BSAS'ın hedeflenen yüksek performans için ideal seçenekler olmadığı anlaşıldıktan ve bir sonraki nesil için bir gereklilik listesi oluşturulduktan sonra, NASA 1999 yılında bir araştırma programı başlattı [36]. Ultra Verimli Motor Teknolojisi adı verilen bu proje, çevresel bariyer kaplama ile SiC altlık arayüzünde 1316°C (2400°F) ve çevresel bariyer kaplama yüzeyinde binlerce saat boyunca 1482°C (2700°F) dayanım gösterebilen birincil malzemeleri belirlemek için kapsamlı bir araştırma ve tarama testleri yürütmeyi hedefliyordu [37]. Bu program, nadir toprak silikatları adı altında sınıflandırılan ve umut verici özelliklere sahip yeni bir malzeme ailesini tanımladı. Nadir toprak silikatları içerisinde nadir toprak monosilikatları (RE_2SiO_5 , RE: nadir toprak elementi) ve nadir toprak disilikatları ($RE_2Si_2O_7$) olmak üzere iki ana bileşim bulunmaktadır. Uygun aday olarak belirlenen nadir toprak silikatları arasında skandiyum (Sc), lutesyum (Lu), iterbiyum (Yb), itriyum (Y) ve erbiyum (Er) gibi nadir elementler içeren gruplar yer alır [22]. Nadir toprak silikatları ile altlık malzeme arasında herhangi bir uyumsuzluk tespit edilememesi ve termal genleşme katsayılarının yakın olması, bu malzemelerin tercih edilmesinde etkili olan

yönelimleri ciddi anlamda kuvvetlendirdi. Bu ÇBK birinci nesil kaplamalara kıyasla daha iyi performans ve dayanıklılık gösterdi ancak yine de bazı sınırlamaları vardı.

3.3.3. İleri (yeni) nesil çevresel bariyer kaplamalar

Nadir toprak silikatların çevreye ve aşındırıcı etkilere karşı koruma sağlama açısından son dönemdeki başarılarına rağmen yeni yaklaşımlar, günümüz bilimi tarafından araştırılmaya devam edilmektedir. Yeni nesil ÇBK, gelişmiş gaz türbinlerinin zorlu çalışma koşullarına karşı dayanım gösterebilecek malzemeler ve mimariler geliştirmeye odaklanmaktadır. Bu malzeme sınıfı araştırmalarına $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ gibi yeni nesil nadir toprak silikatlar ve $\text{HfO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ nano kompozit filmleri gibi katmanlı ÇBK mimarileri örnek verilebilir [38,39,40]. SiC ve çeşitli termal bariyer kaplama malzemelerinin termal genleşme katsayı değerleri Tablo 3.1’de gösterilmiştir.

Tablo 3.1. Çeşitli Termal Bariyer Kaplama Malzemelerinin TGK Değerleri [41,42,43,44,45].

Malzeme	Ortalama TGK ($\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)
Y_2SiO_5	5-6
Er_2SiO_5	5-7
Yb_2SiO_5	3.5-4.5
Si	3.5-4.5
SiC, SiC/SiC	4.5-5.5
Mullite	5-6
BSAS (monoclinic)	4-5
BSAS (hexagonal)	7-8
Si_3N_4	3-4
Malzeme	TGK ($\times 10^{-6}/\text{K}$)
Al_2O_3	9.6
ZrSiO_4	4.99
Y_2O_3	8.1
C/C	2.7

3.4. Çevresel Bariyer Kaplamalar İçin Üretim Yöntemleri

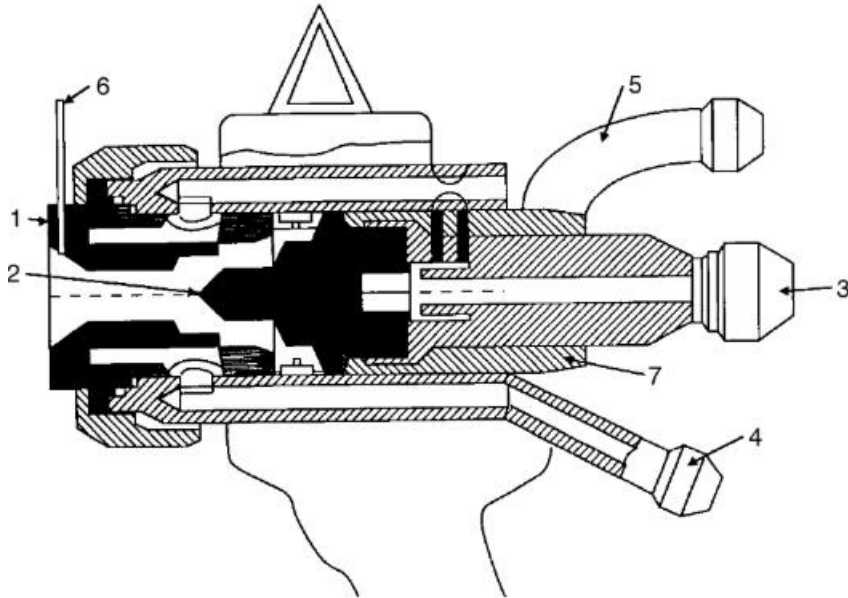
Çevresel bariyer kaplamaların mekanik, fiziksel, kimyasal ve diğer özelliklerinin belirlenmesi, bu kaplamaların üretiminde kullanılan yöntemle doğrudan bağlantılıdır.

3.4.1. Atmosferik plazma sprej (aps)

Atmosferik plazma sprej çevresel bariyer kaplama üretim yöntemleri arasında oldukça yaygın şekilde kullanılan bir tekniktir. Bu yöntem, seramik matris kompozitleri

üzerine çevresel bariyer kaplama biriktirmek için kullanılan bir termal püskürtme teknolojisidir ve yüksek sıcaklıkta yanma ortamlarında su buharı aşınmasına karşı koruma sağlar.

APS yöntemi; yoğun, çatlak içermeyen ve iyi yapışma özelliği gösteren kaplamalar üretebildiği için çevresel bariyer kaplama biriktirilmesinde özellikle etkilidir. İşlem, çevresel bariyer kaplama malzemesini altlığa taşıyan, tipik olarak argon, hidrojen, helyum, nitrojen gibi bir gazı hızlandırmak ve iyonize etmek için bir plazma torcunun kullanılmasını içerir. Plazma püskürtme işlemi, stabilite ve termal genleşme özellikleriyle bilinen iterbiyum silikatlar (Yb_2SiO_5 ve $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) dahil olmak üzere çok çeşitli çevresel bariyer kaplama malzemelerinin biriktirilmesine olanak tanımaktadır [21,46,47,48]. Şekil 3.4'te plazma torcunun bölümleri şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.4. Plazma Torcu Bölümlerinin Şematik Gösterimi: (1) anot; (2) katot; (3) su çıkış ve katot konnektörü; (4) su giriş ve anot konnektörü; (5) çalışma gaz girişi; (6) toz enjektörü; (7) elektrik yalıtkanı [49].

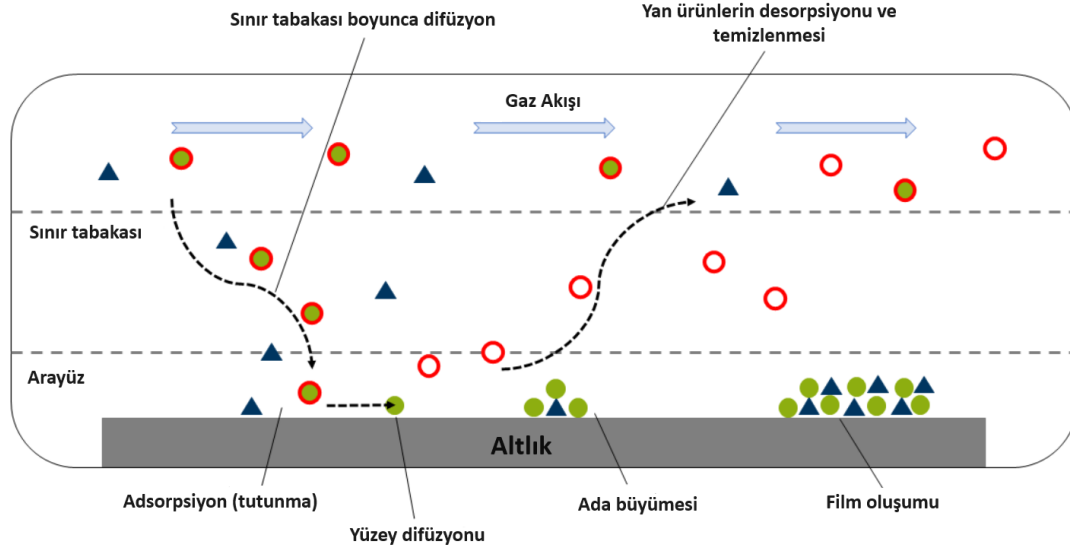
APS yöntemi, çevresel bariyer kaplama biriktirme için önemli avantajlara sahiptir.

- Yüksek biriktirme oranı: APS, yüksek oranda çevresel bariyer kaplama biriktirme kabiliyetine sahiptir. Bu durum onu büyük ölçekli endüstriyel uygulamalar için uygun bir teknik haline getirmektedir [48].

- İyi yapışma özelliği: APS kaplamaları, çevresel bariyer kaplamaların uzun vadeli performansı için alt tabakaya iyi bir şekilde yapışmaktadır [51].

Bu yöntemde altlık, bir işlem odasına yerleştirilir ve kaplama malzemesinin bir veya daha fazla gaz halindeki öncüsü oda içinde püskürtülür. Öncü, altlık yüzeyinde tepkimeye girerek ya da ayrışarak istenilen kaplama fazını oluşturur. Kaplama, uygulanan metalin içe doğru difüzyona ve karışım fazlarının oluşumu ile meydana gelir. Bu nedenle bu kaplama yöntemi, “difüzyon kaplamaları” olarak da adlandırılmaktadır [47].

Bu yönteminde kendi içinde dezavantajları vardır. Yüksek sıcaklık değerlerinin, uygun doymuş atmosferlerin ve yavaş birikim hızlarının aynı anda bulunma gerekliliği, bu işlemi oldukça karmaşık ve ekonomik açıdan pahalı bir hâle getirir. Buna ek olarak, işlem boyunca zehirli ve zararlı gazların ortaya çıkışı, bu işlemi canlı sağlığı için tehlikeli ve dikkat edilmesi gereken bir işlem kılmaktadır [48]. Öte yandan ayrıntılı işlem tasarımı, kaplama süresi, paket bileşimi ve sıcaklık gibi kaplama parametrelerini etkileyerek elde edilen kaplama özelliklerinin hassas bir şekilde kontrol edilmesini sağlar. Şekil 3.6’da kimyasal buhar biriktirme prosesinin adımları gösterilmiştir.



Şekil 3.6. Kimyasal Buhar biriktirme Prosesinin Tipik Adımlarının Şematik Gösterimi [53].

3.4.3. Sol-jel yöntemi

Çevresel bariyer kaplama üretim mekanizmalarından biri de sol-jel yöntemidir. Bu yöntemde kaplama malzemelerini içeren tepkinenler, istenmekte olan bileşimlerde karıştırılır ve bu karışımdan bir jel hazırlanır. Kaplanmak istenen malzeme, hazırlanan bu jelin içine belirli bir hızda ve sürede batırılıp çıkartılır. Altlık malzeme yüzeyine tutunan jel ise kaplamayı oluşturur. Bu işlemden sonra, kaplama sinterlenir ve altlığa

daha kuvvetli yapışması ve homojen bir kaplama katmanı elde edilmesi sağlanır [21]. Bu kaplama yöntemi, termal ve çevresel bariyer kaplamalar da dahil olmak üzere çeşitli uygulamalar için onu cazip bir yöntem haline getiren çok sayıda avantaj sunmaktadır.

Sol-jel yöntemi yüksek saflığa, yüzey alanına, gözenekliliğe ve reaktiviteye sahip homojen malzemelerin üretilmesine olanak sağlamaktadır. Bu termal veya çevresel bariyer kaplamalar gibi tekdüze özelliklerin önemli olduğu uygulamalar için özellikle önem arz etmektedir [54,55].

Sol jel yöntemi, üretilen nihai kaplamanın özelliklerini daha etkin hâle getirmek için bir gereklilik olan parçacık boyutu ve şekli kontrolünü sağlamaktadır.

Sol jel yöntemi, fiziksel buhar biriktirme ve kimyasal buhar biriktirme gibi diğer üretim yöntemlerine kıyasla daha basit bir süreçten oluştuğundan, görece daha ucuz malzeme kullanıldığından ve karmaşık ekipman gerektirmediğinden diğer kaplama yöntemleriyle karşılaştırıldığında genellikle uygun maliyetlidir [52,56].

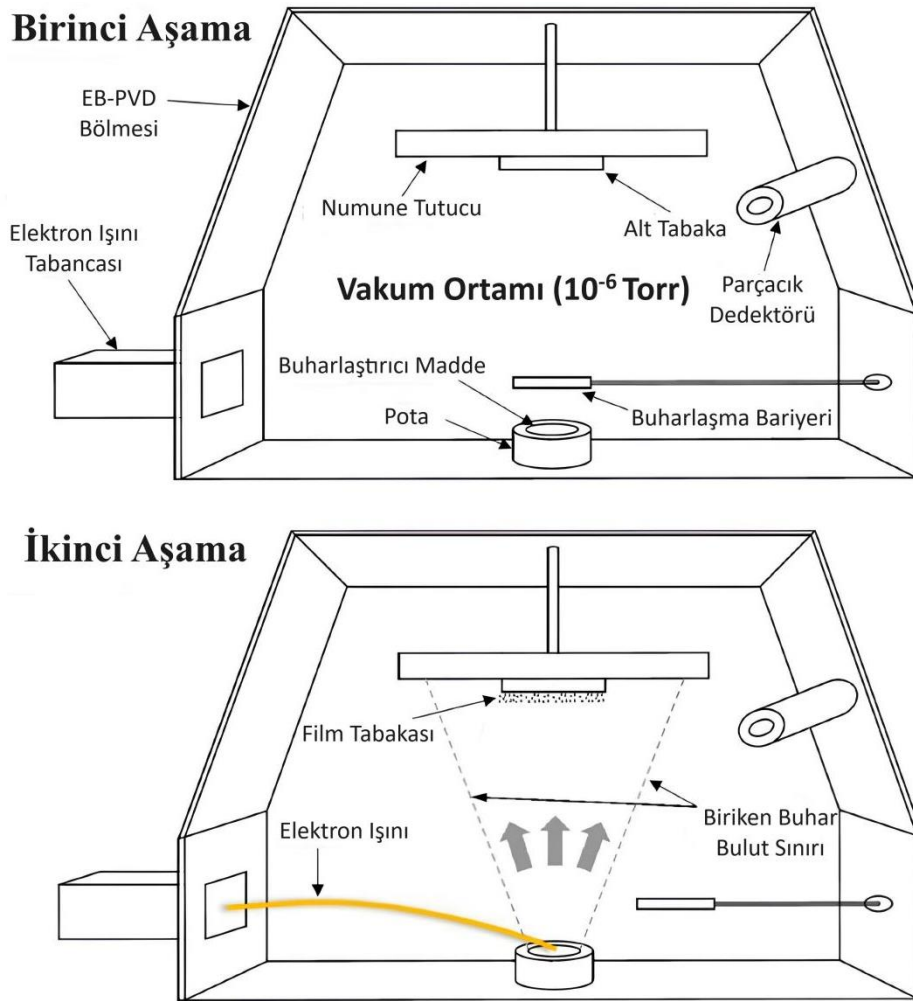
Sayılan avantajlara karşın bu yöntemde kaplama kalınlığının kontrolünün zor olması, ince ve mekanik özellikleri düşük kaplamaların elde edilmesi ve sinterleme işleminin zorunlu olması bu sürecin göz ardı edilemez dezavantajlarından [21].

3.4.4. Elektron demeti fiziksel buhar biriktirme (eb-pvd)

Elektron demeti fiziksel buhar biriktirme (EB-PVD) yöntemi, çevresel bariyer kaplama üretmek için kullanılan bir diğer tekniktir. Bu yöntemde yüksek sıcaklık ve vakum ortamında, kaplamayı oluşturacak malzemeye enerji verilerek malzemenin gaz fazına geçmesi sağlanır. Buharlaşan malzeme altlık katmanının yüzeyinde yoğunlaşarak birikir ve kaplamayı oluşturur.

EB-PVD, diğer kaplama biriktirme yöntemlerine göre çeşitli avantajlar sunmaktadır. Bu yöntem istenilen kolonlu mikroyapıya sahip kaplamalar üretmek için oldukça elverişlidir. Mikroyapıdaki kolonların arasındaki boşluklar, TGK uyumsuzluğunun giderilmesine fayda sağlamaktadır [21]. Bu durum kaplamaların termal ve mekanik özelliklerini artırır. Ayrıca EB-PVD kaplamalar daha iyi gerilme dayanımı gösterir ve termomekanik gerilmeleri diğer yöntemlerden daha etkili bir şekilde tolere eder [57,58].

Avantajlarına rağmen, EB-PVD yönteminin kullanım için bazı sınırlamaları vardır. Bu kaplama yöntemi, düşük verimliliğinden ötürü altlığın tamamen kaplanmamasına ve doğal olarak altlığın korozyon mekanizmalarına maruz kalmasına sebep olabilir. Ayrıca bu yöntem düşük verimlilik ile çalışmasına karşın diğer yöntemlere nazaran yüksek sermaye maliyetlerine sahiptir. Bu sınırlamalar onu büyük ve karmaşık işlemler için daha az uygun hâle getirmektedir. Şekil 3.7’de EB-PVD ekipmanı şematik olarak gösterilmiştir.

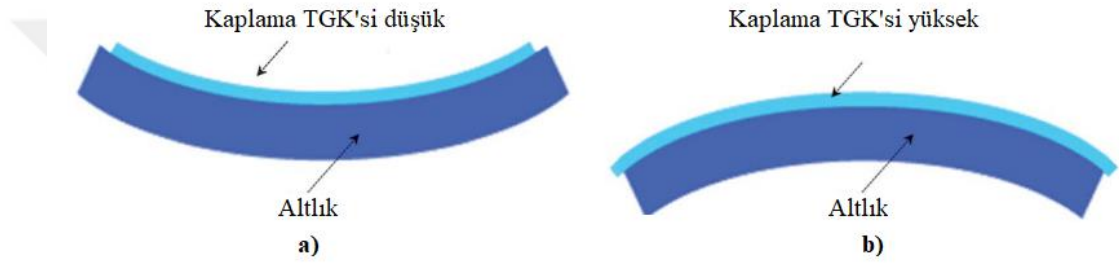


Şekil 3.7. EB-PVD Ekipmanının Şeması (Aşama 1) ve Kaplama İçin Film Üretimi [59].

