



T.C.
KONYA TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN
YÜKSEK SICAKLIKTAKİ KATI PARTİKÜL
EROZYON AŞINMA DAVRANIŞININ
İNCELENMESİ

Musa DEMİRCİ

DOKTORA TEZİ

Makine Mühendisliği Anabilim Dalı

Mart - 2020
KONYA
Her Hakkı Saklıdır

KABUL VE ONAYI

Musa DEMİRCİ tarafından hazırlanan "Termal Bariyer Kaplamaların Yüksek Sıcaklıkta Katı Partikül Erozyon Aşınma Davranışının İncelenmesi" adlı tez çalışması 13/03/2020 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı'nda DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan

Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI

Danışman

Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

Üye

Prof. Dr. Mehmet ÇELİK

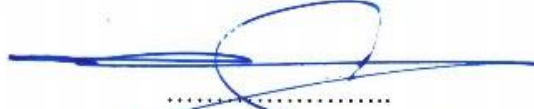
Üye

Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN

Üye

Dr. Öğr. Üyesi Ali Serhat ERSOYOĞLU

İmza



Yukarıdaki sonucu onaylarım.

Prof. Dr. Saadettin Erhan KESEN
Enstitü Müdürü

Bu tez çalışması Konya Teknik Üniversitesi BAP Koordinatörlüğü tarafından 18201072 nolu Doktora Tez Projesi olarak desteklenmiştir.

TEZ BİLDİRİMİ

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

DECLARATION PAGE

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



Musa DEMİRÇİ

13.03.2020

ÖZET

DOKTORA TEZİ

TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN YÜKSEK SICAKLIKTA KATI PARTİKÜL EROZYON AŞINMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Musa DEMİRCİ

**Konya Teknik Üniversitesi
Lisansüstü Eğitim Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Doç. Dr. Mehmet BAĞCI

2020, 133 Sayfa

Jüri

**Doç. Dr. Mehmet BAĞCI
Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI
Prof. Dr. Mehmet ÇELİK
Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN
Dr. Öğr. Üyesi Ali Serhat ERSOYOĞLU**

Bu tez çalışmasında, günümüzde enerji dönüşüm santralleri, uzay havacılık sistemleri, jet motorları ve gaz türbinleri gibi sistemlerde kullanılan yüksek sıcaklık çalışma koşullarına sahip malzemeler üzerine dayanım artışı ve ısı yalıtımı amacı ile uygulanan Termal Bariyer Kaplamaların (TBK), Yüksek Sıcaklık Katı Partikül Erozyon (YSKPE) aşınma davranışları incelenmiştir. Deneylerde, ortam değişkenliği etkinliğindeki çalışma sıcaklıkları ve farklı aşındırıcı partikül çarpma açıları ile sabit çarpma hızı ve aşındırıcı partikül boyutu kullanılarak erozyon aşınmasına etki eden güncel ve kapsamlı parametreler araştırılmıştır.

Erozyon aşınma deneylerinin karşılaştırmalı etkilerini gözlemlemek amacıyla oda sıcaklığında (21°C) ve yüksek sıcaklıklardaki (300°C ve 600°C) erozyon direnci üzerine çalışmalara odaklanılmış olup özellikle yüksek sıcaklık etkisinde erozyon aşınmasının belirlenmesi üzerine bugüne kadar ülkemizde yapılan çalışmalardan farklı bir özgünlüğü ortaya koymuştur. Yüksek sıcaklık şartlarına uyumlu erozyon aşınma deneylerinin yapılabilmesi amacıyla kompresör girişindeki havanın ısıtılıp basınçlandırılması sonrasında aşındırıcı partikül ile birleştirilerek deney numune yüzeyine çarptırıldığı ve ülkemizde bugüne kadar uygulaması bulunmayan ASTM G211 uluslararası kabul görmüş standart test metoduna uygun olarak özel tasarlanmış YSKPE test cihazında aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deneylerin yapımı esnasında ihtiyaç duyulan ve erozyon aşınmasını ölçmede temel bileşen olan aşındırıcı partikül çarpma hızı, literatürde var olan ve deneysel olarak belirlenen çift disk metoduna uyumlu olacak şekilde yeni bir partikül çarpma hız ölçme düzeneği ortaya konularak ~97 m/s değerinde aşındırıcı partikül çarpma hızı belirlenmiştir.

Deneylerde yüksek dayanıma sahip süper alaşım Inconel 718 altlık malzemesi seçilmiş olup bu malzeme yüzeyine Atmosferik Plazma Sprey (APS) yöntemi uygulanarak elde edilen iki farklı bağ kaplaması (NiCrAlY ve NiCoCrAlY) ile bu iki bağ kaplaması üzerine ayrı ayrı uygulanan ZrO₂-8Y₂O₃ (8YSZ) özelliğe sahip seramik üst kaplamalar sonucunda dört farklı deney numunesi üretilmiştir. Elde edilen deney numune gruplarının mekanik özelliklerini belirlemek amacıyla sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik ölçümleri yapılmıştır. Ölçülen değerlerin ortalaması ve standart sapması alınarak deney numune gruplarının istatistiksel olarak anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığını belirlemek amacıyla t testi kıyaslamaları gerçekleştirilmiştir. Bu numuneler daha sonra üç farklı çarpma açısı (30°, 60° ve 90°), üç farklı sıcaklık değeri (21°C, 300°C ve 600°C) ile 400 µm Alümina (Al₂O₃) aşındırıcı partikül etkisinde ve ~97 m/s sabit çarpma hızında YSKPE deneylerine tabi tutulmuştur. Deneysel sonuçlara bağlı olarak sıcaklık, çarpma açısı, aşındırıcı boyutu ve çarpma hızı etkisindeki erozyon oranı grafikleri oluşturularak deney numunelerine ait yüzey deformasyonlarının SEM görüntüleri alınmış ve yüzey deformasyonları

yorumlanmıştır. Ayrıca APS yöntemi ile kaplama işlemi uygulanan deney numunelerinin EDX ve EDX haritalama ile yüzeylerinden görüntü alınarak numunelerdeki elemental homojenlik durumları ispatlanmıştır.

Yapılan deneyler sonucunda, sadece bağ kaplanmış numunelerin erozyon aşınmasıyla uyumlu sünek malzeme davranışı gösterdiği ve en fazla erozyon aşınmasını 30° aşındırıcı partikül çarpma açısında gerçekleştirdiği belirlenirken seramik üst kaplama uygulanmış numuneler ise erozyon aşınmasıyla uyumlu gevrek malzeme davranışı göstererek en fazla erozyon aşınmasının 90° aşındırıcı partikül çarpma açısında gerçekleştiği belirlenmiştir. Bu durum göstermiştir ki çarpma açısındaki farklılığa bağlı olarak numunelerdeki erozyon oranı kıyaslamaları yapıldığında termal bariyer etkinliğinin sonucunda 600°C sıcaklıktaki deneylerde erozyon aşınmasına direnç artış eğiliminde olmuştur. Bağ kaplanmış numunelerde yapıya dahil edilen Kobalt (Co) etkisi erozyon direncini artırmada olumlu yönde katkı sağlarken, seramik üst kaplamalarda ise deney numune yapısındaki artan gözeneklilik ile erozyon oranı değerlerinde artış olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Atmosferik Plazma Sprey (APS), Gaz Türbinleri, SEM, t testi, Süper Alaşım (Inconel 718), Termal Bariyer Kaplama (TBK), Yüksek Sıcaklık Katı Partikül Erozyonu (YSKPE).



ABSTRACT**PhD THESIS****INVESTIGATION OF SOLID PARTICLE EROSION WEAR BEHAVIOUR OF
THERMAL BARRIER COATINGS AT HIGH TEMPERATURE****Musa DEMİRCİ****Konya Technical University
Institute of Graduate Studies
Department of Mechanical Engineering****Advisor: Assoc. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI****2020, 133 Pages****Jury****Assoc. Prof. Dr. Mehmet BAĞCI****Prof. Dr. H. Selçuk HALKACI****Prof. Dr. Mehmet ÇELİK****Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN****Asst. Prof. Dr. Ali Serhat ERSOYOĞLU**

In this study, High Temperature Solid Particle Erosion (HTSPE) wear behaviours of Thermal Barrier Coatings (TBC), which are applied for the purpose of increasing the strength and heat insulation on the materials having high temperature working conditions used in systems such as energy conversion plants, aerospace systems, jet engines and gas turbines, were examined. In the experiments, current and comprehensive parameters affecting erosion wear were investigated using variable operating temperatures at working conditions and different abrasive particle impact angles and constant impact velocity and abrasive particle size.

In order to observe the comparative effects of erosion wear tests, studies on erosion resistance at room temperature (21°C) and high temperatures (300°C and 600°C) have been focused. Erosion tests were carried out in a specially designed HTSPE test ring in accordance with ASTM G211 internationally accepted standard test method. For this purpose, the air at the inlet of the compressor was heated and pressurized and then combined with abrasive particles and hit the test sample surface. Abrasive particle impact velocity was determined as ~ 97 m/s by widely used, simple, and cheap double disc method which stated in the literature.

High strength super alloy Inconel 718 was selected as a substrate material and two different bond coatings (NiCrAlY and NiCoCrAlY) obtained by applying Atmospheric Plasma Spray (APS) method on the surface of this material and, ceramic top coating ($ZrO_2-8Y_2O_3$) were applied separately on these two bond coatings in the experiments. Four different test specimens were obtained as a result of APS coatings. The hardness, surface roughness and porosity measurements were performed to determine the mechanical properties of the experimental groups. Student t test comparisons were performed to determine if the means of two sets of data are significantly different from each other. These samples were subjected to HTSPE tests with three different impact angles (30°, 60° and 90°), three different temperature values, under the effect of 400 µm alumina (Al_2O_3) abrasive particles and constant impact velocity. According to the experimental results, erosion rate graphs were formed according to temperature, angle, abrasive size and velocity effect and SEM images of surface deformations of test specimens were obtained and interpreted wear conditions. In addition, the elemental homogeneity conditions in the samples were proved by taking images from the surfaces of the test samples coated by APS method, with EDX and EDX mapping.

As a result of the experiments, it was found that only bond coated specimens showed ductile material behaviour and maximum erosion wear occurred at 30° abrasive particle impact angle, while ceramic top coated samples showed brittle material behaviour and maximum erosion wear angle was at 90° abrasive particle impact angle. This showed that, when the erosion rate comparisons were made in the

specimens due to the difference in impact angle, resistance to erosion wear tended to increase in the experiments at 600°C as a result of the thermal barrier efficiency. Cobalt (Co) only contributed positively to increase the erosion resistance in the bond coated specimens, while the erosion rate increased with the increased porosity of ceramic topcoats with cobalt added bond coating.

Keywords: Atmospheric Plasma Spray (APS), Gas Turbines, High Temperature Solid Particle Erosion (HTSPE), SEM, Student t test, Super Alloy (Inconel 718), Thermal Barrier Coating (TBC).