3.5. Çevresel Bariyer Kaplamalardan Beklenen Özellikler

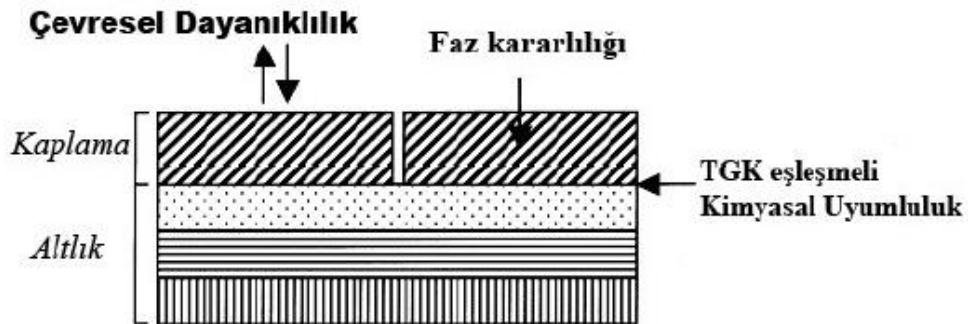
Kaplama malzemesi seçerken dikkat edilmesi gereken bazı önemli etkenler vardır. Bunlardan biri kaplama malzemesinin zorlu çevresel koşullara dayanıklı olması ve oksijen geçişinin az olmasıdır. Bir diğeri termal genleşme uyumsuzluğunun gözlenmemesi için kaplama malzemesi ile altlık malzemesinin termal genleşme

katsayı değerleri olabildiğince yakın olmasıdır [60]. Eğer kaplama malzemesinin termal genleşme katsayısı altlık malzemeye göre daha yüksekse, ısıl genleşme farkı nedeniyle kaplama yük altında kalarak dışbükey bir eğilme gösterecektir. Bunun tersine, altlık malzemesinin termal genleşme katsayısı daha yüksek olduğunda, kaplama bu genleşmeye ayak uyduramayarak içbükey bir eğilme ve çatlama/kırılma gibi yapısal hasarlar meydana gelecektir. Bu tür sorunların önüne geçmek ve kaplama sisteminin uzun ömürlü bir performans sergilemesini sağlamak için, termal genleşme katsayıları birbirine yakın malzemeler tercih edilmeli ve bağlayıcı bir kaplama kullanılmalıdır. Şekil 3.8’de kaplama ile altlık arasındaki TKG uyumsuzluğunun yaptığı etki şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.8. Kaplama ile altlık arasındaki TKG uyumsuzluğunun etkisi a) Kaplama çekme gerilmesi altında, iç bükey b) Kaplama basma gerilmesi altında, dışbükey [61].

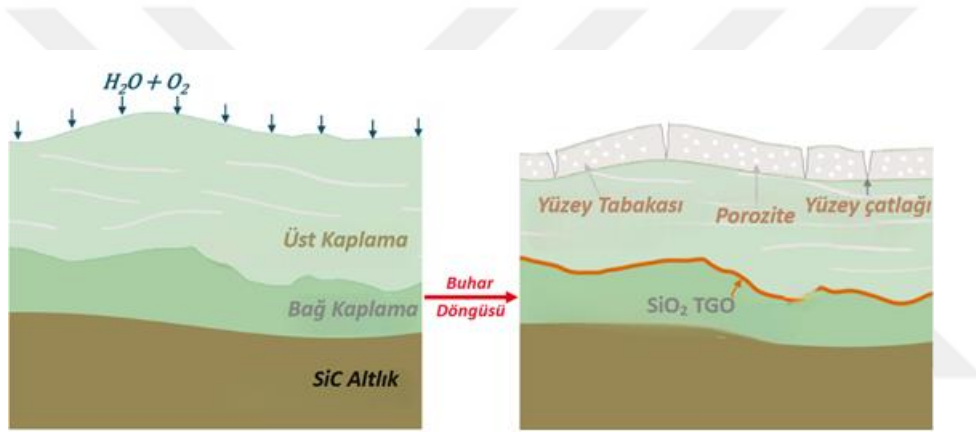
Üçüncü bir unsur, kaplamanın yüksek sıcaklıklarda stabil bir fazda kalması gerekir. Faz değişimleri genellikle hacim değişiklikleriyle birlikte gerçekleşir ve bu durum da kaplamanın parçalanmasına yol açar. Diğer bir unsursa, kaplama malzemesinin altlık ile kimyasal tepkimeye girerek kaplamanın bozulmasına neden olmaması gerekir. Şekil 3.9’da kaplama malzemesi seçiminde dikkat edilmesi gereken konular şematik olarak gösterilmiştir.



Şekil 3.9. Kaplama malzemesi seçiminde dikkat edilmesi gereken konular [60].

3.6. Çevresel Bariyer Kaplamalarda Su Buharı Etkileşimi

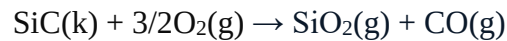
Silisyum karbür esaslı seramik matrisli kompozitler (SiC-CMC), düşük yoğunlukları ve yüksek sıcaklıklarda üstün mukavemet özellikleri sayesinde, gelişmiş gaz türbinlerinin sıcak bölge bileşenlerinde tercih edilmektedir. Fakat gaz türbinlerindeki yanma atmosferi yaklaşık %5-10 oranında su buharı içermekte ve bu su buharı silika tabakasıyla tepkimeye girerek uçucu ürünler oluşturmaktadır [62]. Bu durum, SiC-CMC yapısının bütünlüğünü bozarak kompozitin işlevselliğini kaybetmesine yol açmaktadır. Bu sorunu önlemek amacıyla çevresel bariyer kaplamalar geliştirilmiştir. Bu kaplamalar, kompozitlerin yanma ortamıyla temasını engellemenin yanı sıra, su buharı ile olan tepkimeleri de önlemeyi amaçlamaktadır [63]. Şekil 3.10'da su buharı ve oksidasyonun neden olduğu hasar şematize edilmiştir.



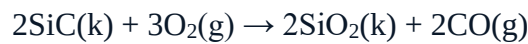
Şekil 3.10. Buhar döngüsü sırasında su buharının ve oksidasyonun etkileri altında yüzey çatlamasına bağlı olarak üst kaplama yüzeyinde kaplamanın parçalanması nedeniyle içsel hasar mekanizması [64].

3.6.1. SiC- su buharı etkileşimi

Silisyum karbürün oksidasyonu, oksijen konsantrasyonuna bağlı olarak aktif veya pasif şekilde gerçekleşir. Aktif oksidasyon, bir barın altındaki oksijen basıncında aşağıdaki denklem doğrultusunda meydana gelir [65].

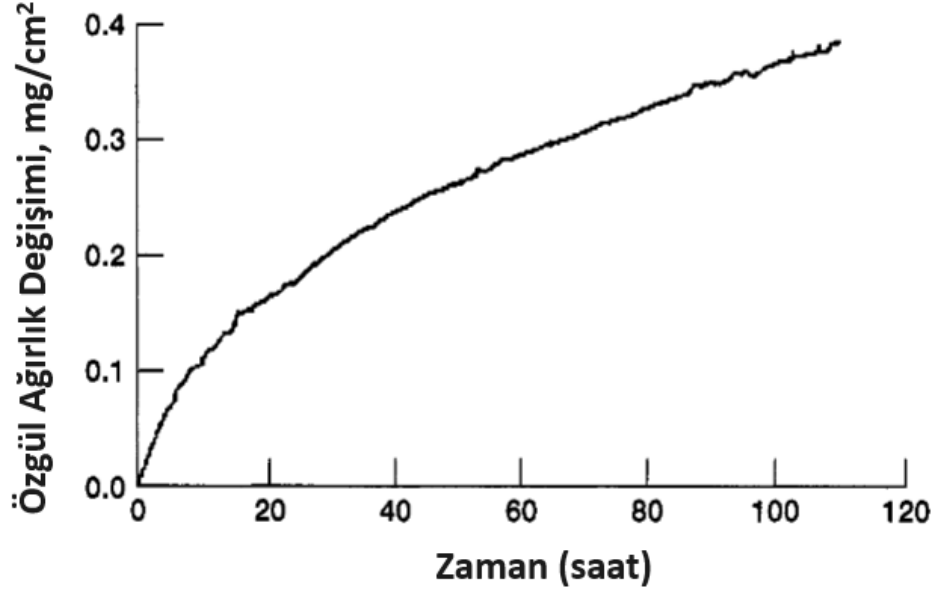


Pasif oksidasyonsa yaklaşık bir bar oksijen basıncında aşağıdaki reaksiyondaki gibi meydana gelir [65].



Pasif oksidasyon sırasında SiO_2 bileşiği oluşur ve SiC altlığın üstüne birikerek kütle artışına yol açar. Şekil 3.11'de bu kütle artışı grafikte gösterilmiştir. Daha düşük

sıcaklıklarda oluşan SiO_2 'nin SiC yüzeyinde bir tabaka oluşturduğu ve SiO 'ya dönüşerek daha yüksek sıcaklıklarda oluşan yıkıcı oksidasyona karşı koruyucu özellik sağladığı raporlanmıştır [65]. Bu koruyucu etki, SiO_2 'nin erime noktasına kadar devam etmektedir. Şekil 3.11'de Silisyum karbürün 1300°C deki zamana bağlı oksit kalınlığındaki artış grafiği verilmiştir.



Şekil 3.11. Silisyum karbürün 1300°C deki zamana bağlı oksit kalınlığındaki artışı [66].

3.6.2. Kaplama – su buharı etkileşimi

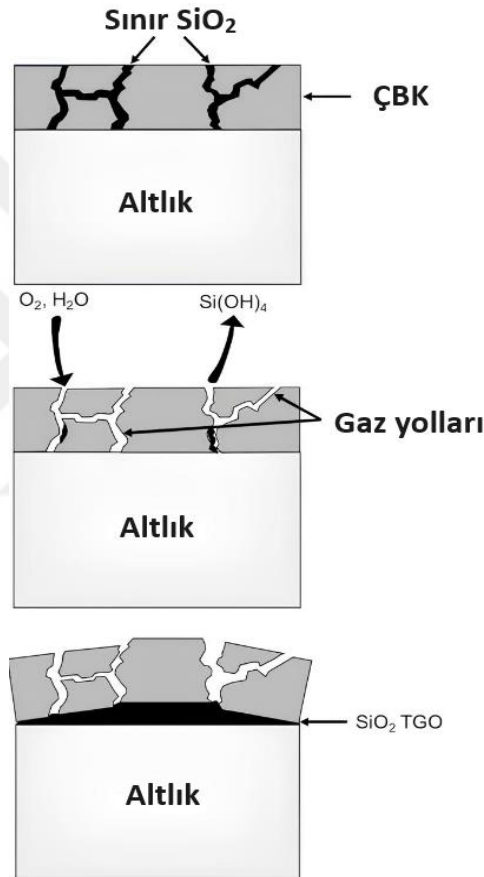
Su buharı korozyonuna karşı silisyum karbürün korunması için yüzeyine koruyucu kaplamalar uygulanması gerekmektedir. Bu ihtiyaç doğrultusunda çevresel bariyer kaplamalar tasarlanmıştır.

Çevresel bariyer kaplamalarının su buharıyla etkileşimini inceleyen çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Örneğin, 1400°C sıcaklıkta su buharına maruz bırakılan iterbiyum silikatların (Yb_2SiO_5 ve $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$) korozyon davranışını ele alan bir çalışma, su buharının kaplama yüzeyinde korozyon ve reaksiyon katmanlarının oluşmasına neden olduğunu ortaya koymuştur [67]. HfSiO_4 çevresel bariyer kaplamalarının yüksek sıcaklıkta su buharı ve oksijen atmosferine maruz kalması üzerine yapılan bir başka araştırma, su buharının etkisinin artmasıyla korozyon oranında da bir artış gözlemlendiğini ortaya koymuştur [68].

Su buharının çevresel bariyer kaplamalarla etkileşimi, malzeme özelliklerinin yanı sıra işleme koşullarından da etkilenebilir. Örneğin, alüminyum infiltrasyonu ile ÇBK'nin

yoğunlaştırılması üzerine yapılan bir araştırma, yoğunlaştırma işleminin ardından kaplamaların su buharına karşı direncinin belirgin şekilde arttığını göstermiştir [69].

Sonuç olarak, çevresel bariyer kaplamaların su buharı ile etkileşimi, birden fazla faktörün etkilediği karmaşık bir süreçtir. Bu etkileşimlerin daha iyi anlaşılması, yüksek sıcaklık uygulamalarına dayanıklı ve altındaki malzemeleri korozyon ile bozulmaya karşı koruyabilen etkili çevresel bariyer kaplamaların tasarımı açısından kritik öneme sahiptir. Şekil 3.12’de bir çevresel bariyer kaplama tabakasına sıcak buharın meydana getirdiği korozyon saldırısı şematize edilmiştir.



Şekil 3.12. Sıcak buharın bir silisyum nitrür altlık üzerindeki, çevresel bariyer kaplama tabakasında neden olduğu korozyon saldırısının şeması, SiO₂ tane sınırının buharlaşmasını ve oksitleyicilerin alt tabakaya erişimini göstermektedir [22].

4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu deneysel çalışmada dört farklı kaplama tozu, 2 farklı altlık ve bir çevresel bariyer kaplama sistemi kullanılmıştır. Farklı tozların kullanımı, çevresel bariyer kaplamalarının çeşitli özelliklerini (örneğin, termal iletkenlik, mekanik dayanıklılık ve kimyasal stabilite) verir. Her bir kompozit malzeme, kendine özgü kimyasal yapıya ve termal genleşme katsayısına sahiptir. Bu nedenle, farklı tozlar kullanılarak kaplamanın farklı malzemelerle uyumluluğu değerlendirilir. Kaplama tozu olarak müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), zirkon (ZrSiO_4), alüminyum oksit (Al_2O_3), yitriya (Y_2O_3) seçilmiştir.

Kaplamaların termal iletkenlik değerinin hesaplanmasında altlığın etkisinin olmaması için kaplamalar paslanmaz çeliğe ve C/C kompozitine püskürtülmüştür. Paslanmaz çeliğe yapılan püskürtme işleminden sonra, kaplamalar mekanik olarak altlıktan ayrılmış ve altlıksız kaplamalar elde edilmiştir.

Kaplama işlemi, plazma sprej püskürtme (APS) yöntemiyle gerçekleştirilmiştir. Müllit- Yttria, Zirkon-Alumina ve Mullit-Alumina olacak şekilde 3 farklı kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretimi gerçekleştirilen kaplamalarda ilk katman %100 tek bir oksit ve sonraki her katmanda, kompozisyon oksit, diğer oksit bileşenin kompozisyonu %25 artırılarak ve her katmandaki kaplama kalınlığı 50 mikron olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Yani termal genleşme katsayı uyumsuzluğunu gidermek amacıyla Şekil 4.1’de şematize edildiği gibi toz kompozisyonları kademeli olacak şekilde kaplama sistemi üretilmiştir.

%100 Alumina	%100 Alumina	%100 Yttria
%25 Zirkon + %75 Alumina	%25 Müllit + %75 Alumina	%25 Müllit + %75 Yttria
%50 Zirkon + %50 Alumina	%50 Müllit + %50 Alumina	%50 Müllit + %50 Yttria
%75 Zirkon + %25 Alumina	%75 Müllit + %25 Alumina	%75 Müllit + %25 Yttria
%100 Zirkon	%100 Müllit	%100 Müllit
Altlık	Altlık	Altlık

Şekil 4.1. Kaplama Sisteminin Şematik Görünümü

4.1. Kaplamada Kullanılan Tozlar

Yapılan çalışmada çevresel bariyer kaplama için toz olarak: müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), zirkon (ZrSiO_4), alüminyum oksit (Al_2O_3), yitriya (Y_2O_3) tercih edilmiştir. Üretici

firmaların belirtmiş olduğu verilere göre kullanılan tozların boyutları: müllit -45+20  m, zirkon -45+20  m, alüminyum oksit -5+45  m, yitrium -90 + 45  m'dir.

Seçilen bu oksit tozların su buharına karşı dirençli oksitler olmaları toz seçiminin uygun yapıldığını göstermektedir.

Kaplama işlemi öncesinde müllit ve yitriya (itrium) oksit tozları, homojen olarak birbiri içinde karıştırılma işlemine tâbi tutulmuştur. Her katman için farklı oranlarda toz kompozisyonun hazırlanması ve kaplanacak olması, termal genleşme katsayısı uyumsuzluğunu gidermeye yönelik ayarlanmış bir işlemdir. Termal genleşme katsayısı düşük olan müllit, ilk aşamada altlığa püskürtülür ve her katmanda kademeli bir şekilde azaltılır.

Toplamda beş katmandan oluşacak kaplama için toz besleme  nitesi (hopper), ilk katman için yaklaşık olarak hacimce %100 müllit ile doldurulmuş ve ardından püskürtme işlemi yapılmıştır. Hopper şekil 4.2'de gösterilmiştir.

 kinci katman için toz besleme  nitesi, hacimce %75 müllit ve %25 yitriya oksit içeren toz karışımı ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür.

  nc  katman için toz besleme  nitesi, hacimce %50 müllit ve %50 yitriya oksit içeren toz karışımı ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür.

Dördüncü katman için toz besleme  nitesi, hacimce %25 müllit ve %75 yitriya oksit içeren toz karışımı ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür. Beşinci ve son katman için toz besleme  nitesi, hacimce %100 yitriya oksit ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür.

Her kaplama katmanı için yaklaşık olarak 50 gram toz kompozisyonu kullanılmıştır. şekil 4.2'de toz besleme ünitesinin görseli verilmiştir.



Şekil 4.2. Toz besleme ünitesi (hopper).

Bu müllit-yitriya kaplaması hem paslanmaz çelik hem de C/C kompozit altlığa uygulanmıştır.

Paslanmaz çelik altlığa uygulanan diğer bir kaplama kompozisyonu ise ilk katman için yaklaşık olarak hacimce %100 müllit ile doldurulmuş ve ardından püskürtme işlemi yapılmıştır.

İkinci katman için toz besleme ünitesi, hacimce %75 müllit ve %25 alumina içeren toz karışımı ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür.