ÖNSÖZ

Bu tezin hazırlanmasında en çok emeği geen, ok değerli yardım ve ynlendirmelerini eksik etmeyen, her trl destek ve tecrübelerini esirgemeyerek, çalışmalarım esnasında karşılaştığım sorunları sabırla dinleyen ve çözüm yolları hususunda yön veren başta doktora tez danışmanım Doç. Dr. Mehmet BAĞCI'ya ve doktora tez izleme komitesi yeleri Prof. Dr. Selçuk H. HALKACI ve Prof. Dr. Hüseyin ARIKAN'a ve Doç. Dr. Hüseyin İMREK hocama desteklerinden dolayı teşekkür ederim.

Deneysel alışmaları yapabilmem için gerekli deney setinin yapımında her türlü desteği sağlayan BİOSAN çalışanlarına, deney numunelerinin elde edilmesinde sağladığı destek ile Dr. Öğr. Üyesi Hüseyin ALP hocama ve TEI zel Proses müdürlüğüne katkılarından dolayı şükranlarımı sunarım.

Son olarak sürekli yanımda durarak beni cesaretlendiren, ilham veren eşime en içten minnet duygularımla teşekkürü bir borç bilirim.

Musa DEMİRCİ
KONYA-2020

İÇİNDEKİLER

ÖZET	1
ABSTRACT.....	3
ÖNSÖZ	5
İÇİNDEKİLER	6
SİMGELER VE KISALTMALAR	8
1. GİRİŞ	9
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI	13
2.1. Termal Bariyer Kaplama Uygulamaları	13
2.2. Katı Partikül Erozyon Aşınma Uygulamaları	17
2.3. KPE Aşınma Uygulamalarına Yüksek Sıcaklık Faktörünün Etkisi.....	20
2.4. TBK Uygulamalarına YSKPE Aşınmasının Etkisi	26
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	34
3.1. YSKPE Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Üretimi.....	34
3.2. YSKPE Aşınma Test Cihazı Numune Tutucu Tasarımı ve Üretimi	49
3.3. Partikül Besleme Ünitesi Tasarımı ve Üretimi	54
3.4. Aşındırıcı Partikül Özellikleri.....	59
3.5. Aşındırıcı Partikül Çarpma Hızı Ölçümü	60
3.6. Deney Numunesi Hazırlama	65
3.6.1. Altlık Malzeme	65
3.6.2. Termal Sprey Kaplama Uygulamaları	66
3.6.3. Metalik Bağ Kaplama Uygulaması	69
3.6.4. Seramik Üst Kaplama Uygulaması.....	72
3.7. Deney Numuneleri Mekanik Özellikleri.....	73
3.7.1. Sertlik Ölçümleri.....	73
3.7.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	76
3.7.3. Gözeneklilik Ölçümleri.....	78
3.7.4. Bağ ve Seramik Üst Kaplamaların X-Işını Difraksiyonu (XRD) Analizleri	80
3.8. YSKPE Deneyleri Sonrasında Erozyon Oranının Belirlenmesi	83
4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	86
4.1. Bağ Kaplamaların Erozyon Aşınma Deneyleri Sonuçları	86
4.1.1. Bağ Kaplamaların EDX ve EDX Haritalama Analizleri	86
4.1.2. Bağ Kaplamaların Erozyon Oranlarının Belirlenmesi.....	91
4.1.3. Bağ Kaplamaların SEM Görüntülerinin Analizleri	97
4.2. Seramik Üst Kaplamaların Erozyon Aşınma Deneyleri Sonuçları.....	102
4.2.1. Seramik Üst Kaplamaların EDX ve EDX Haritalama Analizleri.....	102
4.2.2. Seramik Üst Kaplamaların Erozyon Oranlarının Belirlenmesi	106
4.2.3. Seramik Üst Kaplamaların SEM Görüntülerinin Analizleri.....	115

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	120
5.1 Sonuçlar	120
5.2 Öneriler	121
KAYNAKLAR	122
EKLER	128
ÖZGEÇMİŞ	132



SİMGELER VE KISALTMALAR

Simgeler

C_p	: Özgül Isı (kJ/(kgK))
ER	: Erozyon Oranı (mg/g)
I	: Akım Şiddeti (A)
k	: Isı İletim Katsayısı (W/mK)
P	: Olasılık Değeri
R_{hava}	: Havanın gaz Sabiti (kJ/(kgK))
R_a	: Yüzey Profilinin Ortalama Pürüzlülüğü
S	: Rezistans telin kesiti (mm ²)
T	: Sıcaklık (°C)
U	: Gerilim (V)
W_{isit}	: Isıtıcı Gücü (kW)
θ	: Aşındırıcı Partikül Çarpma Açısı (°)
ϑ	: Aşındırıcı Partikül Çarpma Hızı (ms ⁻¹)
ρ	: Yoğunluk (kg/m ³)
\dot{m}	: Kütleli Debi (kg/s)
\dot{V}	: Hacimsel Debi (L/s)
R	: Direnç (Ω)
Φ	: Rezistans telin öz direnci [(Ω*mm ²)/m]

Kısaltmalar

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
ASTM	: Amerikan Test ve Malzeme Kurumu
EB-PVD	: Elektron Işını Demeti-Fiziksel Buhar Biriktirme
EDX	: Elementel Haritalama
HVOF	: Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme
KPE	: Katı Partikül Erozyon Aşınması
MCrAlY	: Metal Krom Alüminyum İtiryum
PIV	: Parçacık Görüntülemeli Akış Hızı Ölçümü
SEM	: Taramalı Elektron Mikroskobu
TBK	: Termal Bariyer Kaplama
TGO	: Termal Olarak Gelişen Oksit Tabaka
XRD	: X-Işını Difraksiyonu
VPS	: Vakumlu Plazma Püskürtme
YSZ	: İtiryum Oksit ile Stabilize Edilmiş Zirkona
Y ₂ O ₃	: İtiryum Oksit
ZrO ₂	: Zirkona

1. GİRİŞ

Dünya nüfusunun artması ile birlikte enerjiye olan ihtiyaç giderek artış göstermektedir. Günümüzde kullanılan enerji kaynaklarının en önemlisi hiç şüphesiz fosil yakıtlardan elde edilen enerjidir. Fosil yakıtlardan elde edilen enerjinin kullanımına bağlı olarak atmosfere salınan karbon miktarı artmakta ve bu da iklim değişikliği üzerine olumsuz etkiler ortaya çıkarmaktadır. Son yıllarda özellikle enerji üzerine yapılan çalışmalarda karbon emisyonunu azaltmak en büyük hedeflerden biri haline gelmiştir. Kyoto protokolünde de belirtildiği gibi 2008-2012 yılları arasında Avrupa'da CO₂ emisyonunu %8 oranında azaltmanın önemi özellikle vurgulanmış olup enerjinin elde edilmesi amacıyla fosil yakıtların kullanılması sonucunda ortaya çıkan sera gazı emisyonları çoğunlukla karbon ve karbondioksit gazlarının yoğun biçimde atmosfere salınımı, küresel ısınma ve iklim değişikliğine neden olmaktadır (Dechamps, 2006). Küresel iklim değişikliği mücadelesi kapsamında karbon emisyonlarının yakalanması, tutulması ve depolanması teknolojileri (Carbon Capture and Storage- CCS) konularında çok yönlü ciddi araştırmalar yapılmaktadır (Conti ve ark., 2016). Bu uygulamaya benzer ve/veya daha farklı alternatif uygulamalarla çözüm arama çalışmaları yoğunlaşarak devam etmektedir. Bu çalışmalarda sera gazı emisyonunu azaltmak için farklı yeni teknikler geliştirilse de bu gelişmeler fosil yakıt kullanan komplike santrallerde meydana gelen Katı Partikül Erozyon (KPE) aşınması problemini ortadan kaldıramamaktadır.

KPE aşınması, en çok karşılaşılan aşınma çeşitlerinden birisi olmakla birlikte son yıllarda önemi giderek artmıştır. Çünkü bu aşınma çeşidi ile uzay havacılık sistemleri, enerji dönüştürme santralleri, jet motorları, helikopter rotor kanatları, türbin ve kömür dönüştürme santralleri ile buna benzer sistemlerde karşılaşmak mümkündür. KPE aşınması, malzeme yüzeyine belirli hızlarda ve açıda katı partiküllerin çarpması sonucu malzeme yüzeyinde meydana gelen aşınma türüdür (Hutchings ve Shipway, 2017). KPE etkisi, çeşitli endüstrilerde kullanılan yüksek değerli parçaların kullanım ömrünü ve verimliliğini önemli derecede azaltmaktadır. Çarpma hızı ve açısı, aşındırıcı partikül boyutu, sertliği, şekli, tipi ve akış oranı ile hedef malzeme özellikleri ve çevresel parametreler KPE aşınmasını etkileyen önemli değişkenler arasında yer almaktadır. Çeşitli endüstri sektörleri ile enerji santrallerindeki kullanım alanlarında ortaya çıkan KPE etkisi ve türü değişiklik göstermektedir. Örneğin uzay motorlarında volkanik kül şeklinde, türbin yanma odalarında kömür külü şeklinde veya petrol sondaj makinalarında mineral madde şeklinde karşılaşılmaktadır (Rajendran, 2012). Gaz türbinlerinde ise döner

ve sabit parçalarda oluşan KPE, bu parçaların verimliliğini kaybetmesine, daha yüksek işletme maliyetine ve türbinlerin bakım maliyetinin artmasına sebep olmaktadır. Stein ve ark. (1999) tarafından yapılan araştırmada ise maliyet açısından bu olumsuz etkilerin, Avrupa Elektrik Endüstrisi verilerine göre bakım masrafları ve verimlilik kaybı gibi sebeplerden dolayı yılda tahmini 200 Milyon Euro ek maliyet ortaya çıkardığı belirlenmiştir. Ayrıca enerji santralleri ve gaz türbinleri önceliğinde partikül etkileşiminin yoğun olduğu yüksek sıcaklık çalışma ortamlarında kullanılan malzemelerin KPE etkisinden dolayı sistemin verimliliği yaklaşık %7-10 arasında azalacağı ve bunun sonucunda da tesisin çalışma ömrü boyunca 250.000 ton ek CO₂ emisyonu ortaya çıkaracağı belirlenmiş olup bu tür sistemlerde yapılacak revizyonların çevreye olumlu etkileri olacağı öngörülerek alternatif çözüm arayışlarının ortaya konması gerekmektedir. Bu sebeple dünya çapında enerji üzerine yoğunlaşmış araştırma merkezleri, enerji nakil hatları, gaz türbin vb. sistemlerde kullanılan dirençli malzemelerin yüksek sıcaklıkta maruz kaldıkları KPE etkilerini araştırma konusuna yoğunlaşmışlardır. Enerji santrallerinde türbin giriş sıcaklığının yükselmesi türbin verimliliğini arttıran bir durum olmakla birlikte türbin giriş sıcaklığının yükselmesi bu yüksek sıcaklığa dayanabilecek gelişmiş malzemelerin kullanılmasını gerekli kılmaktadır. Daha yüksek sıcaklıklar, artan oksidasyon oranlarına ve pul pul dökülmeye yol açarak bileşenlerin yüksek sıcaklıkta katı partikül erozyonunun ortaya çıkmasını arttırmaktadır. Bu yüzden yüksek sıcaklıklarda çalışan türbinlerde kullanılan gelişmiş malzemelerde (örneğin süper alaşımlar vb.) meydana gelen KPE olayını minimize etmek için çalışma sürecinin daha detaylı analiz edilmesi gerekmektedir.

Ayrıca KPE aşınma etkisinin günlük kullanımda gözlemlenebildiği gaz türbinlerinde temel bileşen olarak kullanılan türbin motorları; enerji çevriminde yaygın olarak kullanılan oldukça yüksek teknolojiye sahip, yüksek sıcaklık şartlarında çalışan termo mekanik yüklemelere maruz kalan karmaşık sistemlerdir. Türbin çalışma sıcaklıklarının artışı ile ilişkili olarak türbin motoru parçalarının kullanım ömrü kısalmakta, bakım ve yenileme maliyetleri oldukça yüksek seviyelere ulaşmaktadır. Gaz türbin motorunun termal verimliliği ve kullanım ömrü türbin giriş sıcaklığına, çalışma süresine ve bu süre çerçevesinde maruz kaldığı termal ve mekanik gerilmelere yani Yüksek Sıcaklık Katı Partikül Erozyon (YSKPE) aşınmasına bağlı olarak sınırlanmaktadır. Sonuç olarak; türbin giriş sıcaklıklarının artışı yüksek sıcaklıklara dayanıklı türbin malzemesi ve koruyucu kaplama gereksinimini arttırmaktadır (Altuncu, 2011). Yüksek sıcaklıklarda termal etkilerden koruyucu kaplamaların kullanılması,

motorun türbin giriş sıcaklığını ($T > 1100^{\circ}\text{C}$) artırırken termal verimliliğini artırmakta ve türbin alaşımı yüzeyinde sıcaklıkları düşürerek, soğutma gereksinimini azaltmaktadır. Bu doğrultuda iki katmandan oluşan Termal Bariyer Kaplama (TBK) sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemler için Atmosferik Plazma Sprey (APS) ve Elektron Işını Demeti-Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) metotları günümüzde yaygın olarak kullanılan iki temel yöntem olup tez çalışması kapsamında da malzemelerin kaplanması için APS yöntemi tercih edilmiş olup Süspansiyon Plazma Spreyi (SPS) ve Plazma Sprey-Fiziksel Buhar Biriktirme (PS-PVD) gibi daha yeni termal sprej teknikleri de geliştirme aşamasındadır.

Tipik bir TBK sistemi Ni/Co esaslı süper alaşım üzerine MCrAlY (M: Ni ve/veya Co) esaslı bir bağ tabakası ve termal yalıtım görevi yapan düşük termal iletkenliğe sahip bir stabilize zirkona esaslı seramik bir tabakadan meydana gelmektedir. TBK'lar, metalik ve seramik malzemeleri bir araya getiren, son derece zorlu termal çevrim koşullarında çalışmak üzere geliştirilen karmaşık sistemler olup hem ısı yalıtım verimliliğini hem de farklı yollarla termal genleşme uyumunu zenginleştirmesi açısından farklı işleme yolları ile geliştirilmelidir.

KPE testlerinin etkisi ASTM-G76 (2013) standardı ile çoğunlukla oda sıcaklığında günümüze kadar incelenmekle birlikte bu standartta 50-450 μm boyutunda Al_2O_3 aşındırıcılar kullanılarak 15° - 90° çarpma açıları ve 15-75 m/s gibi düşük çarpma hızlarında KPE testleri gerçekleştirilebilmektedir. Belirtilen aralıklarda ideal sonuçlar vermekle birlikte yüksek sıcaklık ve yüksek aşındırıcı partikül çarpma hızı gereksinimi duyan enerji santralleri ve gaz türbinleri gibi sistemlerde oluşan YSKPE olayını deneysel koşullarda temsil etmede yetersiz kalacağı aşikârdır. Bununla birlikte yüksek sıcaklık ve aşındırıcı partikül çarpma hızı etkisi ile numunelerdeki deformasyon şartlarını simule etmek için ASTM_G211-14 (2014) "Standard Test Method for Conducting Elevated Temperature Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets" isimli standart geliştirilmiştir. Bu standart ile 410 paslanmaz çelik (X7Cr14) gibi yüksek sıcaklığa maruz kalacak numuneler üzerine 15° – 90° çarpma açıları, 100-250 m/s aşındırıcı partikül çarpma hızlarında, 24°C – 600°C sıcaklık aralığında YSKPE testleri yapılabilmektedir. Bu tez çalışmasında da yüksek dayanıma sahip INCONEL 718 süper alaşımı ile bu malzeme üzerine ekonomik ve TBK'lara düşük termal iletkenlik özelliği sağlamasından dolayı yaygın kullanımı olan APS yöntemi uygulanarak elde edilen dört farklı kaplamanın (NiCrAlY ve NiCoCrAlY bağ kaplamaları ile her iki bağ kaplama üzerine uygulanan ZrO_2 - $8\text{Y}_2\text{O}_3$ özelliğe sahip seramik üst kaplamalar), üç farklı

Çarpma açısı (30° ,60° ve 90°), üç farklı sıcaklık (Oda sıcaklığı, 300°C ve 600°C), ~97 m/s çarpma hızı ile 400 µm alümina (Al₂O₃) aşındırıcı partikül etkisinde YSKPE deneyleri ülkemizde bugüne kadar uygulaması bulunmayan ve ASTM G211 standardı ile uyumlu özgün olarak tasarlanan deney setinde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlara göre Erozyon oranı grafikleri elde edilerek SEM görüntüleri üzerinden deney numunelerine ait ortaya çıkan deformasyonlar yorumlanmıştır.



2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Yapılan bu doktora tez çalışmasında özellikle sert malzemeler kapsamına giren Inconel 718 süper alaşım deney numuneleri tercih edilmiş olup bu numunelerin enerji dönüşüm santralleri, gaz/buhar türbinleri, uzay–havacılık faaliyetlerine ait uçak motoru bileşenleri vb. yüksek sıcaklık ve yüksek hız partikül etkileşiminin gerçekleştiği uygulamalarda kullanımı yaygınlaşan bağ (NiCrAlY ve NiCoCrAlY) ve seramik kaplama (8YSZ) etkileri sonucu ortaya çıkan Termal Bariyer Kaplamaların (TBK) maruz kaldığı Yüksek Sıcaklık Katı Partikül Erozyon (YSKPE) aşınma davranışlarının farklı parametrik verilere bağlı olarak ASTM G211 uluslararası standardıyla uyumlu özel olarak tasarlanan deney seti kullanılarak doktora tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Tezin kapsamına giren ve aşağıda belirtilen ana başlıklarda literatür araştırması yapılmıştır;

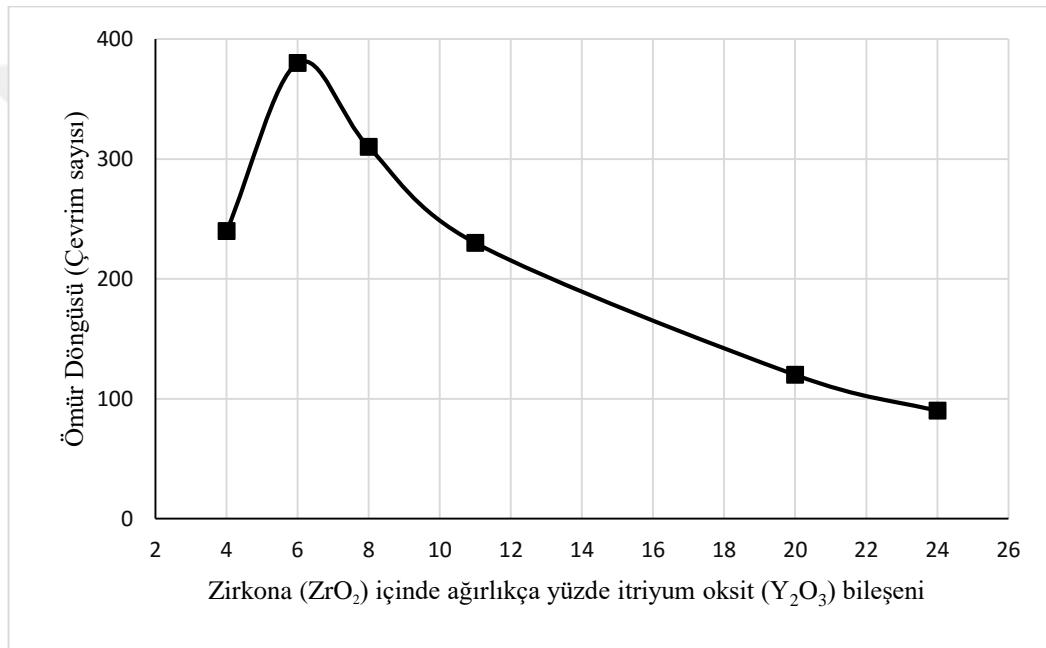
- Termal Bariyer Kaplama Uygulamaları,
- Katı Partikül Erozyon Aşınma Uygulamaları,
- KPE Aşınma Uygulamalarına Yüksek Sıcaklık Faktörünün Etkisi,
- TBK Uygulamalarına YSKPE Aşınmasının Etkisi.

2.1. Termal Bariyer Kaplama Uygulamaları

Termal Bariyer Kaplamalar (TBK), gaz türbinlerinde yüksek sıcaklıklara maruz kalan malzeme yüzeylerini korumak amacıyla ilk defa 1960'lı yıllarda kullanılmaya başlayan bir kaplama türüdür. 1970'lerde, Ulusal Havacılık ve Uzay Dairesi (NASA) Lewis Araştırma Merkezi, iki katmanlı bir TBK sistemi geliştirdi ve geliştirilen iki katmanlı TBK, türbin kanatları üzerinde başarılı bir şekilde test edilmesiyle modern TBK dönemi başladı (Stecura, 1978). Bu dönemde geliştirilen TBK sistemi Nikel (Ni) bazlı bağ katmanı üzerine Atmosferik Plazma Sprey (APS) ile kaplama yapılmış itriyum oksit ile stabilize edilmiş zirkona (12YSZ (ZrO_2 - ağırlıkça %12 Y_2O_3)) seramik tabakadan oluşuyordu. Stecura, sonraki çalışmalarında zirkona içinde itriyum oksit ağırlığını kübik fazı daha kararlı hale getirmek amacıyla %6-8 oranına düşürmesiyle önceki kaplamalara göre çok daha iyi performanslı TBK elde edildiğini belirledi. TBK kimyasal yapısı ile ilgili gelişmeler devam ederken, Pratt ve Whitney 1970'lerin sonlarında ilk Elektron Işını Fiziksel Buhar Biriktirme yöntemi (EB-PVD) ile zirkona içinde stabilize olmuş itriyum oksit TBK'ları geliştirdi (Miller, 1997). APS ve EB-PVD yöntemleri zamanla geliştirilerek TBK seramik üst katmanını kaplamada ticari bir yöntem haline geldi.

Alternatif TBK malzemeleri yoğun bir şekilde araştırılmasına rağmen, mevcut TBK kaplamaları içinde itriyum oksit (ağırlıkça %6-8 Y_2O_3) ile stabilize olmuş zirkona (ZrO_2) günümüzde en gelişmiş ticari malzeme olarak kullanımı yaygınlaşmıştır.