Üçüncü katman için toz besleme ünitesi, hacimce %50 müllit ve %50 alumina içeren toz karışımı ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür.

Dördüncü katman için toz besleme ünitesi, hacimce %25 müllit ve %75 alumina içeren toz karışımı ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür.

Beşinci ve son katman için toz besleme ünitesi, hacimce %100 alumina ile doldurulmuş ve püskürtülmüştür.

Daha sonra zirkon ve alümina sırasıyla: %100 zirkon, %75 zirkon - %25 alumina, %50 zirkon - %50 alumina, %25 zirkon - %75 alumina ve son katmanda %100 alumina olacak şekilde paslanmaz çelik altlık üzerine uygulanmıştır.

4.2. Altlık Malzeme

Kaplanan müllit-yitriya kaplaması, çelik altlığın işlem sonrası sıcaklık değişimi sonucu parçalanarak çeliğin yüzeyinden ayrılmıştır. Diğer altlık malzemesi olarak seçilen C/C kompozitin kaplamasında böyle bir sorun görülmemiş olup, altlık

yüzeyinde daha iyi bir yapışma elde edilmiştir. Kaplama işleminden önce çelik altlık kumlanma işlemine tâbi tutulmuştur fakat diğer altlık malzemesi olan C/C ise kumlama veya farklı bir ön işlemden geçirilmemiştir. Kaplama işleminin ardından numunelere herhangi bir yüzey sonlama işlemi (zımparalama, parlatma, tıkama) uygulanmamış olup direkt olarak karakterizasyon işlemlerinde geçilmiştir. Müllit-yitriya kaplanmış paslanmaz çelik numunesi Şekil 4.3'te görülmektedir.



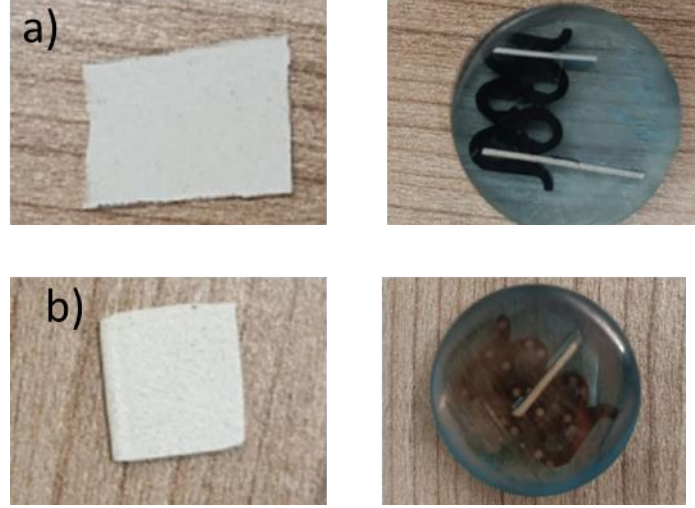
Şekil 4.3. Müllit-Yitriya kaplanmış paslanmaz çelik numune.

C/C kompoziti ve üzerine uygulanan müllit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$) – yitriya (Y_2O_3) kaplamasının görüntüsü Şekil 4.4'te görülmektedir.



Şekil 4.4. Kaplama numunesinin görünümü. a) Kaplanmamış arka yüzey, b) Kaplama yapılan ön yüzey.

Altlıktan ayrılmış (serbest) alumina-müllit ve alümina-zirkon kaplamalarının görüntüsü şekil 4.5'te görülmektedir. Kaplamalar prosesten hemen sonra tabaka halinde ayrılmaya çalışılmış olsa da bir kısmı küçük parçalar halinde ayrılmıştır. Kaplama yapılmadan önce çelik altlık kumlanmıştır. Kaplama uygulaması, oda sıcaklığında gerçekleşmiştir.



Şekil 4.5. Kaplama işlemi sonrası altlıktan ayrılmış kaplamaların ve kalıba alınmış kaplamaların görüntüsü a) Alümina - Müllit b) Alumina -Zirkon kaplaması.

4.3. Kaplama Prosesi

Atmosferik plazma sprej (APS) püskürtme kaplama işlemini gerçekleştirilebilmek için Multicoat kaplama ünitesinde bulunan Triplex PRO 200 ve F4 Torch kaplama tabancaları aktif olarak kullanılmıştır. Proseste kullanılan tabancanın yönlendirimi robot vasıtası ile sağlanmıştır. Numunelerin yüzeylerinde X ve Y eksenli taraması yapılarak kaplamalar üretilmiştir. Kaplamalarda kalınlık dağılımı, bahsedilen sistemin yardımıyla homojen olarak elde edilmiştir. Kaplama üretim sistemi Şekil 4.6’da verilmiş olup, püskürtme parametreleri ise Tablo 4.1’de belirtilmiştir.



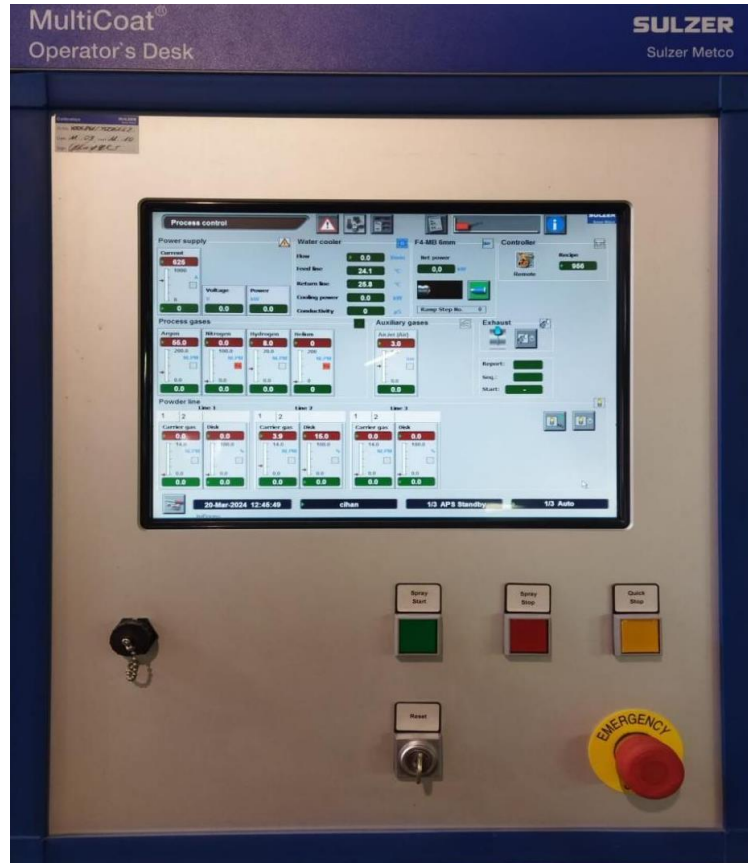
Şekil 4.6. Kaplama Üretim Sistemi.

Tablo 4.1. Plazma Sprey Parametreleri.

Argon (l/dk)	55
Hidrojen (l/dk)	8
Taşıyıcı gaz (l/dk)	3,9
Akım (Amper)	625
Disk Hızı (%)	15
Sprey Mesafesi (mm)	130
Robot hareket hızı (mm/s)	150

Kaplama işleminden önce paslanmaz çelik altlık yüzeyi, yapışmanın daha iyi olması için kumlama işlemi uygulanarak pürüzlendirildi. Fakat diğer altlık malzemesi olan C/C kompoziti ise kumlama veya farklı bir ön işleminden geçirilmemiştir.

Kumlama işleminden sonra Şekil 4.7’de görülen operatör masasından (operator’s desk) parametreler ayarlandı. Her katman için farklı oranda toz kompozisyonları kullanıldığından her püskürtme işleminden önce parametreler değiştirildi. Kaplama diskine yerleştirilen çelik altlık, plazma sprej püskürtme işlemine tâbi tutuldu. Bütün bu sürecin ardından, kaplama püskürtme işlemine son verildi. Kaplama işleminin ardından numunelere herhangi bir yüzey sonlama işlemi (zımparalama, parlatma) uygulanmamış olup direkt olarak karakterizasyon işlemlerine geçilmiştir.



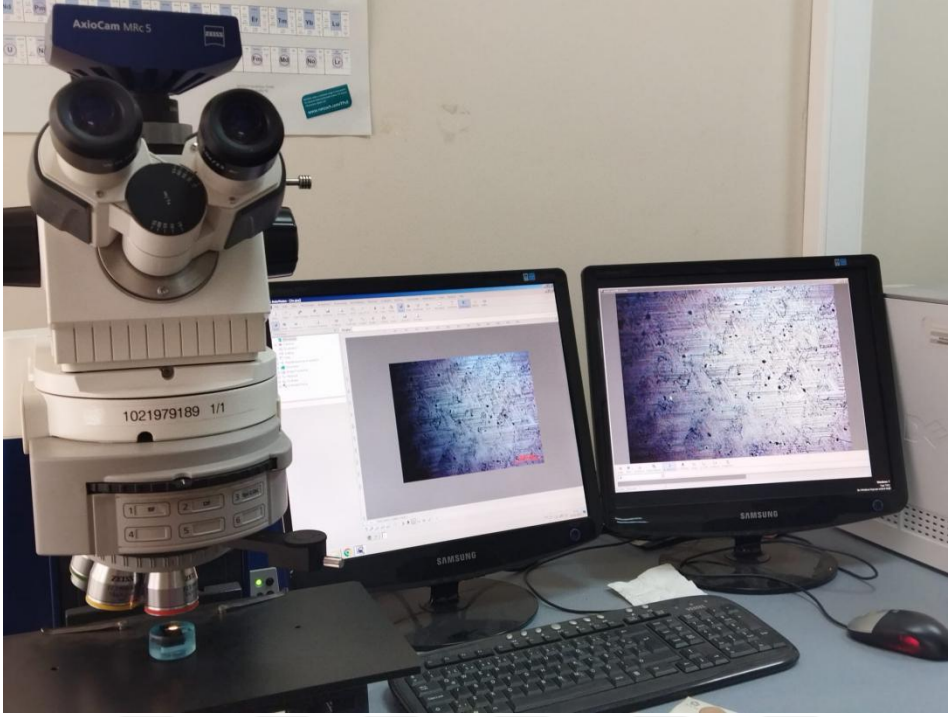
Şekil 4.7. MultiCoat Operatör Masası.

4.4. Metalografi İşlemleri

Kaplanan numuneler mikroyapı analizleri için metalografik işlemlerden geçirilmiştir. C/C kompoziti yoğun boşluk ve gözenek içerdiğinden dolayı sıcak basınçlı bir sistemde kalıplama ile zarar görebileceği için bir reçine ile kalıplanmıştır. Kalıp numuneleri önce su altında 200-1200 numaralı SiC aşındırıcılar ile zımparalama işlemine tâbi tutuldu. Ardından da numunelere parlatma işlemi uygulandı. Parlatma sonrasında numuneler su ile yıkandı ve numune yüzeyi alkol ile temizlendi. Sonrasında mikroskopta incelemeye alındı.

4.5. Optik Mikroskop

Numunelerin analizinde Zeiss AxioCAM MRc5 model optik mikroskop kullanılmıştır. Şekil 4.8’de kullanılan Zeiss AxioCAM mikroskopunun görseli verilmiştir.



Şekil 4.8. Zeiss AxioCam Mrc5 Optik Mikroskop

4.6. Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM)

Kaplamaların SEM analizleri TESCAN VEGA marka taramalı elektron mikroskobu ile gerçekleştirilmiştir. Elektron ışını ile taranan iletken olmayan numuneler, ışının etkisiyle yüzeylerinde yük birikmesine (şarj olmaya) eğilimlidir. Bu durum görüntü kalitesini düşürebilir veya analiz sırasında yanlış sonuçlara yol açabilir. Bu sorunu önlemek için, iletken olmayan numuneler genellikle iletken bir malzeme ile kaplanır. Bu kaplama, yüzeyde biriken yüklerin akıp gitmesini sağlayarak yüklenmeyi engeller ve tarama işleminin daha sağlıklı gerçekleşmesine olanak tanır. Bu yüzden kalıba alınmış numune altın kaplanarak iletken hale getirildi. Mikroyapı görüntüsü elde edildikten sonra da, SEM'in bir modu olan EDX (energy-dispersive x-ray spectroscopy) ile de elemental analizi yapılarak veriler elde edildi.

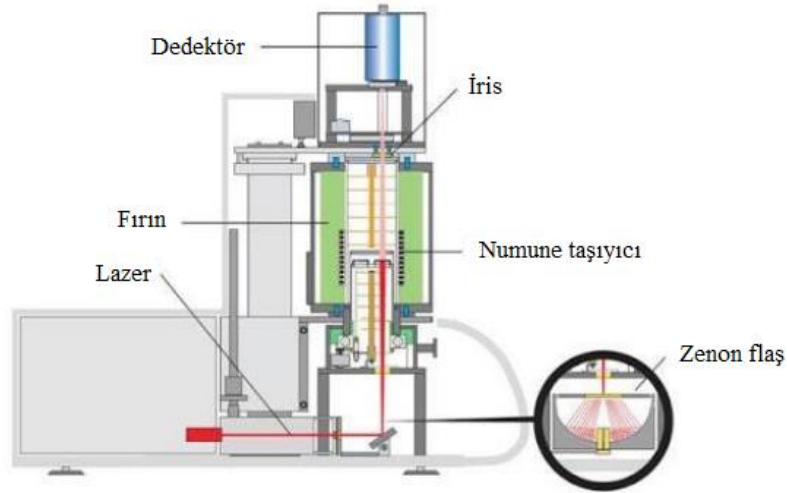
4.7. XRD (X Işını Difraksiyon) Yöntemi

Alumina-müllit ve zirkon-alumina kaplamalarının XRD (X ışını difraksiyon) yöntemi ile faz analizleri yapıldı. XRD grafikleri 2θ aralığında ve Cu-K α 1 ışınması 1.54 angstrom dalga boyu kullanılarak elde edilmiştir. Plazma sprej prosesiyle üretilen kaplamalarda, çok hızlı soğuma nedeniyle atomların düzenlenmesi için yeterli süre

bulunmamaktadır. Bu durum, camsı özelliklere sahip, düzensiz ve rastgele bir katılaşma sonucu, amorf yapının oluşumuna neden olmaktadır [45].

4.8. Termal Yayılm Testi

Seramikler, metaller, inşaat malzemeleri vb. gibi katıların ısı yayılım katsayısını ölçmek ve ısı iletkenlik katsayısını hesaplamakta, lazer flaş yöntemi yaygın olarak kullanılmaktadır. Cihazın ölçüm aralığı, oda sıcaklığı ile 800 °C arasında olup, bu aralığın doğru şekilde belirlenmesi büyük önem taşır. Şekil 4.9'da gösterilen ölçüm yöntemi, lazer kaynağından çıkan ışının aynalar yardımıyla numunenin alt yüzeyine yönlendirilmesiyle başlar. Bu ışın, numunenin üst yüzeyinden yansıdıktan sonra cihazın üst kısmında yer alan dedektör tarafından algılanır ve enerjisi ölçülerek numunenin difüzivitesi hesaplanır. Bu yöntem, ölçüm sırasında numunenin herhangi bir bozunmaya veya kütle kaybına uğramamasını gerektirir. Bu nedenle, numunenin camsı geçiş, kristallenme, erime ve faz geçiş sıcaklıkları gibi bozunma sıcaklıklarının önceden bilinmesi gerekir. Dolayısıyla, ölçüm aralığı, oda sıcaklığı ile numunenin bozunma sıcaklığı arasında sınırlıdır. [70].



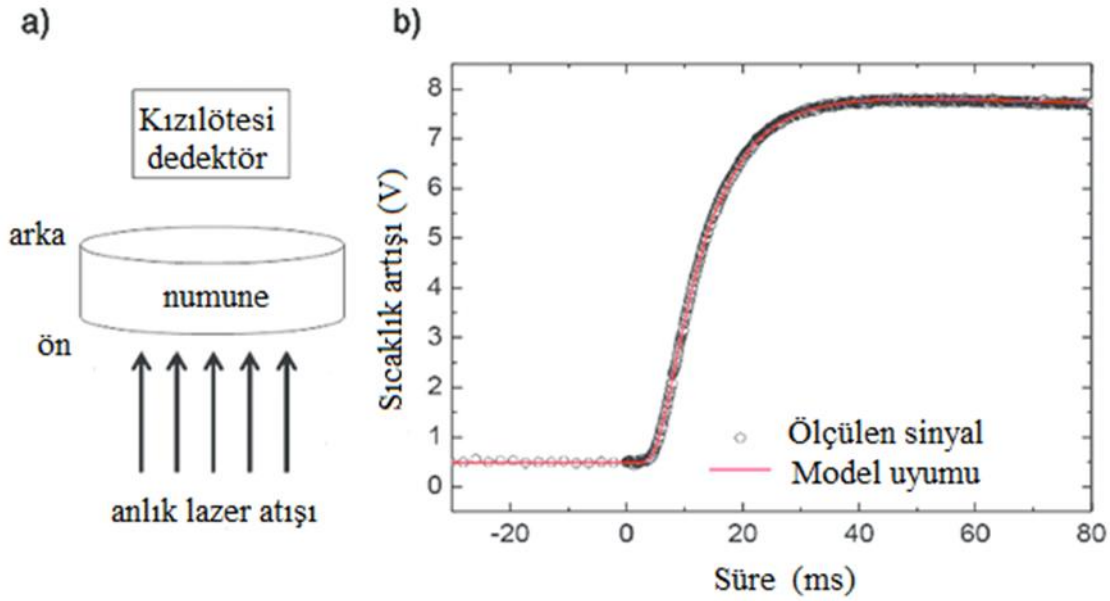
Şekil 4.9. Termal Yayılm Ölçüm Metodu [70].

Müllit-alumina ve zirkon-alumina kaplamalarının termal yayılım değerleri şekil 4.10'da görülen Linseis LFA 1000 lazer flaş ısı yayılım katsayısı analiz cihazı ile ölçülmüştür.



Şekil 4.10. Linseis LFA 1000 lazer flaş ısıl yayılım katsayı analiz cihazı [70].

Şekil 4.11’de lazer flaş metodunun şematik gösterimi ve referans numunesinin zamanla sıcaklığa bağlı olarak sinyal profilinin değişim grafiği görülmektedir. Bir enerji darbesi, karşılıklı yüzeyleri düz ve paralel olan bir numunenin bir tarafını ısıtır ve enerji girişi nedeniyle arka tarafta ortaya çıkan zamana bağlı sıcaklık artışı tespit edilir. Numunenin termal yayılımı ne kadar fazlaysa, enerji arka tarafa o kadar hızlı ulaşır [71].