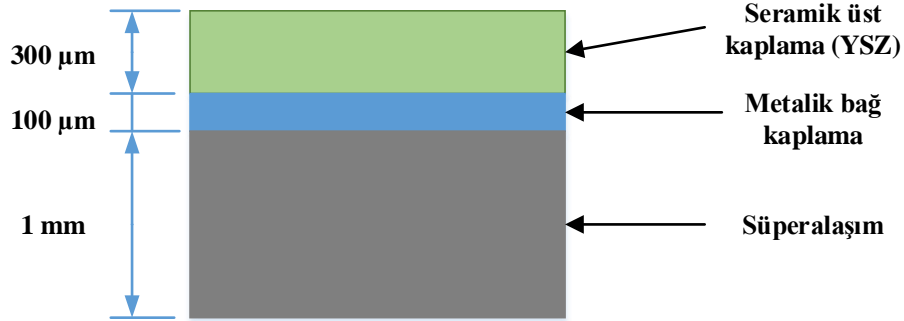
Optimum TBK malzeme bileşimi için elde edilen laboratuvar test sonuçları Şekil 2.1’de verilmiş olup uzun zamandır kullanılmasına rağmen 7YSZ (ağırlıkça %7 Y_2O_3 ’e sahip), 1200°C sıcaklık sınırlamasından dolayı kimyasal olarak itriyum oksit bileşimi devamlı geliştirilmeye çalışılmaktadır. Yaygın kullanıma sahip olduğu gaz türbinlerinde ise çalışma verimliliğini geliştirmek amacı ile yeni kaplama türleri üzerinde çalışmalar yoğunlaşarak devam etmektedir.



Şekil 2.1. Optimum TBK bileşimi için elde edilen test sonuçları ($ZrO_2 / 6-8 Y_2O_3$) (Miller, 1997).

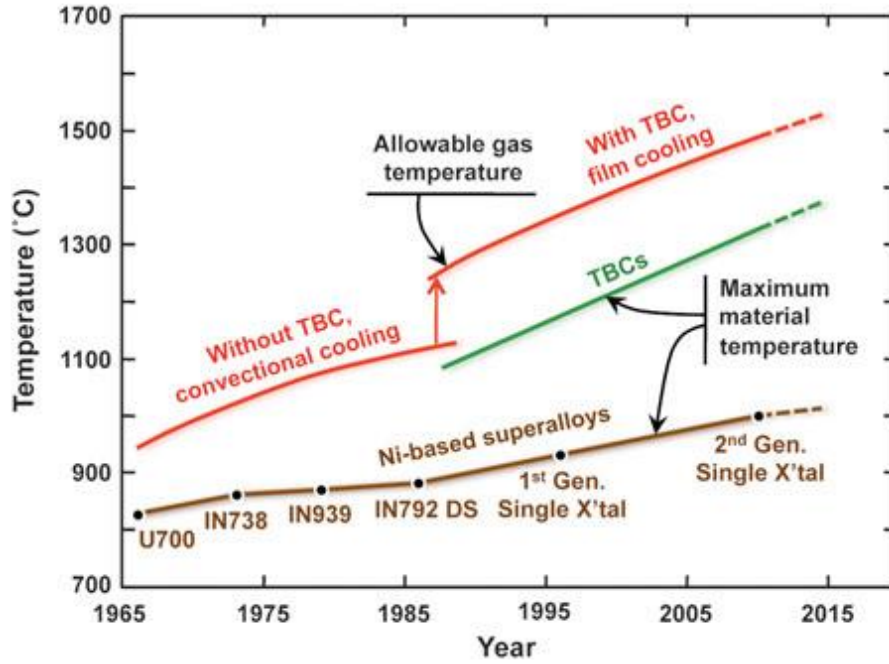
TBK, gaz türbinlerinde özellikle uçakların itici gücü olarak kullanılan parçalarda ve yanma odası elemanlarında kullanılmaktadır. 2019-2033 yılları arası için yapılan havacılık sektöründe kullanılan gaz türbini birim üretim tahmini, 1.4 trilyon \$ değerindeki 244.619 motor olacağı tahmin edilmektedir (Forecast_International, 2018b). Aynı şekilde 2019-2033 yılları için endüstriyel ve deniz taşımacılığında kullanılan gaz ve buhar türbinleri birim üretim tahmini, 308.1 milyar \$ değerinde 26.202 adet motor olacağı tahmin edilmektedir (Forecast_International, 2018a). Bu tahminleri göz önüne aldığımız zaman koruyucu kaplama teknolojilerine olan talebin de yoğunlaşarak artacağı açıkça görülmektedir.

Geleneksel TBK sistemleri Şekil 2.2’de gösterildiği gibi seramik bir üst kaplamadan, metalik bir bağ kaplamadan ve bu ikisi arasında termal olarak gelişen oksit tabakadan (TGO) oluşmaktadır.



Şekil 2.2. Altlık malzeme üzerine uygulanmış bağ ve seramik kaplama örnek modeli.

Alüminyumca zengin metalik bağ kaplamada [(Ni,Co)CrAlY ve alüminalar] zamanla alümina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) üst tabakası oluşur ve bu tabaka altlık malzemeyi oksidasyondan korumada birincil görevi üstlenir. TBK kaplamalarda termal izolasyon görevini seramik üst kaplama yapmakta olup Şekil 2.3’de Clarke ve ark. (2012) tarafından oluşturulan Ni süper alaşımları ile TBK kaplamalarının zamana göre sıcaklık kapasite artışlarının karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 2.3. TBK'ların Ni bazlı alaşımlar ile sıcaklık kapasitelerinin karşılaştırılması.

TBK'lar, metalik ve seramik malzemeleri bir araya getiren, son derece zorlu termal çevrim koşullarında çalışmak üzere geliştirilen karmaşık sistemlerdir. Bu amaçla, seramik malzemeler hem ısı yalıtım verimliliği hem de farklı yollarla termal genleşme uyumu açısından daha da zenginleştirilmekte ve farklı işleme yolları ile geliştirilmektedir. Metalik malzemenin yüzeyine yapılan seramik kaplamalardan; iyi bir termal kararlılık, düşük termal iletkenlik ve yüksek termal genleşme – yüksek kopma dayanımı ile birlikte istenilmektedir. İtiryum oksit ile stabilize olmuş zirkona (YSZ) yüksek ergime noktasına sahip (2700°C) ve seramik malzemeler arasında yüksek sıcaklıklarda en düşük termal iletkenliğe sahip malzemelerden biridir. Farklı mikroyapılara ve gözenekliliğe sahip YSZ kaplamalarının iletkenliği 2,6 W/mK (%5,3 ağırlık YSZ, 600°C, (Hasselman ve ark., 1987)) ve 0,7-1,4 W/mK (%7.25 ağırlık YSZ, (Pawlowski ve ark., 1985)) olarak sırasıyla bildirilmiştir. YSZ ayrıca yüksek termal genleşme katsayısına ($11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) sahiptir ve bu katsayı süper alaşım altlık malzemelerin termal genleşme katsayısına ($14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) oldukça yakındır (Cao ve ark., 2004). Bu durum termal genleşme uyumsuzluğundan kaynaklanan gerilmeleri azaltmaya yardımcı olur. Fakat buna rağmen belirli bir termal genleşme uyumsuzluğu devam etmektedir ve bu da YSZ'nin yüksek tokluğundan bağımsız olarak çatlak yayılmasına yol açmaktadır. Bu nedenle, esas olarak, gerilme seviyelerini düşürmeye ve / veya kaplamaların gerilim toleransını arttırmaya çalışarak, kaplama performansının daha da iyileştirilmesi istenir. Bu, kaplamalara veya sütun yapılara, gözenekler ve çatlaklar (interlamellar çatlaklar, segmentasyon çatlakları, vb.) biriktirilmesiyle sağlanabilir.

Nozahic ve ark. (2016), TBK kaplamalar üzerine yaptıkları çalışmada spark plazma sinterleme yöntemi ile itiryum oksit ile kısmi stabilize edilmiş zirkona matrisi (8YSZ) ile molibden di-silisit (MoSi_2) partiküllerini karıştırarak yeni TBK'lar üretmişlerdir. Üretilen TBK'ların 1000°C-1300°C sıcaklıklar arasında 10 saat bekleterek oksidasyon direnci incelenmiştir. Çalışma sonrasında oksidasyon olayının MoSi_2 partikülleri çevresinde sürekli bir SiO_2 tabakası oluşumu tespit edilmiştir.

Yapılan literatür araştırmalarının sonucunda TBK üzerine yapılan çalışmalarda malzeme seçiminde temel gereksinimlerin aşağıdaki kapsamlarda sınıflandırılması gerektiği sonucuna varılmıştır;

- Altlık malzeme ile termal genleşme katsayılarının yakın veya eşdeğer olması,
- Altlık malzemeye iyi yapışma direnci göstermesi,
- Yüksek ergime noktası sergilemesi,

- Oda sıcaklığı ile çalışma sıcaklığı arasında faz dönüşümü göstermemesi (faz stabilitesi),
- Düşük termal iletkenlik sağlaması,
- Kimyasal reaksiyona girmemesi (yakıt atıkları ile reaksiyon riskine karşın),
- Yüksek erozyon direncine sahip olması ve
- Gözenekli mikro yapı kararlılığı (düşük sinterleme hızı) sergilemesi beklenmektedir.

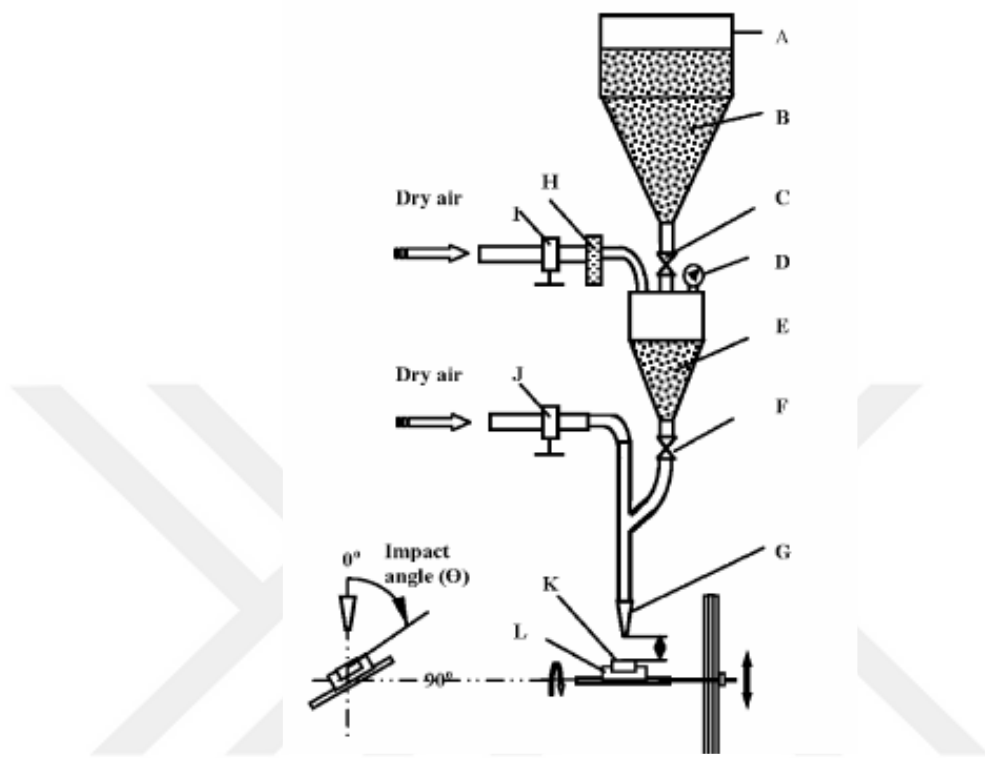
2.2. Katı Partikül Erozyon Aşınma Uygulamaları

Aşındırıcı partikül etkisinin belli bir açısal yörünge ve hız etkisine maruz kaldığı yerlerde kullanılan malzemelerin ve kaplamaların erozyon performansının karakterizasyonu için çeşitli erozyon test yöntemleri kullanılmakta olup bu yöntemler saha testi yerine geçmemekle birlikte literatürde gerçek çalışma koşullarını simule etmek amacıyla geliştirilmiştir. Sonuç olarak herhangi bir erozyon test cihazının temel amacı, aşınma tipine uygunluk gösteren malzemelerin ve kaplamaların nispi erozyon direncini belirlemektir. Bu amacı gerçekleştirmek için günlük kullanımın modellendiği uygulamalara yönelik çalışmalar literatürde yer bulmuş olup ülkemizde bu çalışmalar çoğunlukla oda sıcaklığı (21°C) koşullarında gerçekleştirilmektedir. Bu çalışmalara yönelik literatür bilgisi aşağıda özetlenmiştir.

Yıldızlı ve ark. (2006), tarafından erozyon aşınması üzerine yapılan deneysel çalışmalarda ASTM G76-95 standardı referans alınarak Şekil 2.4’de verilen deney tesisatı kullanılarak küresel ve gri dökme demir numunelerinin farklı çarpma açısı ve aşındırıcı partikül ağırlıkları kullanılarak erozyon aşınma deneyleri oda sıcaklığında yürütülmüştür. Yapılan deneyler sonucunda deney numuneleri sünek davranış sergileyerek maksimum erozyon oranı 30° çarpma açısında gerçekleşmiştir.

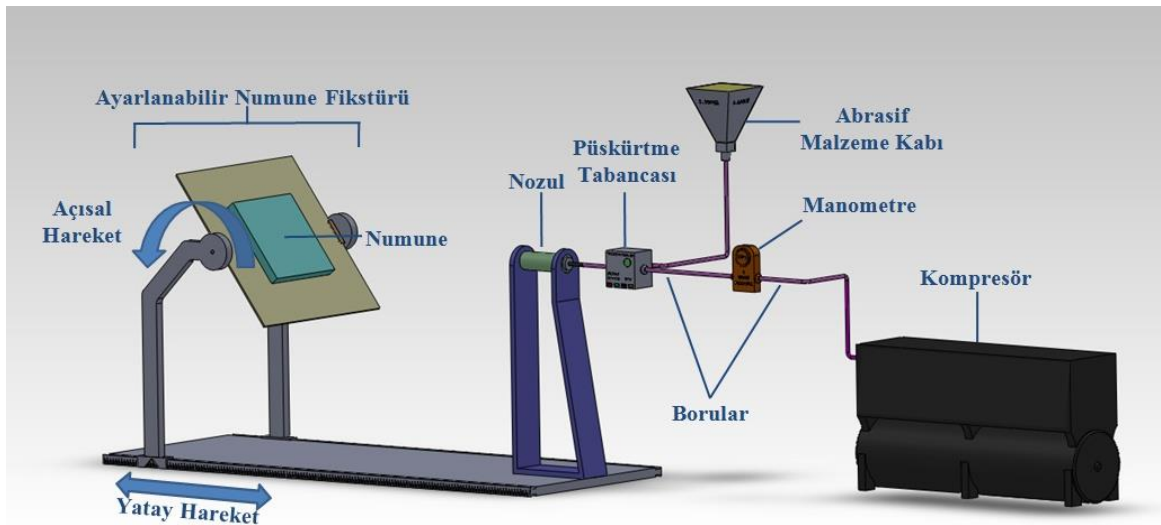
Avcu ve ark. (2013) ve Çoban ve ark. (2018)’nin yaptıkları erozyon aşınması çalışmalarında Şekil 2.5’de verilen ASTM G76-95 standardı ile uyumlu deney tesisatında cam takviyeli polifenilen sülfid (PPS) matrisli kompozitler ve volkanik kül (VA) parçacıkları ile güçlendirilmiş polifenilen sülfid (PPS) kompozitlerin, aşındırıcı partikül büyüklüğüne, açısına, basıncına ve hızına göre değişen erozyon oranlarını incelemişlerdir. Araştırma sonucunda cam takviyeli PPS kompozitlerin aşındırıcı partikül çarpma açısına bağlı olarak değişen erozyon oranlarını hesaplamışlar ve en fazla erozyonu 30° ve 45° çarpma açılarında elde etmişlerdir. Volkanik kül parçacıkları ile

güçlendirilmiş PPS malzemelerde ise en fazla erozyonu daha eğik açılar olan 15° ve 30° çarpma açılarında gözlemlemiştirler. Isıl işlem görmüş kompozit malzemelerin daha iyi erozyon direnci sağladığı sonucuna varmışlardır.



A: Ana depo, B: Aşındırıcı, C,F: Valf, D: Manometre, I,J: Basınç Regülatörü, H: Filtre, E: Basınçlı Partikül Tankı, G: Nozul, L: Numune Tutucu, K: Numune.

Şekil 2.4. Erciyes Üniversitesinde kullanılan KPE aşınması test düzeneğinin şematik gösterimi.



Şekil 2.5. Kocaeli Üniversitesinde kullanılan KPE aşınması test düzeneğinin şematik gösterimi.

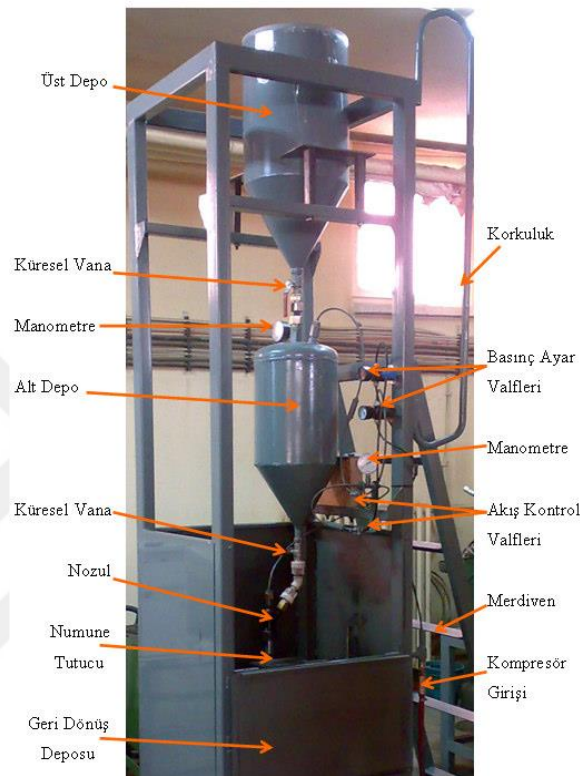
Sınmazçelik ve Taşkıran (2007) tarafından yapılan deneysel çalışmada, mineral parçacıklarla ve rastgele yönlendirilmiş kısa cam fiberlerle takviye edilmiş polyphenylenesulphide (PPS) kompozitlerin katı parçacık erozyon davranışları karakterize edilmiştir. Bu kompozitlerin erozyon oranları 15° – 90° arasındaki değişik çarpma açılarında ve üç farklı partikül çarpma hızında (20, 40 ve 60 m/s) incelenmiştir. Aşındırıcı partikül olarak 150–200 μm çapında silis kumu kullanılmıştır. Silis kumu 4,5 Bar basınç altında deney numunesine çarpmış ve silis kumunun kütle akış hızı da 9 g/s olarak alınmıştır. PPS kompozitler, 60° çarpma açısında maksimum erozyon oranı sergilemiş ve yarı sünek erozyon davranışı göstermiştir. Bu çarpma açısı erozyon oranına önemli bir etki yapmıştır. Ayrıca SEM ile aşınan yüzeylerin morfolojileri incelenmiş ve yüzeylerde nasıl bir değişim meydana geldiği araştırılmıştır.

Sınmazçelik ve ark. (2008), çapraz kat yönlendirilmiş karbon elyaf takviyeli polyphenylenesulphide (C-PPS) kompozitlerin erozyon aşınması sonrasındaki artık mekanik özelliklerini araştırmışlardır. Yapılan çalışmada 50 mm hızlanma bölümü olan 5 mm çapındaki seramik nozul kullanılmış olup 150–200 μm nominal çapında açısız silis kumu aşındırıcı olarak seçilmiştir. Aşındırıcı partiküllerin hızlandırılmasında basınç değerlerinden faydalanılmış olup 1,5; 3 ve 4,5 bar'lık basınçlar kullanılmıştır. Bu basınç değerleri de ortalama olarak 20, 40 ve 60 m/s hızlara karşılık gelmektedir. Kompozit malzemeler numune tutucuya yerleştirilerek 15° – 90° arasındaki çarpma açılarında deneyler yapılarak 0,1 mg hassasiyetteki hassas terazi ile ağırlık kayıpları tespit edilmiştir. Malzemeler yarı sünek davranış sergileyerek 45° çarpma açısında maksimum erozyon oranı göstermiş olup minimum artık gerilme değeri elde edilmiştir.

Imrek ve ark. (2011) tarafından yapılan çalışmalarda AISI 1010 çeliğinin farklı dış çekme kuvvetleri etkisi altında ve aşındırıcı partikül çarpma açılarında erozyon davranışı üzerine çalışmalarını Şekil 2.6'da verilen ASTM G76-95 standardına göre testlerin yapılabildiği deney düzeneğinde erozyon aşınma testlerini oda sıcaklığında gerçekleştirmişlerdir. Çalışmanın sonucunda ise AISI 101 çeliğine etkiyen dış çekme kuvvetlerin artması ile erozyon oranının arttığı ve en fazla erozyonun malzemenin çekme gerilmesinin %60'ı değerinde bir dış kuvvet uygulandığında oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Düşük karbon AISI 1010 çeliği sünek malzeme davranışı sergilemiş ve en fazla erozyon aşınmasını 30° çarpma açısında göstermiştir.

Bagci ve ark. (2015) cam fiber takviyeli epoksi reçine kullanılmış kompozit malzemelerin erozyon aşınmasında Taguchi metodu kullanarak test parametrelerinin optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Yapılan çalışmalar sonucunda Taguchi

yönteminin, erozyon aşınma parametrelerinin optimizasyonu için basit, sistematik ve verimli olduğu ve Taguchi'nin dikey dizi tasarım yönteminin erozyon oranını analiz etmek için uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Cam takviyeli epoksi reçine kullanılmış kompozit malzemelere %15 ve %30 oranında SiO₂ dolgu maddesi eklenmesinin erozyon direncini artırdığını belirlemişlerdir.