Şekil 4.11. a) Lazer flaş metodunun şematik gösterimi, b) Linseis LFA 1000 lazer flaş sisteminde elde edilen grafit referans numunesinin sinyal profili ve model uyumu [71].

Termal yayılım aşağıda bulunan denklemdeki gibi hesaplanır.

$$\alpha = 0.1388 \cdot \frac{d^2}{t_{1/2}} \quad (4.1)$$

Denklem 4.1’de görülen $t_{1/2}$ sürenin yarısını sn cinsinden, d numunenin kalınlığını cm cinsinden, α termal yayılımı cm^2/sn cinsinden ifade eder [72].

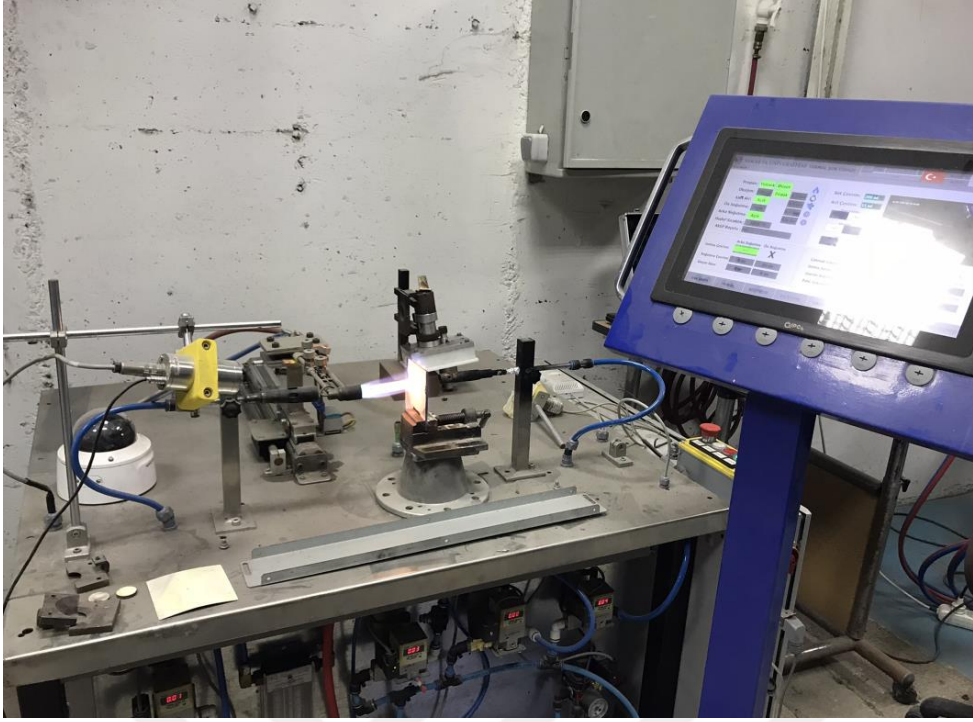
Termal iletkenlik değeri ise,

$$\lambda = \alpha \cdot \rho \cdot C_p \quad (4.2)$$

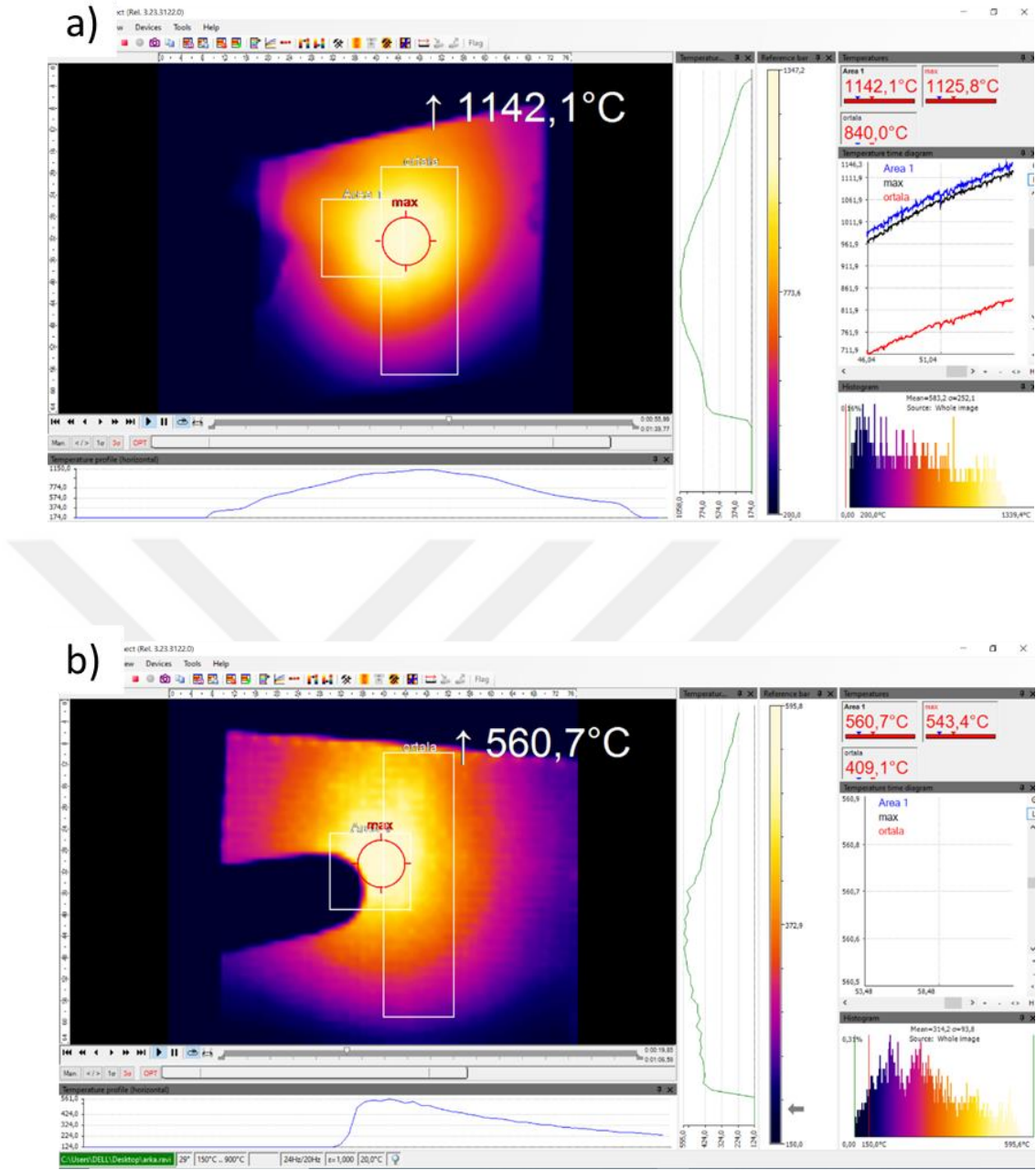
olarak bulunabilir.

4.9. Termal Şok Testi

Termal şok testi, bir malzemenin ani sıcaklık değişimlerine karşı dayanıklılığını değerlendirmek için gerçekleştirilen bir testtir. C/C altlık üzerine yapılan müllit-yitriya kaplı numuneye uygulanan termal şok testi 150 çevrim şeklinde tekrarlanmıştır. 20 sn boyunca $\sim 1200^\circ\text{C}$ ’ye kadar ulaşan sıcaklıkta alev püskürtülen numuneye sonrasında kompresör ile 20 sn ön soğutma uygulanmış ve 40 sn sonra tekrar alev uygulanacak şekilde bu toplam 80 saniyelik çevrim 150 kez tekrarlanmıştır. Numunenin ön ve arka yüzeyinden termal kamera ile sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Şekil 4.12 termal şok testi sırasında kaydedilen bir görüntüyü göstermektedir. Şekil 4.13 ise termal kamera ile test esnasında alınan görüntüdür.



Şekil 4.12. Termal şok testi görüntüsü.



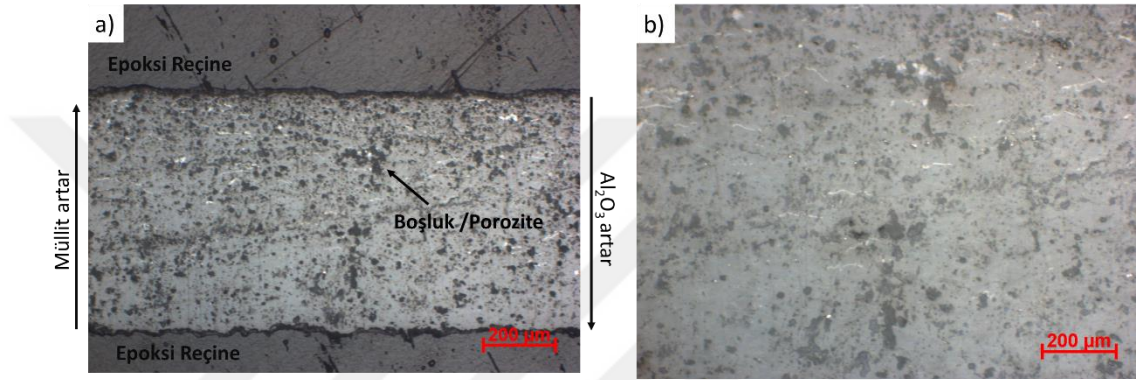
Şekil 4.13. Termal kamera ile test esnasında alınan görüntü. a) Kaplanmış ön yüzey, b) Kaplamanın olmadığı arka yüzey.



5. DENEY SONUÇLARININ İNCELENMESİ

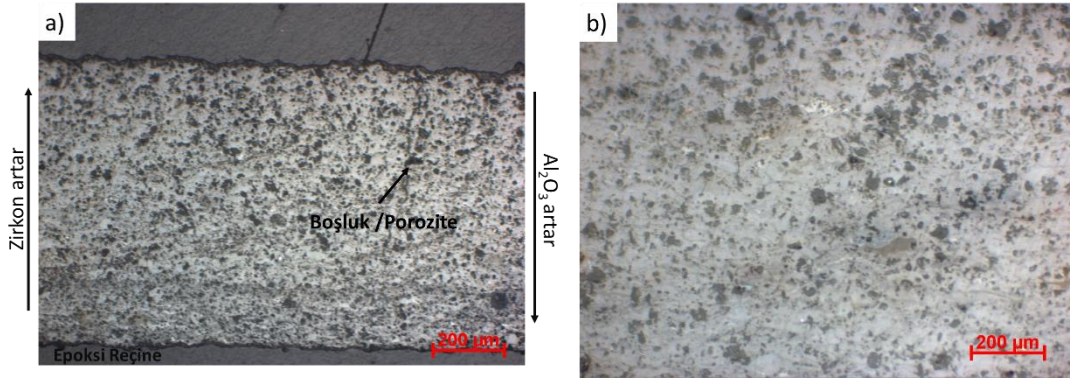
5.1. Optik Mikroskop Analizi

Şekil 5.1’ de Alumina-müllit kaplamasının mikroyapı görüntüleri verilmektedir. Altlıktan mekanik olarak ayrılan kaplamalarda çatlak oluşumu gözlenmemiştir. Aynı zamanda her kaplama tipinde de benzer oranda porozitelere rastlanılmıştır.



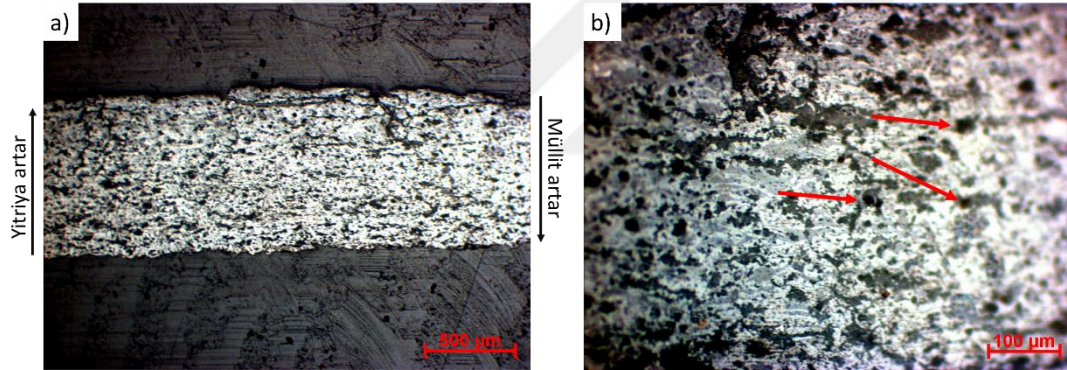
Şekil 5.1. Alumina-Müllit kaplaması optik mikroskop görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme.

Şekil 5.2’de Alumina Zirkon esaslı gradyanı değiştirilmiş kaplamanın optik mikroskop görüntüsü verilmektedir. Şekil 5.1 ile Şekil 5.2 karşılaştırıldığında kaplamanın nispeten daha fazla porozite içerdiği anlaşılmaktadır. Porozite oluşumları kaplama püskürtme parametrelerine bağlı olarak önemli ölçüde değişmektedir. Kullanılan plazma spray parametresine bağlı olarak nispeten daha yüksek erime sıcaklığına sahip ZrSiO₄’ün sistemde bulunması porozite miktarını artırdığı değerlendirilmektedir [73].



Şekil 5.2. Alumina-zirkon kaplamasının optik mikroskop görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme

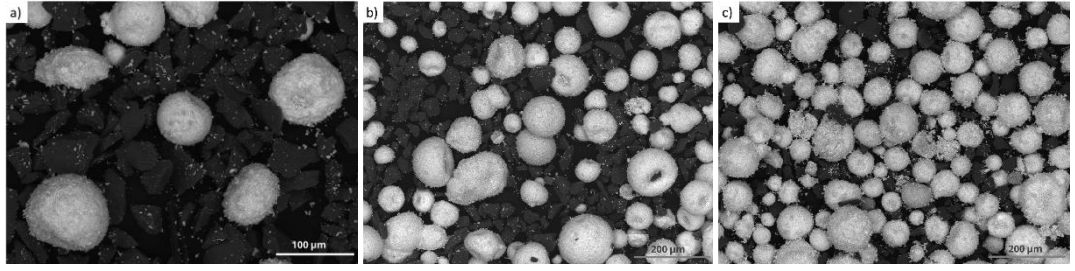
Şekil 5.3'te Yitriya ve Mullit esaslı gradyan kaplamanın optik mikroskop görüntüsü verilmektedir. İlk etapta bakıldığında koyu bölgeler porozite gibi anlaşılmaya rağmen Şekil 5.3 b'de ok ile gösterilen kısımlar porozitedir. Aslında kaplama mikroyapısı yoğun porozite içermemektedir metalografik işlemlerden kaynaklı yanılsamadan poroziteyi andıran yapılar ortaya çıkmıştır.



Şekil 5.3. Müllit-yitriya kaplamasının optik mikroskop görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme

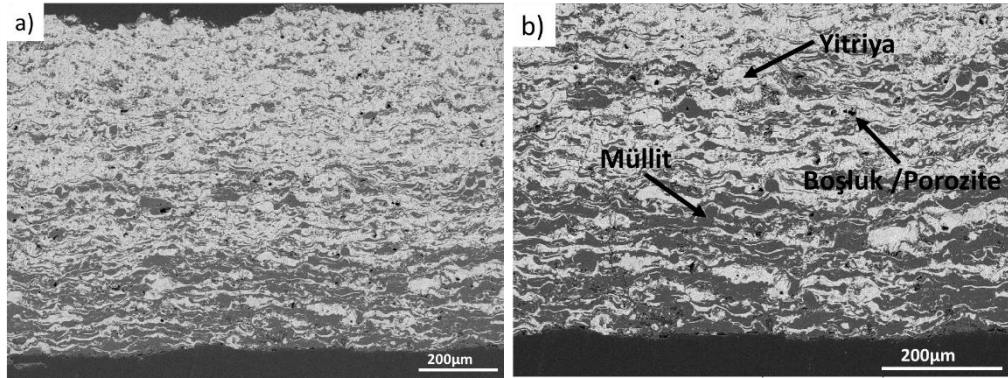
5.2. SEM Analizi

Kaplama yapılmadan önce hazırlanan toz karışımlarının SEM analizleri yapılmış ve kaplama sonrasında da numunelerin SEM analizleri incelenmiştir. Şekil 5.4'te kaplama öncesi hazırlanan müllit-yitriya toz karışımlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Görselden anlaşılacağı üzere, keskin köşeli partiküllerin mullit olduğu küresel formulu partiküllerin ise Y_2O_3 olduğu ve serbest olarak karıştıkları görülmektedir.



Şekil 5.4. Müllit-yitriya toz karışımlarının SEM görüntüleri, a) %75 müllit - %25 yitriya b) %50 müllit - %50 yitriya c) %25 müllit - %75 yitriya görünüm.

Şekil 5.5'te Mullite-Yitriya kaplamasının SEM görüntüsü verilmektedir. BSE detektörü kullanılarak alınan bu görüntüde müllit olan bölgeler, koyu gri olarak görülmekte iken, Yitriya olan bölgeler açık gri olarak görülmektedir. Arzu edildiği gibi kaplamanın bir yüzeyden diğer yüzeye doğru kompozisyonun giderek artan şekilde kaplama yapıldığı görülmektedir. Optik mikroskop görüntülerinden farklı olarak, porozite miktarının daha az gözlemlendiği bu görüntüde, iki farklı tekniğin farklı sonuçlar sunması olağandır. Metalografik hazırlama sırasında kaplamalarda kalan su kirlilikleri optik mikroskopta porozite/boşluk gibi algılanması oldukça yüksek bir ihtimalidir. Bu nedenle SEM görüntüleri dikkate alınarak kaplamaların arzu edildiği şekilde üretildikleri sonucuna varılmaktadır.