Şekil 2.6. Selçuk Üniversitesinde kullanılan KPE aşınması test düzeneğinin şematik gösterimi.

2.3. KPE Aşınma Uygulamalarına Yüksek Sıcaklık Faktörünün Etkisi

Yukarıda tanımlanan test düzenekleri oda sıcaklıklarına ait deneysel uygulamalarda ideal sonuçlar vermekle birlikte ASTM G211 standardının yayınlanması ile birlikte dünya üzerinde yüksek sıcaklıktaki çalışmalarda kullanılmak amacıyla KPE test düzeneklerinin geliştirilme çalışmaları yaygınlaşmaya başlamıştır. Bu test düzenekleri genellikle iki tipte olup elektrik ile ısıtılan (rezistans teli veya indüksiyon ile) hava jetleri ve brülör tipi (bir yakıtın yanması sonucu çıkan sıcak havanın hızlandırılmasını kullanan) ısıtıcı kullanan hava jetleri olarak ayrılmaktadır.

Şekil 2.7'de İtalya'nın Milano kentindeki RSE SpA - Research on Energy System Laboratuvarında bulunan ve yüksek sıcaklıktaki deneysel çalışmalarda kullanılan KPE

aşınma test düzeneği gösterilmiştir. Bu test cihazı ile 200 m/s aşındırıcı partikül çarpma hızında ve 24°C–800°C aralığındaki sıcaklıklarda erozyon aşınması testleri yapılabilmektedir. Bu da gaz türbinleri ile enerji santrallerindeki KPE aşınmasına maruz kalan parçaların çalışma şartlarındaki ortam koşulları ile benzer şartlarda KPE testlerinin yapılabilmesine imkân sağlamaktadır.



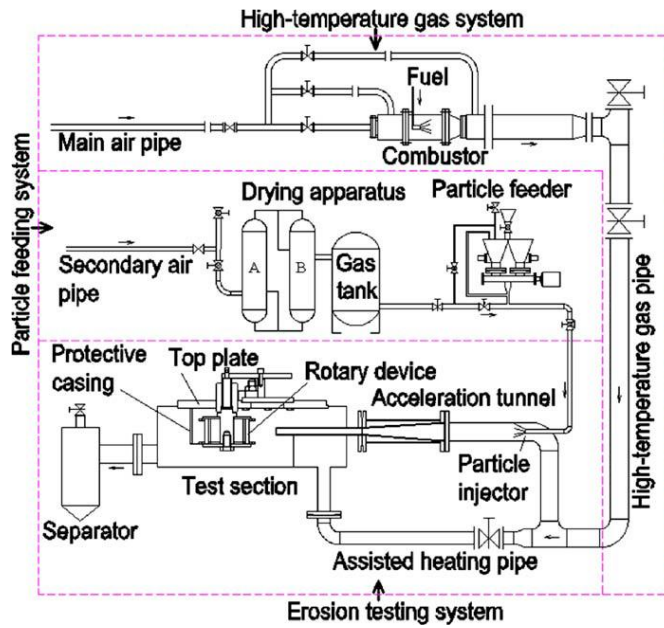
Şekil 2.7. Yüksek sıcaklıklarda testlerin yapılabildiği KPE test düzeneği fotoğraf görüntüleri; a) Tüm sistem, b) Nozul ve numune fikstürünün bulunduğu bir numaralı kısmın ayrıntılı görünüşü.

Cernuschi ve ark. (2011), Ni- bazlı süperalaşım tek kristal yapıda CMSX4 malzemesini altlık malzeme olarak kullanarak EB-PVD, APS ve PS-PVD yöntemlerini kullanarak farklı türde TBK kaplamalar üretmişlerdir. Üretilen bu numuneleri 700°C sıcaklıkta, aşındırıcı partikül olarak silica (SiO₂) kullanarak 30° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarında erozyon aşınma deneylerine maruz bırakmışlardır. EB-PVD kaplamalar sütunlu mikro yapıya sahip olmasından dolayı plazma sprej yöntemine göre daha iyi gerinim uyumluluğu ve katı partikül erozyon dayanımı göstermekte fakat daha düşük ısı izolasyonuna sahip olduğunu belirtmişlerdir. EB-PVD yönteminin en önemli dezavantajı maliyetlerinin daha yüksek olmasından dolayı yapılan çalışmalar daha ucuz bir yöntem olan atmosferik plazma sprej (APS) yöntemini geliştirmek amacıyla olmuştur. Sonuç olarak PS-PVD ve yüksek katmanlı APS kaplamaların EB-PVD kaplamalar kadar aşınma direnci gösterdiği hatta daha iyi aşınma direncinde olduğu durumları tespit edilmişlerdir.

Cernuschi ve ark. (2016) tarafından yine Şekil 2.7’de verilen test düzeneğini kullanarak yapılan başka bir çalışmada Ni- bazlı süperalaşım Rene80 altlık malzemesi kullanılarak bağ kaplamalar Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme (HVOF), üst seramik kaplamalar ise APS yöntemi kullanılarak üretilen TBK kaplamalarında aşındırıcı olarak

400 μm boyutunda alümina tozu, aşındırıcı partikül çarpma açısı 30° ve 90° ve sıcaklık 1000°C 'de YSKPE aşınma testlerini gerçekleştirmişlerdir. Endüstriyel olarak kullanılan standart ZrO_2 'den oluşan TBK'lar bazı sınırlamalara sahiptir. Bu sınırlamalar sinterleme ve yüksek sıcaklıklarda faz dönüşümü gibi olumsuz durumlardır. Buna ilaveten yüksek sıcaklıklarda kalsiyum-magnezyum-alumina silikat'ın kaplama üzerinde çökmesi durumunda kaplama, çatlamakta, dağılmakta veya delaminasyona uğramaktadır. Bu yapılan çalışmada gözenekli, yoğun katmanlı zirkona içinde kısmi stabilize olmuş itriyum oksit (YPSZ) ve çift katmanlı yapıda TBK kaplamaların erozyon dayanımları test edilmiştir. Genel olarak yoğun segmentli TBK'lar daha iyi erozyon dayanımı sergilemiştir. Gözenekli, Gadolinyum (Gd) içerikli TBK'lar benzer erozyon dayanımı göstermiştir.

Şekil 2.8'de Wang ve ark. (2010) tarafından Çin'de bulunan Xi'an üniversitesine ait brülör tipi yüksek sıcaklık katı partikül erozyon aşınma deneylerinin gerçekleştirildiği test düzeneğinin şematik gösterimi verilmiştir. Bu test düzeneğinde aşındırıcı partiküller hava ile birlikte yaklaşık olarak 3 m uzunluğunda bir boruda ısıtılarak test numunesine çarptırılmaktadır. Aşındırıcı partikül hızı, bir lazer sisteminden alınan ışık yardımı ile CCD kamerada görüntü fotoğrafı alınmasıyla Parçacık Görüntülemeli Akış Hızı Ölçüm cihazında (PIV) belirlenir. Bu test düzeneğinde testler en fazla 650°C sıcaklıkta yapılabilmektedir.

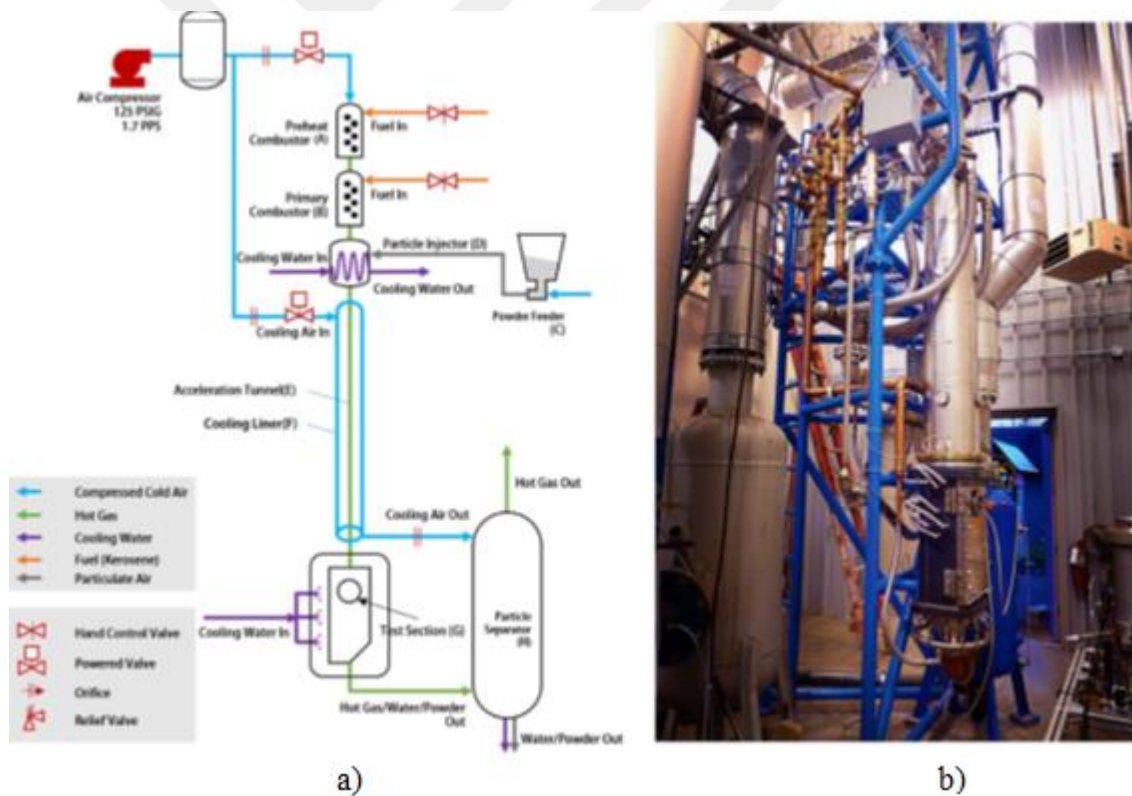


Şekil 2.8. Xi'an Üniversitesinde bulunan YSKPE aşınma test düzeneğinin şematik görünümü.