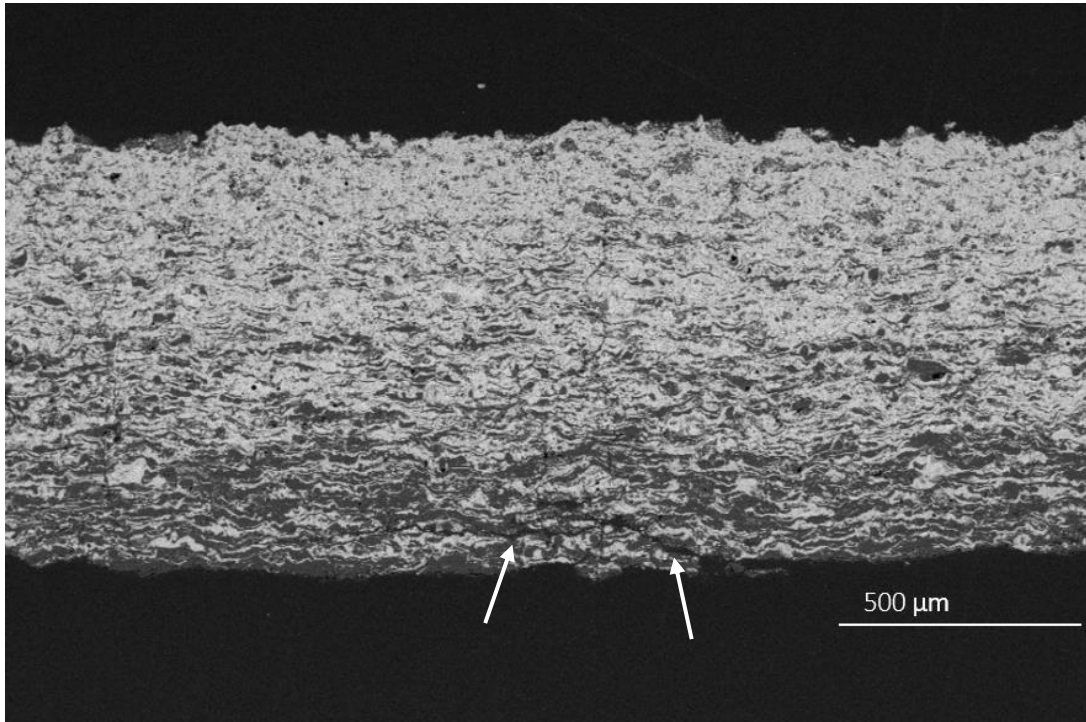


Şekil 5.5. Müllit-yitriya kaplamasının SEM görüntüleri, a) genel görünüm b) yüksek büyütme.

Şekil 5.5'te gösterilen SEM mikroyapı görüntülerindeki siyah boşluklar, kaplama yapısındaki poroziteleri belirtmektedir. Bu poroziteler, kaplamanın koruyucu özelliklerini, mekanik dayanımını ve yapışma kabiliyetini olumsuz yönde etkileyebilir. Mikroyapıdaki açık gri alanlar yitriyayı, koyu gri alanlar ise mülliti temsil etmektedir. Yitriyanın açık, müllitin koyu gri görünmesinin nedeni, bu malzemelerin içerdiği elementlerin atom numaralarındaki farklardır. BSE (geri saçılan

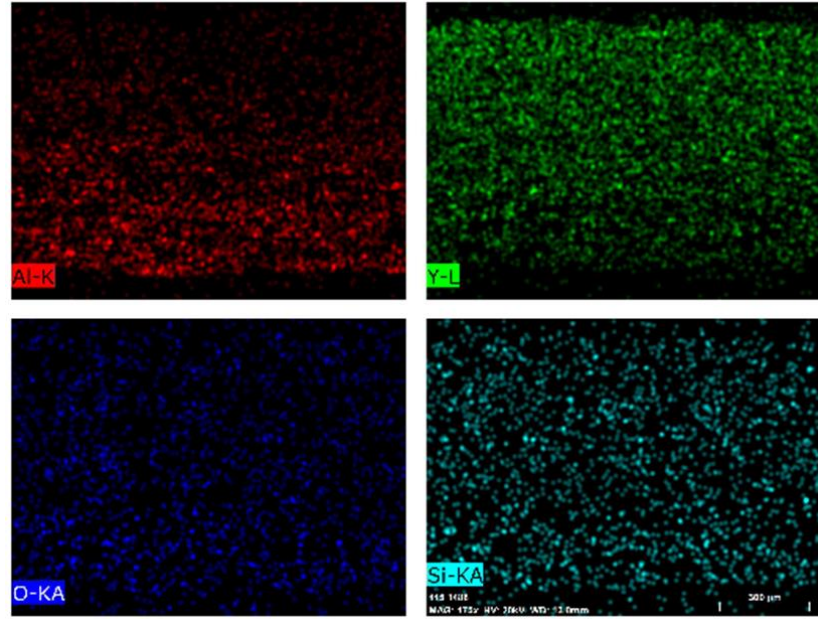
elektron) görüntüleme tekniğinde, atom numarası yüksek olan elementler daha fazla geri saçılan elektron sinyali ürettiğinden, bu bölgeler daha açık renkli görünür. Yttriyumun atom numarası 39 iken, alüminyum 13, silisyum 14 ve oksijen 8 atom numarasına sahiptir. Bu farklılıklar görüntüdeki renk tonlarını belirler.

Şekil 5.6’da Müllit-yitriya kaplamasının yakın görüntüsü verilmektedir. Görselde ok ile işaretlenen kısımların orta bölgesinde dikey bir çatlak görülmektedir. Bu kaplamanın altlıktan ayrılması için yapılan mekanik etki neticesinde kırıldığı düşünülmektedir.



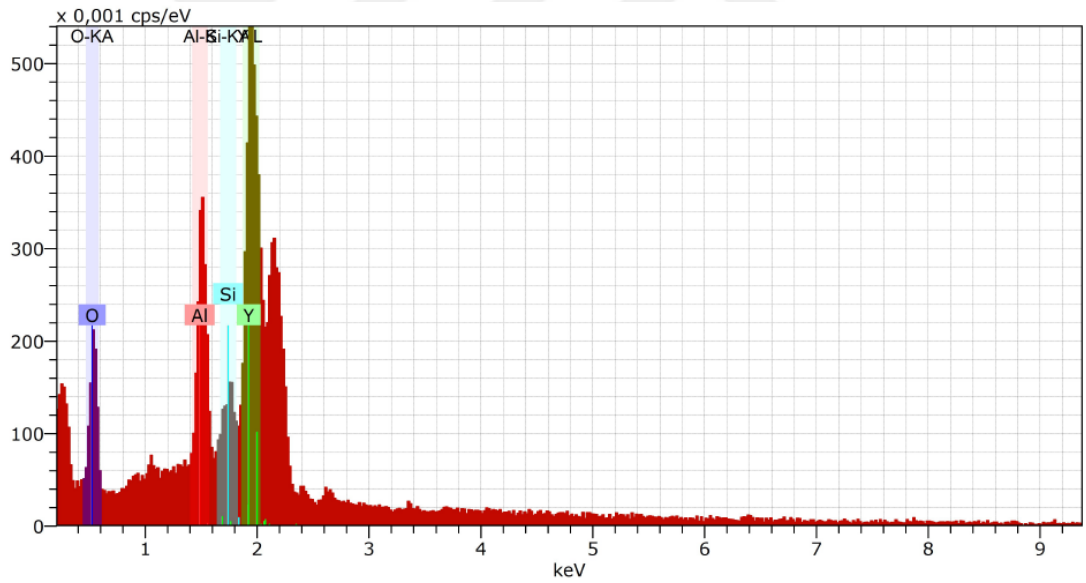
Şekil 5.6. Müllit-Yitriya mikroyapısında çatlak görüntüsü.

Şekil 5.7’deki görüntüde kaplamanın EDS haritalanması verilmektedir. Kaplamanın Al elementi ve Yitriya elementlerinin kompozisyonunun göreceli olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Kaplamanın arzu edildiği şekilde kompozisyonu değiştirilerek üretildiğini ispatlamaktadır.



Şekil 5.7. Müllit-Yitriya kaplamasının haritalama görünümü.

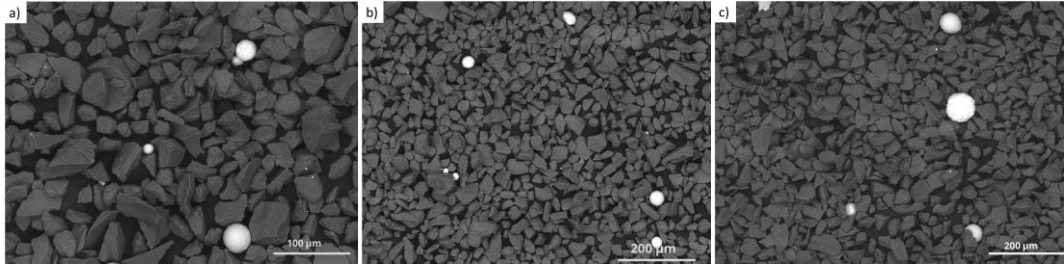
Şekil 5.8’de Müllit - Yitriya kaplamasının EDX analizi görülmektedir.



Şekil 5.8. Müllit-Yitriya kaplamasının EDX görünümü.

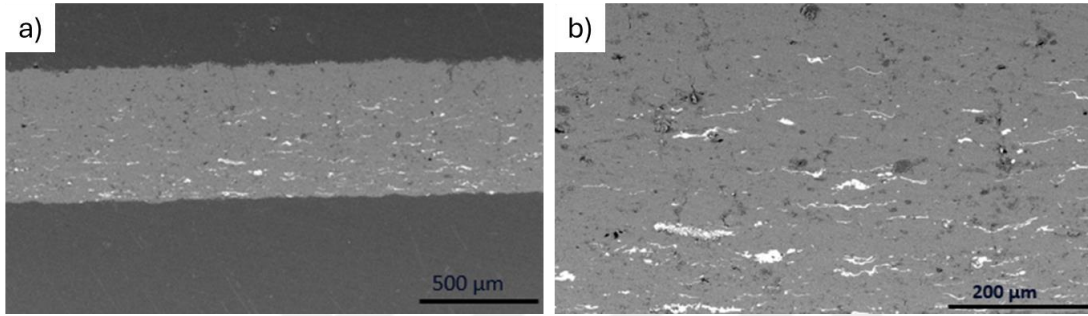
Görülen EDX analizi sonuçları da kaplama yapısının ağırlıklı olarak Al-O-Si-Y elementlerinden oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 5.9’da kaplama öncesi hazırlanan müllit-alumina toz karışımlarının SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.9. Müllit-Alumina toz karışımlarının SEM görüntüleri, a) %75 müllit - %25 alumina b) %50 müllit - %50 alumina c) %25 müllit - %75 alumina.

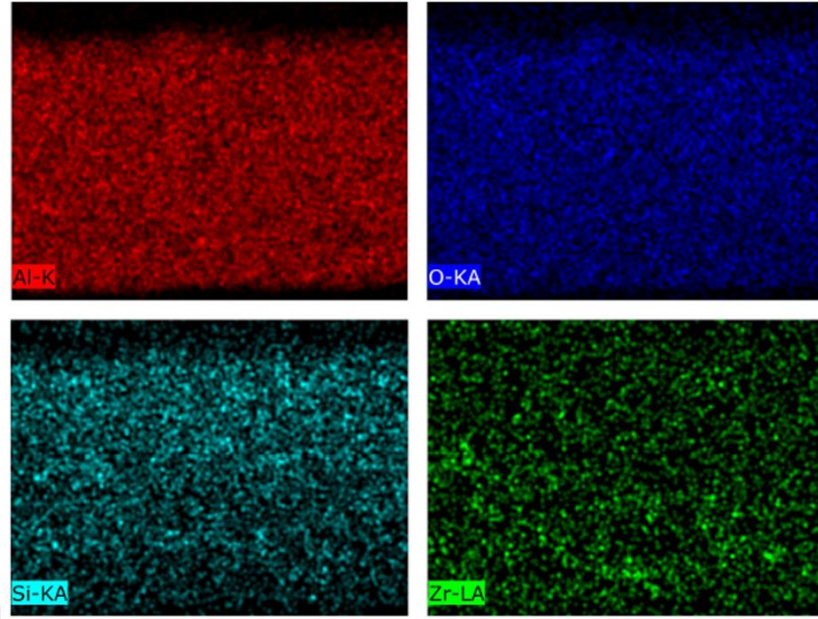
Şekil 5.10’ da Müllit - Alumina kaplamasının SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.10. Müllit-Alumina kaplamasının SEM görüntüleri, a)genel görünüm b) yüksek büyütme.

Müllit-alumina ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 - \text{Al}_2\text{O}_3$) kaplamasında katmanlar arasındaki geçişler kaplama kompozisyonunun içerdiği elementlerin atom numaraları birbirine yakın (Al:13, Si:14, O:8) olduğu için belirgin bir ton farkıyla ayırt edilememektedir. Beyaz olarak görülen yerler daha önceki kaplamadan bulaşmış zirkon (ZrSiO_4) yapılarıdır. Kaplama tozlarının hazırlanmasında aynı huni kullanıldığından farklı toz kombinasyonlarının birbirine bulaşması olağandır. Eğer işlemler arasında toz değişimi gerekiyorsa daha etkili bir temizlik yapılması gereklidir.

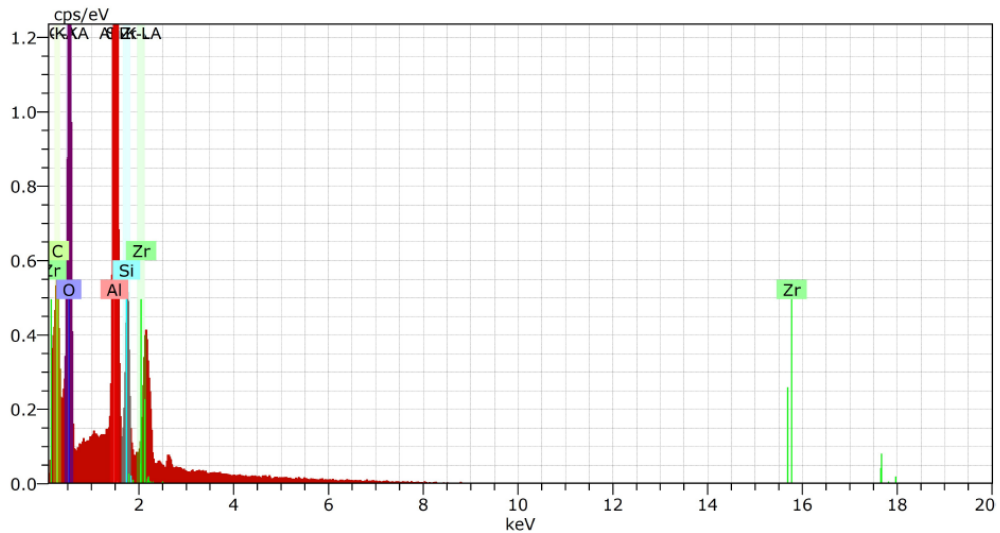
Şekil 5.11’deki görüntüde Müllit-Alumina kaplamanın EDS haritalanması verilmektedir.



Şekil 5.11. Alumina-Müllit kaplamanın haritalama görünümü.

Şekil 5.11’de görülen EDS haritalanmasına baktığımızda kaplama yapısında ağırlıklı olarak Alüminyum ve Oksijenin varlığı yoğun bir şekilde görülmektedir. Silisyumun da üst tarafa doğru yoğunluğunun arttığı görülmektedir bunun sebebi de son katmana doğru Mullit kompozisyonun artmasındandır. Zirkonyumun varlığı ise bir önceki (Alumina-zirkon) kaplama tozlarının hunideki artıklarından bulaşmasından dolayıdır.

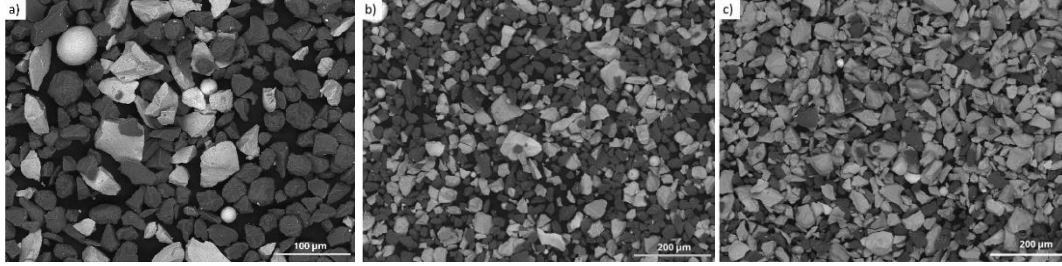
Şekil 5.12’de Alumina müllit kaplamanın EDX analizi verilmiştir.



Şekil 5.12. Alumina-Müllit kaplamanın EDX görünümü.

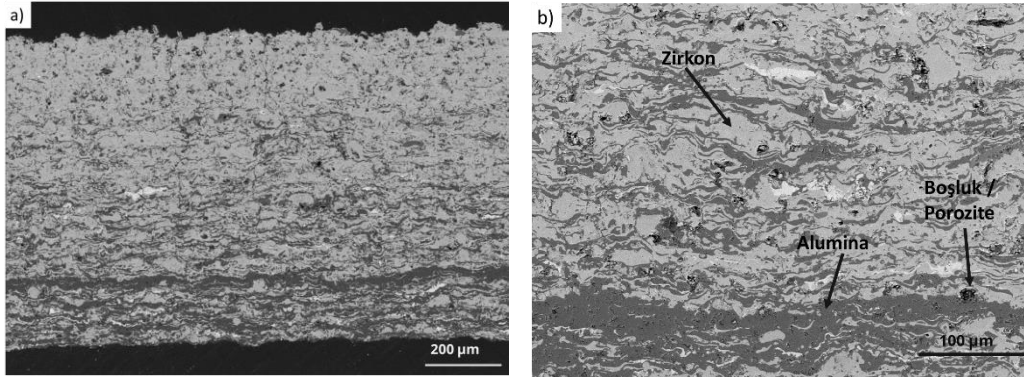
Şekil 5.12’de görülen EDX analizi sonuçları da kaplama yapısının ağırlıklı olarak Al-O-Si elementlerinden oluştuğunu göstermektedir.

Şekil 5.13'te kaplama öncesi hazırlanan zirkon-alumina toz karışımlarının SEM görüntüleri verilmiştir. Görselden anlaşılacağı üzere zirkon tozlarının yitriya tozlarından farklı olarak, keskin köşeli olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 5.13. Zirkon-Alumina toz karışımlarının SEM görüntüleri, a) %75 zirkon - %25 alumina b) %50 zirkon - %50 alumina c) %25 zirkon - %75 alumina.

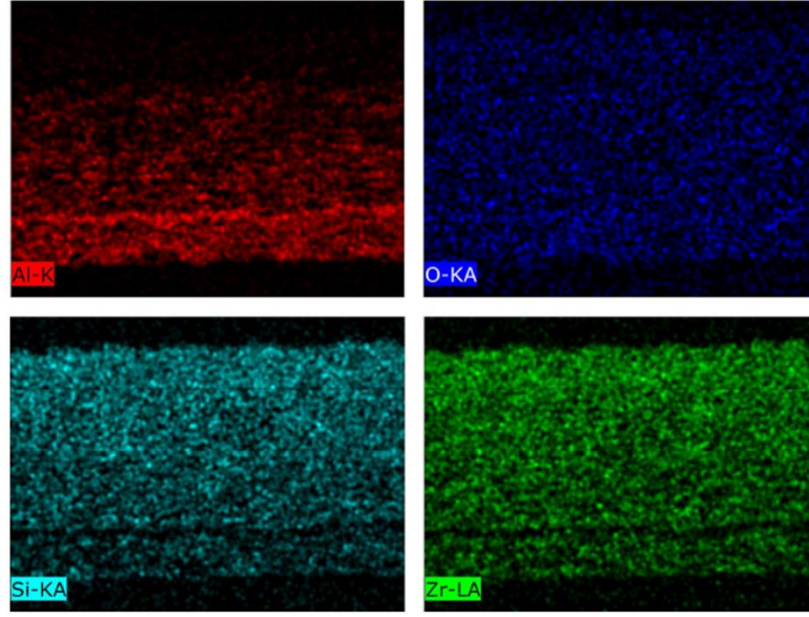
Şekil 5.14'te Zirkon-Alumina kaplamasının SEM görüntüleri verilmiştir.



Şekil 5.14. Zirkon-Alumina kaplamasının SEM görüntüleri, a)genel görünüm b) yüksek büyütme.

Şekil 5.14'te görülen zirkon-alümina kaplaması SEM analizinde aşağıdan yukarıya doğru olan katmanlar arası geçiş net bir şekilde gözlemlenmektedir. Kaplamada herhangi bir çatlak tespit edilmemektedir. Siyah boşluklar, kaplama yapısındaki poroziteleri belirtmektedir. Bu poroziteler, kaplamanın koruyucu özelliklerini, mekanik dayanımını ve yapışma kabiliyetini olumsuz yönde etkileyebilir. Mikroyapıdaki açık gri alanlar zirkonu, koyu gri alanlar ise aluminayı temsil etmektedir.

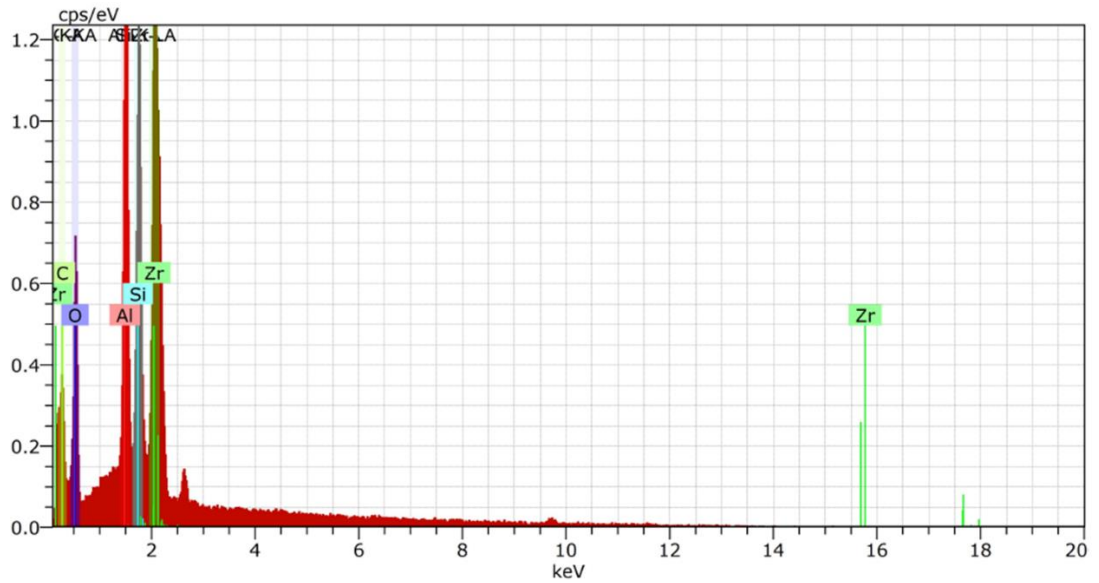
Şekil 5.15'teki görselde Alumina zirkon kaplamanın EDS haritalanması verilmektedir.



Şekil 5.15. Alumina- Zirkon kaplamasının haritalama görünümü.

Şekil 5.15'te görülen EDS haritalanmasına baktığımızda kaplamada Al, Si ve Zirkonyum elementlerinin kompozisyonunun göreceli olarak değiştiği anlaşılmaktadır. Kaplama yapısı üst katmana doğru Zirkon ($ZrSiO_4$) oranı arttığı için üst tabakaya doğru Zr ve Si elementinde artış Aluminyum elementinde azalma görülmektedir. Bunun yanı sıra Oksijen içeriğinde belirgin bir değişiklik gözlenmemiştir.

Şekil 5.16'da Alumina zirkon kaplamasının EDX analizi verilmiştir.

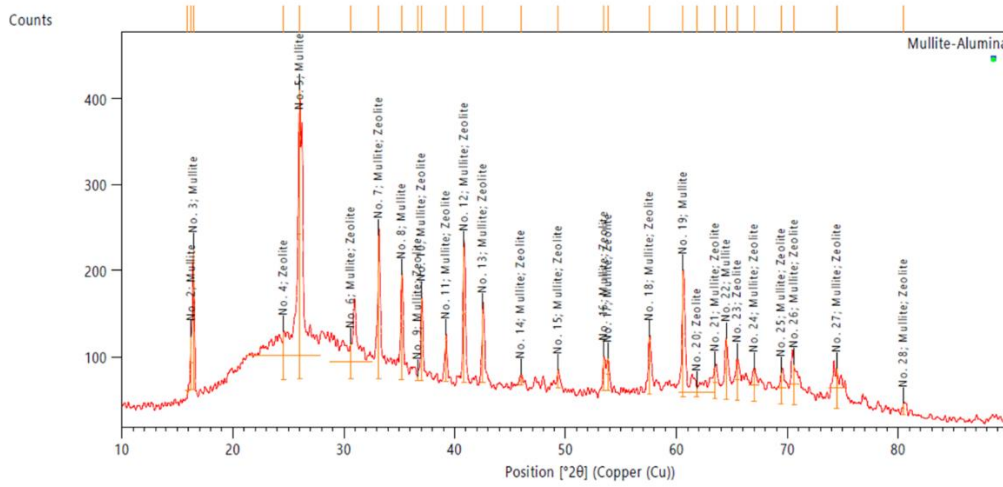


Şekil 5.16. Alumina- Zirkon kaplamasının EDX görünümü.

5.16’da görülen EDX analizi sonuçları da kaplama yapısının ağırlıklı olarak Al-O-Si-Zr elementlerinden oluştuğunu göstermektedir.

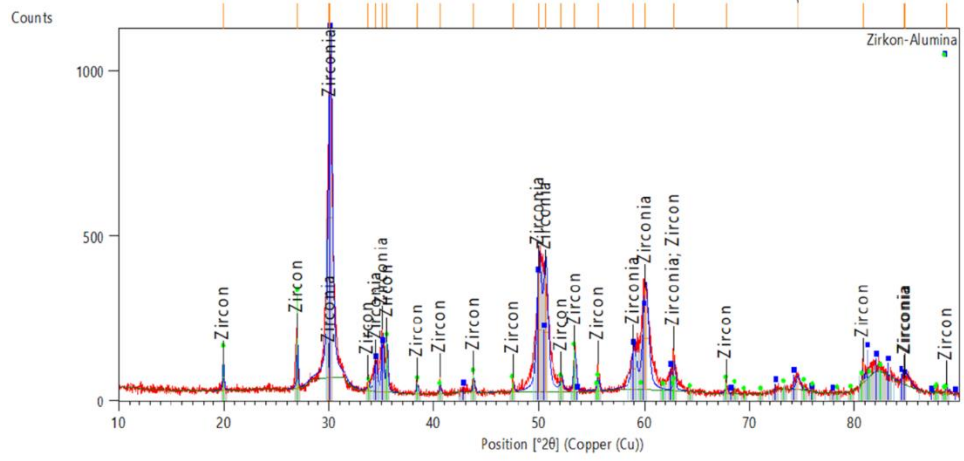
5.3. XRD Analizi

Şekil 5.17’de alümina-müllit kaplamasının XRD analizi görülmektedir. Tamamen kristalin tozlardan üretilen kaplamada, Mullit esaslı tozların plazma sprej ile püskürtülmesi sırasında amorf olarak biriktiği bilinmektedir [74]. Bu nedenle kaplamada amorf yapıyı işaret eden 20-40° arasında bir eğim görülmektedir.



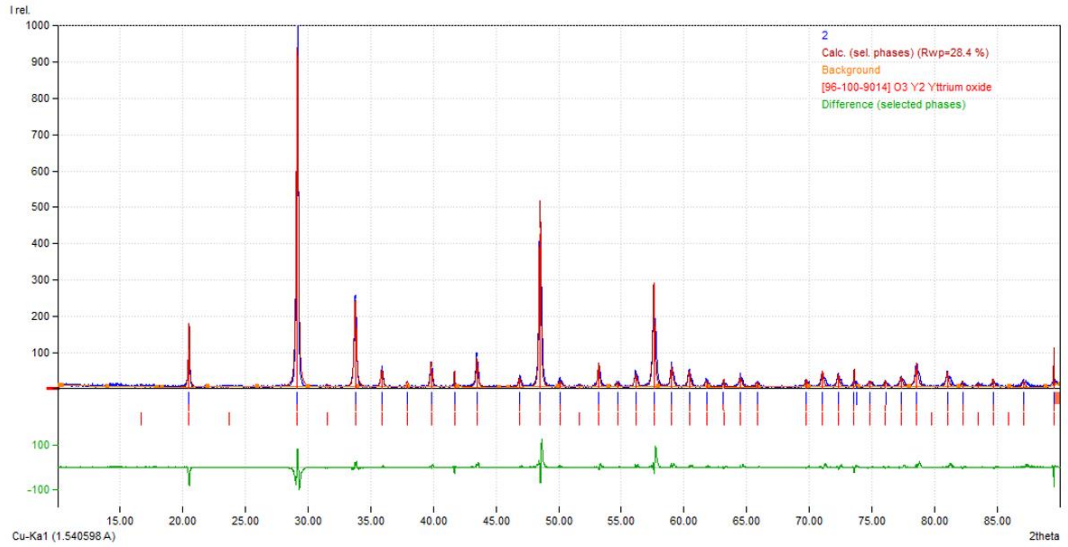
Şekil 5.17. Müllit-Alumina kaplamasının XRD analizi.

Elde edilen zirkon- alümina kaplamasının XRD paterni şekil 5.18’de görülmektedir. XRD analizleri, plazma sprej işlemi sırasında ulaşılan yüksek sıcaklıklar ve hızlı soğuma sonucunda zirkonun tamamen parçalanmadığını ortaya koymaktadır. Belirgin bir amorf yapı gözlenmemiştir. Ayrıca, çok küçük miktarda SiO₂ kalıntıları da bulunmaktadır. Bunu yanı sıra Al₂O₃ fazı çok az miktarda tespit edilmiştir. Bunun nedeni ölçüm alınan yüzeyin tamamen ZrSiO₄ tarafından alınmış olmasıdır.



Şekil 5.18. Zirkon-alumina kaplamasının XRD analizi.

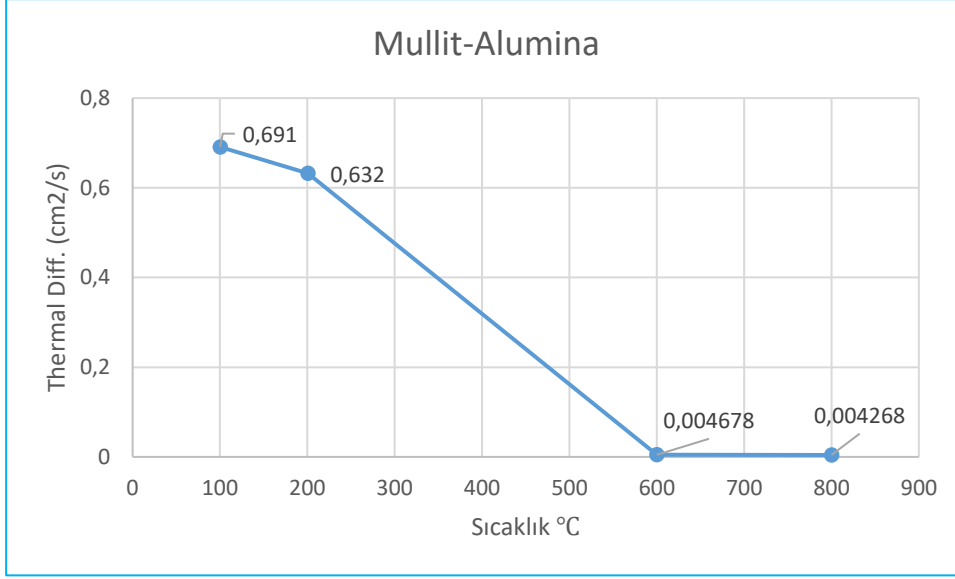
Şekil 5.19’da Yitriya-Müllit kaplamasının XRD paterni görülmektedir. XRD üst yüzeyden yani son katmandan yapıldığı için analizde yitriyum oksit görülmektedir. Parçalanmanın gözlenmediği aynı zamanda, kaplama kalınlığından dolayı sadece Y_2O_3 fazının tespit edildiği anlaşılmaktadır.



Şekil 5.19. Yitriya – Mullit kaplamasının XRD analizi.

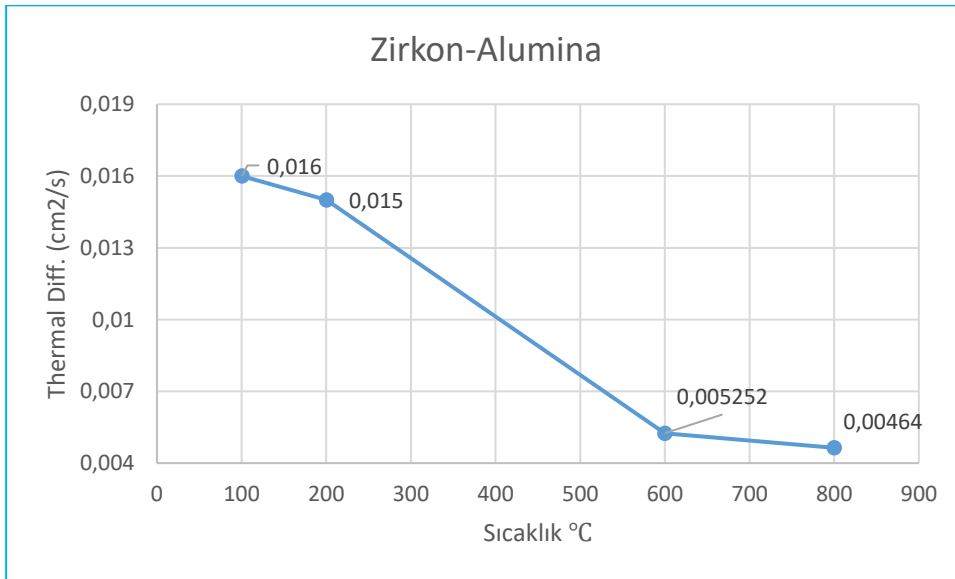
5.3. Termal Yayılım Testi

Şekil 5.20’de mullit alümina kaplamasının ölçülen termal yayılım değerleri verilmektedir. T/EBC kaplamalarda en önemli unsurların başında gelen termal iletkenlik değerinin sıcaklığa bağlı olarak değişimi Lazer flash yöntemi ile tespit edilmektedir. Ardından kaplamanın ısı sıçması ve yoğunluğu ile çarpımında termal iletim katsayısı elde edilir. Termal yayılım değerlerine bakıldığında ;



Şekil 5.20. Müllit-alumina kaplamasının termal yayılım ölçüm değerleri.

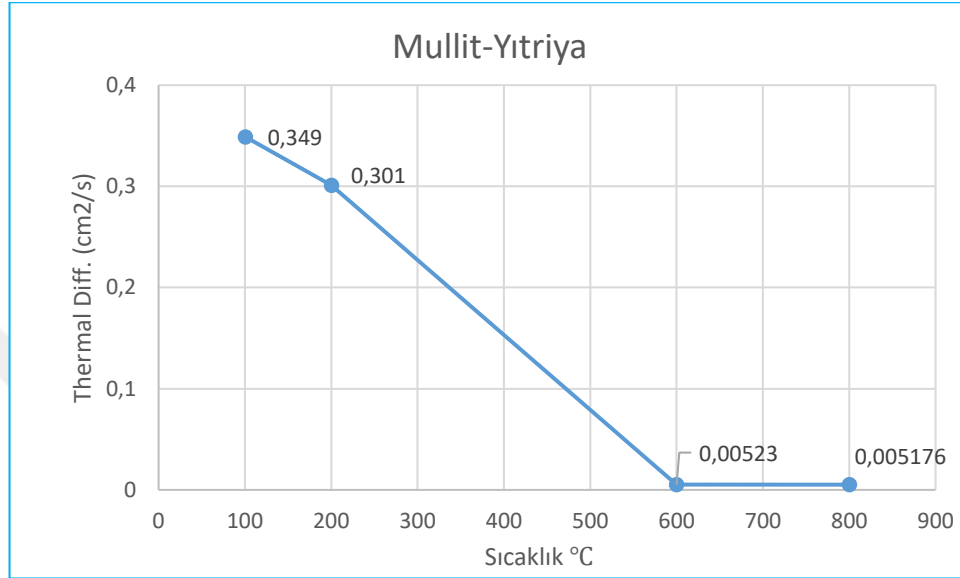
Şekil 5.20’de ölçülen alümina-müllit kaplamasının termal yayılım değerlerinde çok az bir değişim olduğu görülmektedir. 800 °C sıcaklıkta daha düşük termal yayılım değeri 0.004268 ölçülmüştür. Termal iletkenlik değeri denklem 4.2’den yapılacak çıkarıma göre kaplamanın yoğunluk ve ısı sığası ile çarpımına eşittir. Düşük termal yayılım her zaman düşük termal iletim katsayısına denk gelmeyeceği göz önüne alınmalıdır. Ancak yapılan çalışmanın özü itibari ile kaplamada beklenen termal yayılım değerinin sıcaklığa bağlı değişimi literatür ile uyumlu olduğu görülmektedir. Şekil 5.21’de alümina-zirkon kaplamasının ölçülen termal yayılım değerleri görülmektedir.