Wang ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada altlık malzeme olarak Cr11MoV ve Cr11MoCo3W2 kullanarak FeB, Fe₂B, CrN, WC-Co kaplama malzemelerini, borit kaplama, iyon kaplama ve termal sprej kaplama yöntemleri ile altlık malzeme üzerine kaplamışlardır. Kaplama sonrasında numuneler 15°, 30°, 45°, 60°, 75° ve 90° çarpma açılarında ve 500°C–600°C sıcaklıkta YSKPE aşınma deneylerine tabi tutulmuştur. Bu çalışmada kaplama kalınlığı, sertliği, test sıcaklığı ve kaplamada oluşan kusurların erozyon aşınmasına etkisi deneysel olarak çalışılmıştır. Kaplama olarak borit kaplamalar, iyon kaplama CrN kaplamaları ve termal püskürtme kaplamaları kullanılmıştır. Kaplama kalınlığının ve sertliğinin artması ile erozyon aşınma dayanımı artmıştır. Termal sprej kaplamaya göre borit kaplama ve iyon kaplamalar daha iyi dayanım sergilemişlerdir. Sıcaklığın etkisi ise tamamen kaplama ile altlık malzemede arasında bulunan bağ kaplamaya bağlı olduğu tespit edilmiştir. Wang ve ark. (2014) yaptıkları başka bir çalışmada TBK'ların lazer ergitme yöntemi uygulanması sonrası yapısının mikro sertliği, KPE davranışı ve mikro yapısal karakteristiği incelenmiştir. Malzeme olarak öncelikle APS yöntemi ile TiAl alaşımı (20*20*8 mm) üzerine bağ kaplama olarak NiCoCrAlY₂O₃ ve seramik üst kaplama Zr₂O₃-%7 Y₂O₃ malzemeleri kaplanmıştır. Kaplama sonrası malzeme yüzeyine lazer ergitmesi uygulanmıştır. KPE aşınma testleri 30°, 60° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarında, 150-250 µm alümina aşındırıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak sadece sprej yapılan yüzey lamelli, pürüzlü, gözenekli ve mikro çatlaklı bir yapıda iken lazer ergitmesi yapılan yüzey daha kompakt, kolonlu kristal yapıda ve pürüzsüz bir yüzeye sahip olmuştur. Düşük çarpma açılarında lazer ergitme uygulanan yüzey daha iyi KPE direnci göstermiştir. Lamelli yapıda yüzeyin pul pul dökülmesi ayrıca kırılğan seramik yapıda olan yüzeylerin ezilmesi erozyona sebep olmaktadır. Lazer ergitme yöntemi uygulanan yüzeyler daha sünek erozyon aşınma davranışı sergilediği sonucuna varmışlardır.

Swar ve ark. (2012) yaptıkları çalışmada Inconel 718 (25,4*25,4*1,6 mm) malzeme üzerine EB-PVD yöntemi ile 7YSZ malzemesi kaplayarak TBK oluşturmuşlardır. Üretilen TBK malzemeler, alümina tozu aşındırıcı partikül olarak kullanılarak 20°, 45°, 70° ve 90° çarpma açılarında ve 871°C ve 982°C sıcaklıkta YSKPE aşınmasına maruz bırakılmışlardır. Deneyler sonrasında TBK kaplama malzemelerinde erozyon aşınmasının, artan partikül çarpma açısı, hızı ve sıcaklığı ile arttığını bulmuşlardır. TBK malzemelerinde en fazla aşınma 90° aşındırıcı partikül çarpma açısında gerçekleşirken, altlık malzeme Inconel 718'de ise 30° çarpma açısında gerçekleşmiştir. Bu durumda kaplama malzemesinin gevrek malzeme davranışı

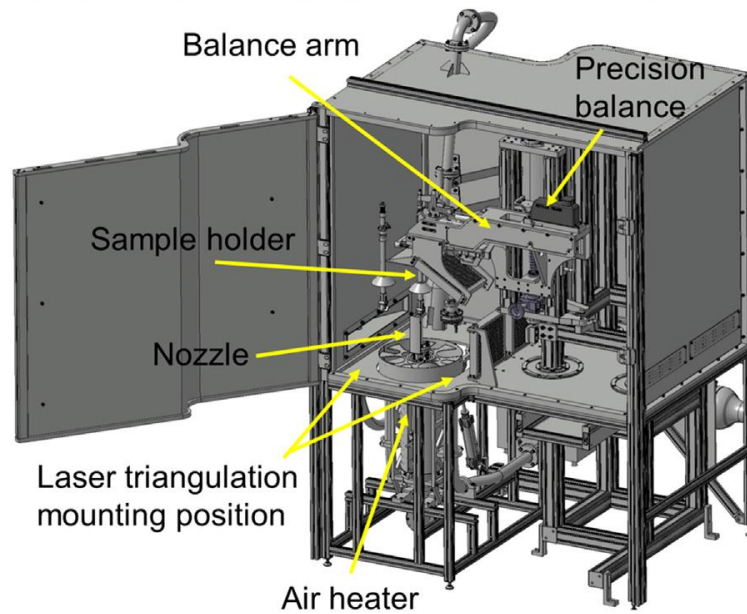
göstermesinin, altlık malzemenin ise sünek malzeme davranışı göstermesinin delilidir. Bu çalışmada deney seti olarak Amerika'da Cincinnati Üniversitesi'nde bulunan Şekil 2.9'da şematik ve görsel görünümü verilen gelişmiş yüksek sıcaklık katı partikül erozyon tüneli kullanılmıştır. Bu sistem de brülör tarzı yakıt kullanarak havanın ısıtılıp bir tünel vasıtası ile hızlandırıldığı ve katı partikül ile birleşmesi sonucunda malzeme yüzeyinde aşınmanın simüle edildiği bir düzendir. Shin ve Hamed (2018) tarafından yapılan çalışmada IN718 (25,4*25,4*1,6 mm) malzeme üzerine APS yöntemi kullanılarak bağ kaplamada NiCrAlY, seramik üst kaplamada ise 7YSZ tozları kaplanmıştır. Yapılan çalışmada 7YSZ TBZ seramik malzemesini farklı gözenek ve mikro yapılar da üretilerek YSKPE testleri ile aşınma dirençleri incelenmiştir. Test sıcaklığı 537°C–980°C, aşındırıcı gaz hızı 122-305 m/s ve aşındırıcı partikül çarpma açısı 20°-90° aralığında yapılmıştır. Sonuçlar seramik yüzeyde gözenekliliğin artması ile erozyon direncinin düştüğünü göstermiştir.



Şekil 2.9. Amerika Cincinnati Üniversitesi'ndeki gelişmiş sıcak erozyon tüneli; a) Şematik gösterimi, b) Sistemin görseli (Shin ve Hamed, 2018).

ASTM G211-14 standardı ile uyumlu olması için Şekil 2.10'da CAD tasarımı verilen İngiltere milli fizik laboratuvarında bulunan YSKPE test düzeneği imal edilmiştir. Bu test düzeneğinde 17 kW'lık güce sahip bir hava ısıtıcı ile çalışma sıcaklığı 900°C'ye

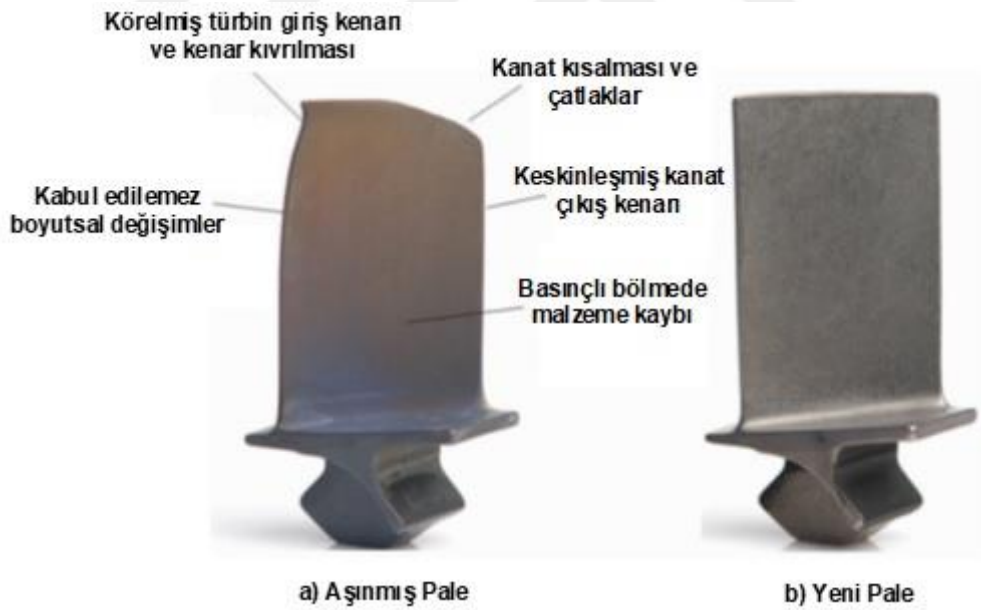
kadar çıkabilmektedir. Cernuschi ve ark. (2017), bu test düzeneğinde aşındırıcı partikül çarpma hızını doğru ve deney sırasında ölçebilmek için lazer sistemi ile oluşturulan yüksek hızlı kamera düzeneği oluşturmuşlardır. Fry ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada bu deney düzeneğini kullanarak Nimonic 80A malzeme üzerine magnetron sıçratma yöntemi kullanarak TiAlN kaplanmış numunelerin YSKPE testlerini yürütmüşlerdir. Deneyler 600°C sıcaklıkta, 30° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarında ve 117 m/s ve 140 m/s aşındırıcı partikül hızlarında gerçekleştirilmiş olup aşındırıcı partikül olarak alümina kullanılmıştır. Deneyler sırasında her 5g aşındırıcı partikül kullanıldıktan sonra deney numuneleri test cihazı içinde anlık olarak tartılabilmektedir. Bu deneyler ile öncelikle test cihazı ve anlık ağırlık ölçümlerinin doğruluğu test edilmiş olup literatüre YSKPE deneylerini yaparken anlık olarak kütle ölçümü de yapabilecek bir deney düzeneği katılmıştır. Bu durum yüksek sıcaklıklarda deney numunesinin kütle kaybının belirlenmesinde önemli bir yere sahiptir, özellikle yüksek sıcaklıklarda yapılan deneylerde kütle kaybı ile birlikte malzemenin oksitlenmesinden dolayı kütle kazancı da olabilmektedir. Deneyler sonucunda aşındırıcı partikül hızı arttıkça erozyon oranı artmıştır ve en fazla erozyon aşınması 30° aşındırıcı partikül çarpma açısında gerçekleşmiştir.



Şekil 2.10. İngiltere milli fizik laboratuvarında bulunan YSKPE test düzeneğinin CAD tasarımı (Fry ve ark., 2017).

2.4. TBK Uygulamalarına YSKPE Aşınmasının Etkisi

Termal Bariyer Kaplamalar (TBK) modern uçak gaz türbinlerinde ve elektrik üreten gaz türbinlerinde önemli bir yere sahiptir. Bu kaplamalar gaz türbinlerinde yüksek sıcak gaza maruz kalan metal yüzeylerine, metalin yüzeyini yüksek sıcaklıktan izole etmek amacı ile yapılır. Yüzeze kaplanan bu kaplamaların gaz türbini motorlarındaki partikül etkilerinden dolayı bozulması 1950'lerin başından beri sınırlı da olsa akademi dünyasında ve türbin imalatçıları arasında çözülmesi gereken bir problem olarak var olmuştur (Mitchell ve Gilmore, 1982; Sirs, 1994). Bu sebeple aşınma türleri arasında baskın role sahip olan Katı Partikül Erozyon aşınması ile yoğun olarak karşılaşılmaya muhtemel olup oda sıcaklığına alternatif yüksek sıcaklık uygulamalarında da ciddi çözüm arayışlarının endüstriyel olarak beklendiği bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır. Örneğin Brendel ve ark. (2008) tarafından yapılan ve Şekil 2.11'de aşınmış ve aşınmamış duruma ait görseli verilen havacılık sektöründe kullanılan kompresör pallerinde meydana gelen aşınmaya bağlı olarak yüzey deformasyonu gösterilmiştir.