Şekil 5.21. Zirkon-alumina kaplamasının termal yayılım ölçüm değerleri.

Şekil 5.21’de 600 °C ve 800 °C sıcaklıkta ölçülen termal yayınım değerlerinin 0.005252 ile 0.00464 arasında değiştiği görülmektedir. Değerlerden anlaşıldığı üzere termal yayınının çok düşük olduğu görülmektedir.

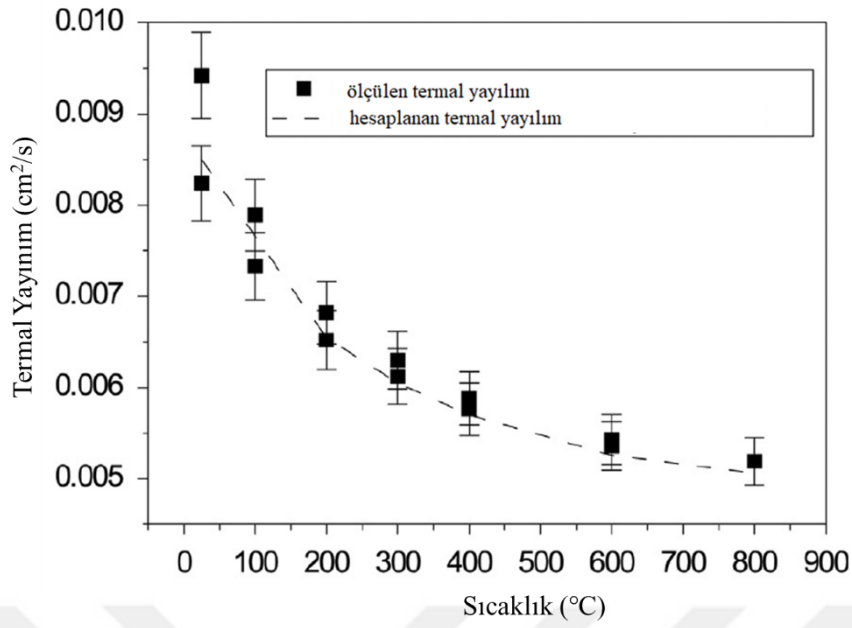
Şekil 5.22’de farklı sıcaklıklarda ölçülen müllit-yitriya kaplamasının termal yayınım değerleri görülmektedir.



Şekil 5.22. Mullit-Yitriya kaplamasının termal yayınım ölçüm değerleri.

Şekil 5.22’de 600 °C ve 800 °C sıcaklıkta ölçülen termal yayınım değerlerinin 0.00523 ile 0.005176 arasında değiştiği görülmektedir. Diğer kaplamalarda olduğu gibi Mullit Yitriya kaplamasında da termal yayınım değerinde düşüş gözlenmiştir. Fakat azalış miktarının çok düşük olduğu yani termal yayınının çok düşük olduğu görülmektedir.

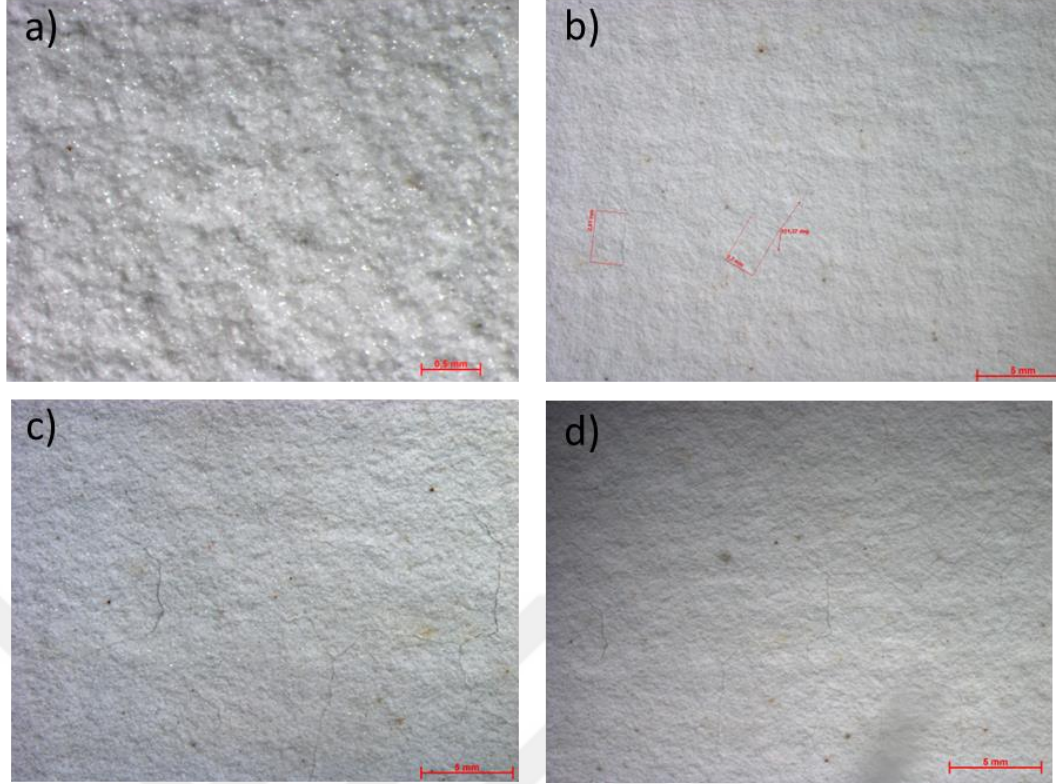
H. Samadi ve E.García da yapmış oldukları 2 katmanlı müllit/ forsterit kaplaması deneysel çalışmasında 600 °C ve 800 °C sıcaklıkta lazer flaş metodu kullanılarak ölçülen hem de hesaplanan termal yayınım değerlerinin artan sıcaklıkla düştüğünü göstermişlerdir [75]. Şekil 5.23’te H. Samadi ve Garcia’nın yapmış oldukları müllit/ forsterit kaplı numunenin ölçülen ve hesaplanan termal yayınım değerlerinin sıcaklık ile değişim grafiği verilmiştir. Çalışmamızdaki elde edilen sonuçlara benzer değerler elde edilmiş ve artan sıcaklığa bağlı olarak termal yayınım değerinin düştüğü gözlenmiştir. Oksit esaslı malzemelerde termal yayınım temel mekanizması fonon titreşimleri ile ortaya çıktığı bilinmektedir [76]. Artan sıcaklıkta fonon titreşimleri dengesizleşerek ısı iletimini engellemektedir.



Şekil 5.23. Mullit-forsterit kaplanmış numunenin termal yayılım değerlerinin sıcaklık ile değişimi [75].

5.4. Termal Şok Testi Sonuçlarının İncelenmesi

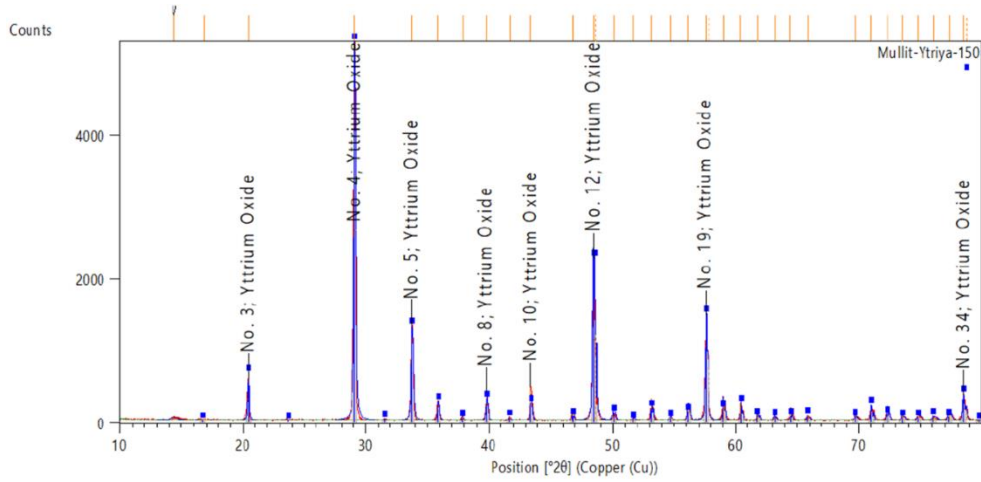
Termal şok testi öncesinde ve sonrasında numune her 50 çevrimde bir yani, termal şok öncesi, 50. çevrim sonrası, 100. çevrim sonrası ve 150. çevrim sonrasında optik mikroskop ile incelenmiştir. Optik mikroskop görüntüleri aşağıda Şekil 5.24'te verilmiştir.



Şekil 5.24. Müllit-Yitriya kaplamasının optik mikroskop görüntüleri a) Termal şok öncesi b) 50 çevrim termal şok sonrası c) 100 çevrim termal şok sonrası d) 150 çevrim termal şok sonrası.

50 çevrim sonrası alınan optik mikroskop görüntülerinde kaplamada çatlaklar görülmüştür. 100. ve 150. çevrim sonunda alınan optik mikroskop görüntülerinde kaplamada görülen bu çatlakların boyutlarında pek bir değişim gözlenmemiştir.

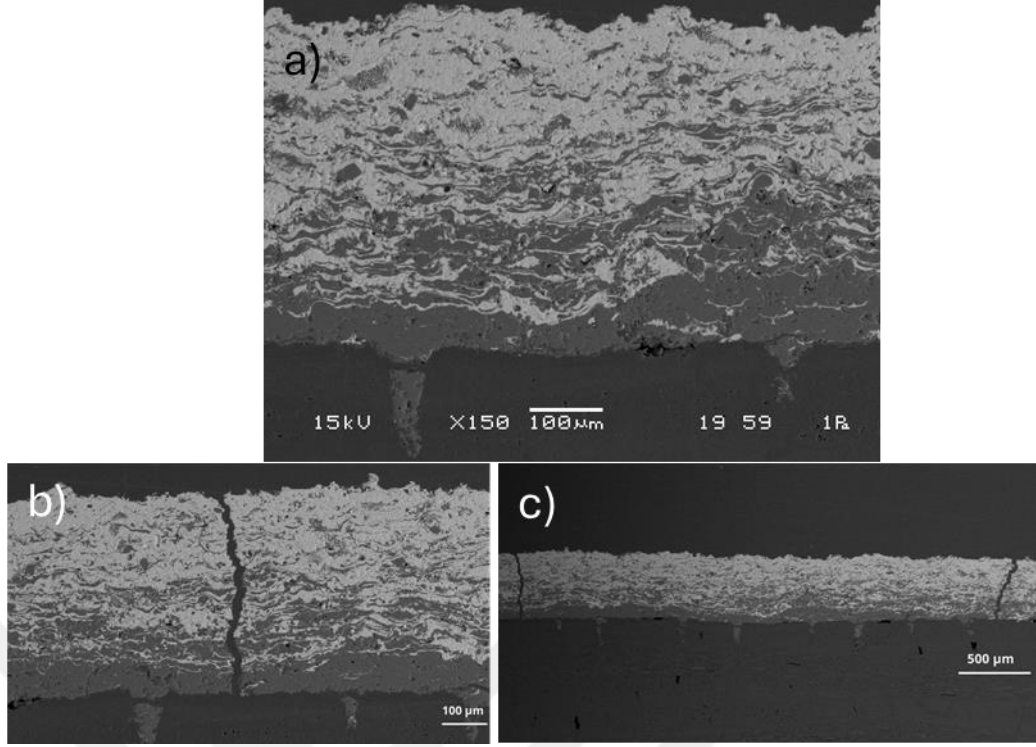
Şekil 5.25'te Müllit-Yitriya kaplamasının 150 çevrim termal şok testi sonrasında XRD analiz cihazından alınan XRD paterni verilmektedir. Termal çevrim sonrası kaplamada herhangi bir faz değişimine rastlanılmamıştır.



Şekil 5.25. Müllit-Yitriya kaplamasının 150 çevrim termal şok sonrası XRD analizi.

Şekil 5.26’da Müllit-Yitriya kaplamasının Karbon-Karbon kompoziti üzerine yapılan kaplamanın termal çevrim öncesi ve 150 çevrim sonrasında alınan SEM görüntüsü verilmiştir. Görselden anlaşılacağı üzere, kaplamada çevrim öncesi çatlaklar gözlenmezken 150. çevrim sonrası çatlak oluşumları gözlenmiştir. Stereo mikroskop incelemelerinde çatlak varlığı 50. çevrimde tespit edilmiş ve SEM incelemesinde ise mevcut çatlığın, altlığa kadar ulaştığı ancak altlık arayüzünde durduğu anlaşılmaktadır. Termal bariyer kaplama sistemlerinde bu tür çatlaklar oluşma mekanizması, termal genleşme katsayılarının uyumsuzluğundan olduğu bilinmektedir [77].

Yüzeyde başlayan çatlaklar altlığa ulaştığında altlıktan elastik modül farkından dolayı yatayda seyretmektedir. Bu kaplamada ise çatlığın altlığa ulaşmasına rağmen durduğu gözlenmiştir. Aslında bunun termal çevrim ömrü anlamında olumlu bir durum olduğu bilinmektedir [78]. Fakat bu yapının ÇBK yapısında su buharının altlığa ulaşması için bir yol oluşturması açısından tehlikeli bir sonuç olacağı düşünülmektedir.



Şekil 5.26. Karbon – Karbon kompoziti üzerine yapılan Müllit-Yitriya kaplamasının
a) Termal çevrim öncesi SEM görüntüsü b) 150 çevrim sonrası yüksek
büyütme c) 150 çevrim sonrası genel görünüm.

Şekil 5.26’da SEM analizinde termal şok testi sonrasında karşılaşılan çatlaklar net bir şekilde görülmektedir. Bu çatlaklar termal genleşme katsayı uyumsuzluğundan kaynaklanmaktadır. Çatlakların sadece kaplamada olduğu görülmüştür. Ana malzeme yani altlık malzemesinde çatlak oluşmadığı görülmüştür.



6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada alumina-müllit, alümina-zirkon ve müllit-yitriya toz kombinasyonlarından atmosferik plazma sprej (APS) yöntemiyle kademeli kaplamalar yapılmış ve bu kaplamaların mikroyapı, faz ve termal özellikleri incelenmiştir.

- Kaplamada kullanılan tozların tercih edilen kaplama prosesi için uygun ve kaplamaya elverişli olduğu görülmüştür. Kullanılan tozların altlık malzemesine yapışmasında bir sorunla karşılaşılmamıştır.
- XRD analiz sonuçlarında, plazma sprej prosesi sonrasında alümina-müllit içeren kaplama yapısında amorf faz gözlenirken, alümina-zirkon kaplamasında amorf fazı çok az gözlemlenmiştir.
- Termal yayılım analizi sonucunda kaplamalarda yayılım değerinin sıcaklık ile düştüğü tespit edilmiştir. Doğrudan termal iletim katsayısına dönüştürülmeden yapılan bu testler, oksit esaslı malzemelerin sıcaklığa bağlı olarak latis davranışlarını da ortaya koymaktadır.
- Termal çevrim testlerinde karbon karbon kompozite yapılan kaplamalarda, ilk çevrimlerde oluşan çatlakların altlığa kadar ulaştığı ancak yatay seyir göstermediği anlaşılmıştır. Termal çevrim şartları açısından olumlu bir durumun su buharı korozyonu açısından olumsuz olacağı sonucunu olduğu bulunmuştur.

Bu çalışmanın sonuçlarından faydalanmak isteyen diğer araştırmacıların, kaplamanın mekanik özelliklerinin termal çevrim özellikleri arasındaki ilişkiyi incelemeleri tavsiye edilmektedir. Sistemin daha iyi anlaşılabilmesi için DTA, TGA ve sertlik gibi ek analiz yöntemlerinin kullanılması, kaplamaların mekanik özelliklerinin incelenmesi önerilmektedir. Özellikle termal çevrim sırasında tespit edilen çatlakların ilerleme şekilleri kaplama – altlık mekanik uyumunda önemli olduğu sonucunu ortaya koymuştur.



KAYNAKLAR

- [1] *National Research Council: Coatings for High Temperature Structural Materials, Trends and Opportunities.* (1996). The National Academies Press.
- [2] Kaya, Ö.A., Çakır, K., Bozkurt, Y. (2017). Coating of Different Alloys on Carbon Steel by Plasma Spray Method. *Uluslar: Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Derg.*, 9(3), 36-42. <https://doi.org/10.29137/umagd.372934>
- [3] ResearchGate Business Solutions (2024, 11 Eylül). Havacılıkta Termal Bariyer Kaplama Kullanımı. <https://www.researchgate.net/publication/339787281> adresinden 17 Ekim 2024 tarihinde alınmıştır.
- [4] Arusan, Ö.E., Falay, E.Ö., Çalışkanelli B. (2022, 16-19, Kasım). Design with Composite Materials in Sealing Technologies. TMMOB Makina Müh. Odası İzmir Şubesi. *IX. Ulusal Hidrolik Pnömatik Kongresi*, İzmir, Türkiye.
- [5] Zhu, D. (2017, Kasım, 5-9). Development of Advanced Environmental Barrier Coatings for SIC/SIC Composites at NASA GRC: Prime Reliant Design and Durability Perspectives [Oral presentation]. Science and Technology of Materials, Design, Applications, Performance and Integration An ECI Conference, Santa Fe, USA.
- [6] Bengi, T. (2009). *Termal Bariyer Kaplamaların Isıl Özelliklerinin İncelenmesi ve Düşük Termal İletkenlik İçin Parametre Optimizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [7] Guo, H. (2023). *Thermal Barrier Coatings* (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- [8] Avcı, A. (2015). *Termal Bariyer Kaplamaların Oksidasyon ve Sıcaklık Korozyonu Davranışlarının İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Yıldız Teknik Üniversitesi.
- [9] Yang, F. (2011). *Electrical and Thermal Properties of Yttria-Stabilised Zirconia (YSZ) Based Ceramic Materials* [Doctoral Thesis]. The University of Manchester.
- [10] Molina-Reyes, J., Tiznado, H., Soto, G. Et al. (2018). Physical and electrical characterization of yttrium-stabilized zirconia (YSZ) thin films deposited by sputtering and atomic-layer deposition. *Journal of Material Science*, 29, 15349-15357. <https://doi.org/10.1007/s10854-018-8909-3>
- [11] Schmitt-Thomas, K.G., Herter, M. (1999). Improved oxidation resistance of thermal barrier coatings. *Surface and Coating Technology*, 120-121, 84-88 [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(99\)00345-X](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(99)00345-X)
- [12] Zubacheva, O.A. (2004). *Plasma-Sprayed and Physically Vapor Deposited Thermal Barrier Coatings: Comparative Analysis of Thermoelastic Behavior Based on Curvature Studies*, [Master-Thesis]. Rheinisch Westfälischen Technischen Hochschule Aachen.

- [13] Minisker, M.A. (2009). *Termal Sprey Yöntemiyle Oluşturulan Kaplamaların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [14] Ersoy, N. M., Aydoğdu H.M., Değirmenci, B. Ü., Çökük, N., Sevimay, M. (2015). The effects of sintering temprature and duration on the flexural strength and grain size of Zirconia. *Acta Biomaterialia Odontologica Scandinavica*, 1(2-4), 43-50. <https://doi.org/10.3109/23337931.2015.1068126>
- [15] Hu X., Xie Y., Li, F., Yin, F., (2024) Research Progress on Environmental Corrosion Resistance of Thermal Barrier Coatings: A Review. <https://doi.org/10.3390/coatings14101341>
- [16] Saruhan, B., Schulz, U., Fröhlich, M., Braun, R., Renteria, A. F., Leyens, C. (2007, September, 10-13). Advanced Coatings for Rotating Aero Engine Components. Proc. First CEAS European Air and Space Conference Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress, Berlin, Germany.
- [17] Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı (2024, 21 Kasım). Plazma Sprey. <https://teslab.sakarya.edu.tr/tr/icerik/10714/42047/plazma-sprey> adresinden 21 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- [18] Uluslar Hadde Termal Bariyer Kaplama (2024, 21 Kasım). Atmosferik Plazma Sprey (APS) Kaplama Yöntemi. <https://uslularhadde.com/termal-bariyer-kaplama> adresinden 21 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- [19] Karabulut, A. (2014). *Yüksek Hızlı Oksi-Yakıt Püskürtme Teknolojisi ile Hidroksiapatit Kaplama* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [20] Karaoğlu, A.C., Türk A., Üstel, F. (2013). Cold Gas Dynamic Spray (CGDS) Technology and Applications. *Academic Platform Journal of Engineering and Science* 1(1), 20-27. Doi:10.5505/apjes.2013.55264
- [21] Özçelik, Ö. (2019). *Çevresel Bariyer Kaplama Uygulamaları İçin Nadir Toprak Elementleri Silikat Seramiklerin Üretimi ve Isıl Davranışlarının İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Afyon Kocatepe Üniversitesi.
- [22] Tejero-Martin, D., Benett, C., Hussain, T. (2020). A Review on Environmental Barrier Coatings: History, Current State of the Art and Future Developments. *Journal of the European Ceramic Society*, 41(2021), 1747-1768. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2020.10.057>
- [23] Xu, Y., Hu, X., Xu, F. and Li, K. (2017). Rare earth silicate environmental barrier coatings: Present status and prospective. *Ceramics International*, 43(8), 5847-5855. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.01.153>
- [24] Prashar, G., Vasudev, H. Thakur, L. (2023). A Comprehensive Review on the Hot Corrosion and Erosion Performance of Thermal Barrier Coatings. *Protection of Metals Physical Chemistry of Surfaces*, 59, 461-492.
- [25] Miller, R. A. Zhu, D. M. (2004). Thermal and Environmental Barrier Coatings for Advanced Turbine Engine Applications. MRS Fall Meeting, Boston, ABD.

- [26] Mechnich, P., Braue, W. (2010). YSZ Environmental Barrier Coatings for Oxide/Oxide Ceramic Matrix Composites. 7th International Conference on High Temperature Ceramic Matrix Composites, Bayreuth, Deutschland.
- [27] Mechnich, P., Braue, W., Hackemann, S., Göring, J. (2008). Processing, Properties and Evaluation of Environmental Barrier Coatings for Oxide/Oxide Ceramic Matrix Composites. 32nd International Conference on Advanced Ceramics and Composites, Daytona Beach, FL, USA.
- [28] Suzuki, M., Shahien, M., Shinoda, K., Akedo, J. (2022). The Current Status of Environmental Barrier Coatings and Future Direction of Thermal Spray Process. *Material Transactions*, 63(8), 1101-1111. <https://doi.org/10.2320/matertrans.MT-T2021003>
- [29] Steibel, J. (2019). Ceramic matrix composites taking flight at GE Aviation. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 98(3), 30-33.
- [30] Lee, K. N., Zhu, D., Lima, R. S. (2021). Perspectives on Environmental Barrier Coatings Manufactured via Air Plasma Spray (APS) on Ceramic Matrix Composites: A Tutorial Paper. *Journal of Thermal Spray Technology*, 30(1-2), 40-58.
- [31] Presby, M.J., Stokes, J.L., Harder, B.J., Lee, K.N., Hoffman, L.C. (2023). High Temperature Solid Particle Erosion of Environmental and Thermal Barrier Coatings. *Coatings*, 13(5), 902. <https://doi.org/10.3390/coatings13050902>
- [32] Li, K., Wang, W., Yang, T., Liu, Y. (2023). Simulation of 1500 °C Thermal Shock for Novel Structural Thermal/Environmental Barrier Coatings System. *Coatings*, 13(1), 96. <https://doi.org/10.3390/coatings13010096>
- [33] Chen, L., Wang, J., Zhang, L., Li, B., Luo, K.R., Tian, J., Xu, H., Feng, J. (2023). Ferroelastic Rare-Earth Tantalates for Multifunctional Thermal/Environmental Barrier Coatings: A Perspective. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(3), 1822-1834. <https://doi.org/10.1111/jace.19400>
- [34] Lee, K. N., Opila, E.J. (2002). Mullite+CAS Bond Coat for Environmental Barrier Coatings for Si-Based Ceramics. High Temperature Materials: Proceedings of a Symposium in Honor of the 65th Birthday of Professor Wayne L. Worrel. The Electrochemical Society, 2002(5), 263.
- [35] Lee, K.N., Fox, D.S., Robinson, R. C., Bansal, N.P. (2006). Environmental Barrier Coatings for Silicon-Based Ceramics. High Temperature Ceramic Matrix Composites, 224-229. doi:10.1002/3527605622.ch36
- [36] Shaw, R.J. (2000). NASA's Ultra-Efficient Engine Technology (UETT) Program/Aero-Propulsion Technology Leadership for the 21st Century. ICAS2000-6102.1, Harrogate, UK.
- [37] Lee, K.N., Roode, V. M. (2019). Environmental Barrier Coatings Enhance Performance of SiC/SiC Ceramic Matrix Composites, *Am. Cer. Soc. Bull.* 98(30), 46-53.

- [38] Lenz L. M., Degenhardt, U., Krenkel, W., Schafföner, S., Motz, G. (2022). In Situ Generated $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ Environmental Barrier Coatings for Protection of Ceramic Components in the Next Generation of Gas Turbines. *Advanced Materials Interfaces*, 9(11), 2102255. <https://doi.org/10.1002/admi.202102255>
- [39] Chen, L., Yang, B., Li, G., Yang, G. (2023). Thermochemical Stability of $\text{Yb}_2\text{Si}_2\text{O}_7$ Environmental Barrier Coatings During Thermal Cycling and Water Vapor Corrosion at 1350 °C. *Journal of Thermal Spray Technology*, 32, 1811-1827.
- [40] Matsumoto, S., Ito, A. (2021). Preparation of $\text{HfO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3$ Nanocomposite films using chemical vapor deposition. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 129(1), 1-6. <https://doi.org/10.2109/jcersj2.20156>
- [41] Lee, K.N., Fox, D. S., Bansal, N.P. (2005). Rare Earth Silicate Environmental Barrier Coatings For SiC/SiC Composites And Si_3N_4 Ceramics. *Journal of the European Ceramic Society*, 25(10), 1705-1715. <https://doi.org/10.1016/j.jeurceramsoc.2004.12.013>
- [42] Kırbıyık, F. (2016). *Fonksiyonel Derecelendirilmiş Al_2O_3 / CYSZ Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [43] Altuncu, E. (2011). *YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [44] Çamyurdu, C. (2024). *Biyouyumluluk İçin CVD / CVI Yöntemiyle Üretilen Karbon/ Karbon Kompozitlerin Araştırılması* [Yüksek Lisans Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [45] Erdoğan, G. (2009). *Çevresel Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Karakterizasyonu* [Yüksek lisans tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- [46] Di Ioria, G., Paglia, L., Pedrizzetti, G., Genova, V., Marra, F., Bartuli, C., Pulci, G. (2023). Ytterbium Disilicate/Monosilicate Multilayer Environmental Barrier Coatings: Influence of Atmospheric Plasma Spray Parameters on Composition and Microstructure. *Coatings*, 13(9), 1602. <https://doi.org/10.3390/coatings13091602>
- [47] Vaßen, R., Bakan, E., Gatzen, C., Kim, S., Mack, D.E., Guillon, O. (2019). Environmental Barrier Coatings Made by Different Thermal Spray Technologies. *Coatings*, 9(12), 784. <https://doi.org/10.3390/coatings9120784>
- [48] Bakan, E., Mauer, G., Vaßen, R. (2017). An Assesment of Thermal Spray Technologies for Deposition of Environmental Barrier Coatings (EBC). International Thermal Spray Conference. Düsseldorf, Germany.
- [49] Pawlowski L. (2008) *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings* (2nd Edition). John Wiley&Sons.
- [50] Kim, K., Kim, W. (2021). Effect of Heat Treatment on Microstructure and Thermal Conductivity of Thermal Barrier Coating. *Materials*, 14(24), 7801. <https://doi.org/10.3390/ma14247801>

- [51] Gatzen, C., Smokovych, I., Scheffler, M., Krüger, M. (2020). Oxidation Resistant Environmental Barrier Coatings for Mo-Based Alloy: A Review. *Advanced Engineering Materials*. <https://doi.org/10.1002/adem.202001016>
- [52] Ji-Hao, Z., Kai-Qiang, S., Min, Z., Zi-Peng, Z., Qingbing, H., Zhong-Sheng, L. (2017). Development Trend of High Performance Ceramic Coatings and Preparation Technologies.
- [53] Ruhr-Universität Bochum. Faculty of Chemistry and Biochemistry. (2020, November 24). Group Devi – Inorganic Materials Chemistry » CVD. <https://imc.ruhr-uni-bochum.de/fieldsofresearch/cvd/> adresinden 24 Kasım 2024 tarihinde alınmıştır.
- [54] Badanayak, P., Vastrad, J.V. (2021). Sol-gel- Process for synthesis of nanoparticles and applications thereof. *The Pharma Innovation Journal*, 10(8), 1023-1027.
- [55] Chang, C., Rad, S., Gan, L., Li, Z., Dai, J., Skhahab, A. (2023). Review of the sol-gel method in preparing nano TiO₂ for advanced oxidation process. *Journal Nanotechnology Reviews*, 12 (1). <https://doi.org/10.1515/ntrev-2023-0150>
- [56] Yan, Z., Xu, Y., Li, J. (2014). Preperation and characterisation of threee-layered environmental barrier coatings onto silicon carbide substrate. *Materials Research Innovations*, 18, S4-963-S4-967. DOI 10.1179/1432891714Z.0000000000875
- [57] Varanasi, V.G., Besmann, T.M., Lothian, J.L., Xu, W., Starr, T.L. (2003). Chemically Vapor Deposited Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) for Thermal and Environmental Barrier Coating. 17th Annual Conference on Fossil Energy Materials, Baltimore, US.
- [58] Braue, W., Mechnich, P. (2007). Tailoring Protective Coatings for All-Oxide Ceramic Matrix Composites in High Temperature-/ High Heat Flux Environments and Corrosive Media. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 38 (19), 690-697.
- [59] Vasile, B.S., Birca, A. C., Surdu, V.A., Neacsu, I.A., Nicoara, A.I. (2020). Ceramic Composite Materials Obtained by Electron-Beam Physical Vapor Deposition Used as Thermal Barriers in the Aerospace Industry. *Nanomaterials*, 10(2), 370. <http://doi.org/10.3390/nano10020370>
- [60] Lee, K.N. (2000). Current Status of Environmental Barrier Coatings for Si-Based Ceramics. *Surface and Coating Technology*, 133-134, 1-7. [https://doi.org/10.1016/S0257-8972\(00\)00889-6](https://doi.org/10.1016/S0257-8972(00)00889-6)
- [61] Raut, H. K., Ganesh, V. A., Nair, A. S., & Ramakrishna, S. (2011). Anti-Reflective Coatings: A Critical, In-depth Review. *Energy & Environmental Science*, 4, 3779-3804. Doi:10.1039/c1ee01297e.
- [62] Lu, Y., & Wang, Y. (2018). Formation and Growth of Silica Layer Beneath Environmental Barrier Coatings Under Water-vapor Environment. *Journal of Alloys and Compounds*, 739, 817–826. Doi:10.1016/j.jallcom.2017.12.297

- [63] Eaton, H. E., & Linsey, G. D. (2002). Accelerated Oxidation of SiC CMC's by Water Vapor and Protection via Environmental Barrier Coating Approach. *Journal of the European Ceramic Society*, 22(14-15), 2741–2747. Doi:10.1016/s0955-2219(02)00141-3
- [64] Lv, B., Qu, Z., Xu, B., Wang, Y., & Fang, D. (2021). Water Vapor Volatilization and Oxidation Induced Surface Cracking of Environmental Barrier Coating Systems: A Numerical Approach. *Ceramics International*, 47(12), 16547–16554. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.02.225>
- [65] Roy, J., Chandra, S., Das, S., Maitra, S. (2014). Oxidation Behaviour of Silicon Carbide-A Review. *Rev. Adv. Mater. Sci*, 38(1), 29-39.
- [66] Jacobson, N. S., Fox, D. S. and Opila, E. J. (1998). High Temperature Oxidation of Ceramic Matrix Composites. *Pure and Applied Chemistry*, 70(2), 493-500. <https://doi.org/10.1351/pac199870020493>
- [67] Zhong, X., Liang, R., Hong, D., Fan, D., Wu, Y., Wang, L., Li, Q., Niu, Y., & Zheng, X. (2023). Corrosion Behavior and Mechanism of Ytterbium Silicates Environmental Barrier Coatings to Thermal Cycling in Water Vapor. *Journal of the American Ceramic Society*, 107(1), 387-403. <https://doi.org/10.1111/jace.19403>
- [68] Dong, S., Lü, K., Wang, Y., Zeng, J., Yuan, J., Jiang, J., Deng, L., & Cao, X. (2022). High-Temperature Corrosion of HfSiO₄ Environmental Barrier Coatings Exposed to Water Vapor/Oxygen Atmosphere and Molten Calcium Magnesium Aluminosilicate. *Corrosion Science*, 197, 110081. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2021.110081>
- [69] Dong, L., Liu, M., Zhang, X., Yang, G., & Zhou, K.S. (2022). Improved Water Vapor Resistance of Environmental Barrier Coatings Densified by Aluminum Infiltration. *Ceramics International*, 48(16), 23638-23648. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.05.012>
- [70] AYBÜ Merkez Araştırma Laboratuvarı Uygulama ve Araştırma Merkezi. (2024, 10 Aralık). Linseis LFA 1000 Lazer Flaş Isıl İletkenlik/Isıl Yayılm Katsayısı Analiz Cihazı. <https://aybu.edu.tr/GetFile?id=00ebb581-a33a-4917-bf1f-91730a08f3e4.pdf> adresinden 17 Aralık 2024 tarihinde alınmıştır.
- [71] D. Zillmann, A. Waag, E. Peiner, M.-H. Feyand & A. Wolyniec. (2018). Thermoelectric and Structural Properties of Zr-/Hf-Based Half-Heusler Compounds Produced at a Large Scale. *Journal of Electronic Materials*, 47, 1546-1554. <http://dx.doi.org/10.5772/65115>
- [72] Wikipedia (2024, 18 Aralık). Laser flash analysis. https://en.wikipedia.org/wiki/Laser_flash_analysis adresinden 19 Aralık 2024 tarihinde alınmıştır.
- [73] Nakamori F., Ohishi Y., Muta H., Kurosaki K., Fukumoto K., Yamanaka S. (2017). Mechanical and Thermal Properties of ZrSiO₄. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 54(11), 1267-1273. <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1359117>

- [74] NTRS - NASA Technical Reports Server. (2024, 25 Mayıs). New generation of plasma-sprayed mullite coatings on silicon carbide. <https://ntrs.nasa.gov/citations/19960010009> adresinden 13 Aralık 2024 tarihinde alınmıştır.
- [75] Samadi, H. and García, E. (2014). Thermal Conductivity of Plasma Sprayed Forsterite/Mullite Coatings. *Ceramics International*, 40(2014), 13995–13999.
- [76] Jain, D., Pillai, C.G.S., Rao, B.S., Kulkarni, R.V., Ramdasan, E., Sahoo, K.C. (2006). Thermal Diffusivity and Thermal Conductivity of Thoria–Lanthana Solid Solutions Up to 10 mol.% LaO_{1.5}. *Journal of Nuclear Materials*, 353 (2006) 35-41.
- [77] Duan, Z., Deng, L., Lü, K., Dong, S., Xie, Y., Luo, Z., Jiang, J., Chen, W., Cao, X. (2024). Thermal Cycle and Water Oxygen Performance of Multi-Layered Y₃Al₅O₁₂/ Yb₂SiO₅/Yb₂Si₂O₇ Thermal/Environmental Barrier Coatings. *Ceramics International*, 50(9), 16309-16317. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.112>
- [78] Chen, D., Dambra, C., Dorfman, M. (2020). Process and Properties of Dense And Porous Vertically-Cracked Yttria Stabilized Zirconia Thermal Barrier Coatings. *Surface and Coatings Technology*, 404(2020), 126467. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126467>



ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Esat ÖZDEMİR

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2010, Fırat Üniversitesi, Mühendislik, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- **Eğitim** : 2017, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Kaynak Teknoloji Merkezi, Kaynak Mühendisliği

MESLEKİ DENEYİM :

- 2010-2017 yılları arasında çeşitli firmalarda üretim, satınalma, kalite kontrol birimlerinde Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak çalıştı.
- 2017 yılından itibaren boru hattı, enerji santrali, çelik konstrüksiyon projelerinde Kaynak Mühendisi olarak çalıştı ve şu anda bir vagon projesinde Kaynak Mühendisi olarak çalışmaktadır.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- Erdoğan G., Özdemir E. (2024, 17-19, Kasım). Production and Characterization of Compositionally Graded Environmental Barrier Coatings. *El Ruha 12. International Conference on Scientific Resource – Iksad Publications*, Şanlıurfa, Türkiye.