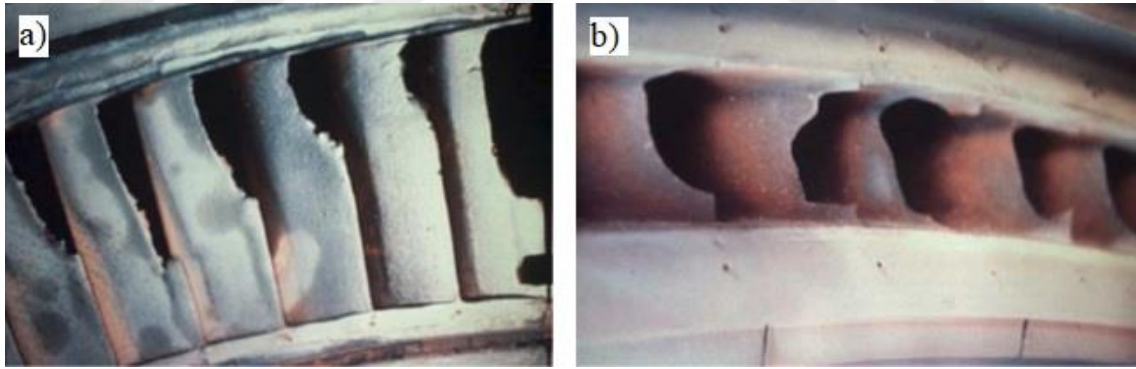


Şekil 2.11. Kompresör pallerindeki KPE aşınma etkisi; a) Aşınmış pal, b) Aşınmamış pal.

TBK uygulamaları ile ilgili makalelerin çoğu, kaplamanın termal çevrimi, kaplama prosesi ve kaplamanın termal iletkenliği ile alakalı yayınlamış makalelerden oluşuyordu. Bu durumun temelinde kaplamaların servis şartlarında temel olarak termal döngüye maruz kalmasından dolayı oluşan gerilmelere yoğunlaşılmasıdır. Bu gerilme, seramik üst kaplama ve altlık malzeme arasındaki termal genişleme uyumsuzluğunun ve

ara yüzeydeki oksit büyümesinin bir sonucudur. Bu nedenle katı partikül erozyonu, kaplamaların çalışma ömrünü sınırlayan birincil faktör olarak görülmemiştir ve genel olarak yapılan çalışmalarda kaplamaların termal çevrim şartlarındaki dayanımları incelenmiştir. Bu durum TBK'ların ilk çıktığı yıllarda anlaşılabilir fakat günümüzde örnek olarak türbin yanma odalarında düşük çarpma açılarında bile kaplamada erozyon aşınması olabilmekte ve seramik üst kaplamada yüksek çarpma açılarında maksimum erozyon ortaya çıkarabilmektedir (Zhu ve ark., 2010). Hava taşımacılığında kullanılan türbin kanat yüzeyindeki TBK'lar daha yüksek darbe hızlarına bağlı olarak belirli bir erozyona maruz kalmaktadırlar, ancak dönen türbin kanatları yüzeyinde bulunan TBK'lar çok daha şiddetli erozyon aşınması problemi ile karşılaşmaktadırlar (Hamed ve ark., 2005).

Alternatif kaplama uygulamaları ile kaplanmış bileşenlerin KPE direncini arttırmada yeteri kadar etkili olduğu düşünülse de çalışma esnasındaki bileşenlerde meydana gelen erozyon hasarının gizemliliğini koruduğu ve nasıl bir seyir izlediği Wlodek (1985) tarafından gözlemlenmiş olup Şekil 2.12'de gösterilen fotoğraf görüntülerinden yüksek sıcaklıkta çalışan buhar türbin parçasında meydana gelen KPE etkisi görülmektedir.



Şekil 2.12. Buhar türbin parçalarında meydana gelen YSKPE etkisi; a) Kanatçık, b) Hava menfezi.

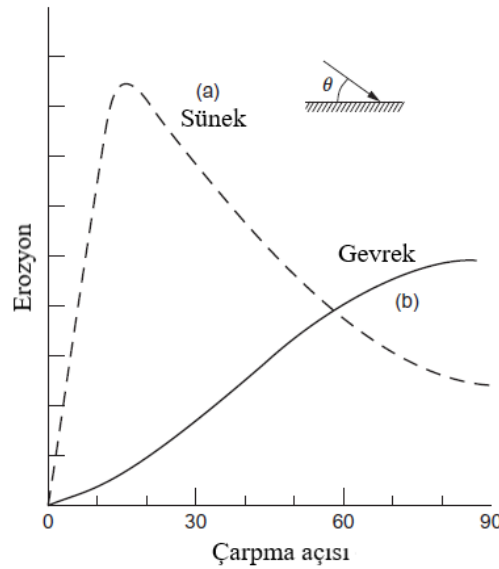
Aşındırıcı parçacıklar, çalışma ortamına bağlı olarak türbin girişlerine farklı yollardan girebilir. Cernuschi ve ark. (2011), Gohardani (2011), Rajendran (2012) ve Nithin ve ark. (2017) yaptıkları çalışmada türbinin çalışması esnasında aşındırıcı parçacıkların volkanik kül, fırtına bulutları veya çöl ortamı gibi yerlerden toz şeklinde türbin içine girebildiklerini bildirmişlerdir. Ticari veya askeri uçak jet motorları, erozyonlu partiküllere, volkanik kül bulutlarından, yüksek irtifada kum veya toz taşıyan fırtına bulutlarından ve pistte beklerken veya kalkış için pistte hareket ederken yerden

giriş vorteks alımı ile maruz kalabilirler (Rodert ve Garrett, 1955). Endüstriyel gaz türbinlerinde ve elektrik üretimi için kullanılan gaz türbinlerinde çökelmiş yanmamış yakıttan kaynaklanan sert karbon parçacıkları en çok karşılaşılan aşındırıcı partiküllerdir. Bu çökelen karbon parçacıkları türbin stator ve kanadında erozyon aşınmasına sebep olmaktadır (Council, 1977). Dış ortamdan gaz türbine giren aşındırıcı partiküller veya yanma odasında karbon çökmesinden kaynaklanan partiküller metal yüzeyinde aşınmaya sebep olmakla türbinin performansını düşürebilmekte ve türbin parçalarında hasara sebep olabilmektedir. Partiküllerin TBK'lar üzerindeki etkisi, TBK yüzeyinde çatlama ve kaplama yüzeyinin parçalanması gibi mikro ölçekli bozulmalara neden olur. Katı partikül etkisiyle aşınmış TBK katmanı, alt tabaka malzemesine termal bir koruma sağlamada başarısızlıkla sonuçlanabilir. Yüzey hasarı mekanizmaları; malzeme özelliklerine, mikro yapıya, hedef malzemelerin sertliğine ve aşındırıcı partikülün çarpma açıları, darbe hızları, sıcaklıkları gibi koşullara bağlı olarak değişmektedir (Tilly, 1969; Hutchings, 1979; Dhar ve ark., 2005). TBK yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküller yüzeyde çatlaklara ve mikro boyutlu parçaların parçalanmasına sebep olarak malzeme yüzeyinin pürüzlülüğünün artmasına ve TBK üzerinde kritik hasara yol açabilirler (Wellman ve ark., 2005).

KPE aşınmasını etkileyen en önemli parametre, partiküllerin çarpma hızı olduğunu söyleyebiliriz. Aşındırıcı partikül çarpma hızları, gaz türbini motorlarının sabit bileşenlerinde 274 m/s'den daha düşüktür fakat uçak türbini motorlarının dönen bileşenlerinde aşındırıcı partikül çarpma hızları bu değer çok ötesine çıkabilirler (Levy, 1995). TBK yüzeyine çarpan bu katı partiküller basınç kaybının artmasına ve türbin parçalarının geometrisinin bozulmasına sebep olacaktırlar. Katı partiküllere maruz kalma koşullarında türbinin sürekli çalışması, türbin performansını olumsuz yönde etkileyebilir ve sonuç olarak türbin bileşenlerinde ciddi hasarlara neden olabilir (Bose ve DeMasi-Marcin, 1997; Maricocchi ve ark., 1997). Aşındırıcı partiküllere ve neme bağlı olarak TBK'ların erozyon oluşumunu en aza indirmek için kara ve denizde kullanılan gaz türbinlerinde giriş havasına filtre sistemi kullanılabilir. Fakat bu durum gaz türbinine giren hava yolundaki filtre sistemi nedeni ile oluşan basınç kayıpları, gaz türbininin performansının veya veriminin düşmesine neden olur (Wilcox ve ark., 2012). Bu nedenle, dayanıklı gaz türbinleri tasarlamak için TBK malzemelerinin partikül erozyon direncinin özelliklerini anlamak gerekir.

Aşınan malzemelerin kütle veya hacim kaybına bağlı olarak hesaplanan erozyon oranı malzemelerin sünek veya gevrek olmasını belirlemek için de kullanılabilir. Sünek

malzemelerin yüzeyinde meydana gelen katı erozyon davranışı genellikle oda sıcaklığındaki diğer malzemeler gibi plastik deformasyon şeklini alır (Finnie, 1960). Örnek olarak kesme, ekstrüzyon ve dövme gibi işlemler malzeme yüzeyinde önce plastik deformasyon işlemi başlatır. Sünek malzemeler Şekil 2.13’de görüldüğü gibi düşük çarpma açılarında ($20^\circ - 30^\circ$) maksimum erozyon oranı gösterirler. Bu koşullar altında hedef malzeme yüzeyinden kopmalar sünek bir oyuk açma ve kesme mekanizmaları ile gerçekleşir (Tilly, 1973). Sünek bir malzemede 90° çarpma açısında meydana gelen erozyon oranı, maksimum oranın yarısı veya üçte biri miktarında olabilir. Sünek malzemelerin tersine, seramik kaplamalar gibi gevrek olan malzemelerde erozyon mekanizması yüzeyde kılcal damarlanma başlangıcı ve sonrasında lokalize çatlama ile devam eder. Bu tür malzemeler için maksimum erozyon oranı 90° çarpma açılarında meydana gelir (Oka ve ark., 2009). Katı partiküllerin gevrek malzeme yüzeyine tekrarlı çarpmaları yüzeyde plastik deformasyondan farklı şekilde çatlakların ve ufalanmaların ilerlemesini hızlandırır. Bu hızlanma sonucunda malzemelerin katı partikül erozyon aşınmasının sünek ve kırılgen modlarının aynı anda birleştirildiğini, etki açısına ve malzeme özelliklerine bağlı olarak erozyon oranının değiştiği söylenebilir. Dolayısıyla farklı mekanik özelliklere sahip aşındırıcı partiküllerin etkisi erozyon mekanizmasını değiştirmemekle birlikte erozyon oranını değiştirir (Crook ve Farmer, 1992).



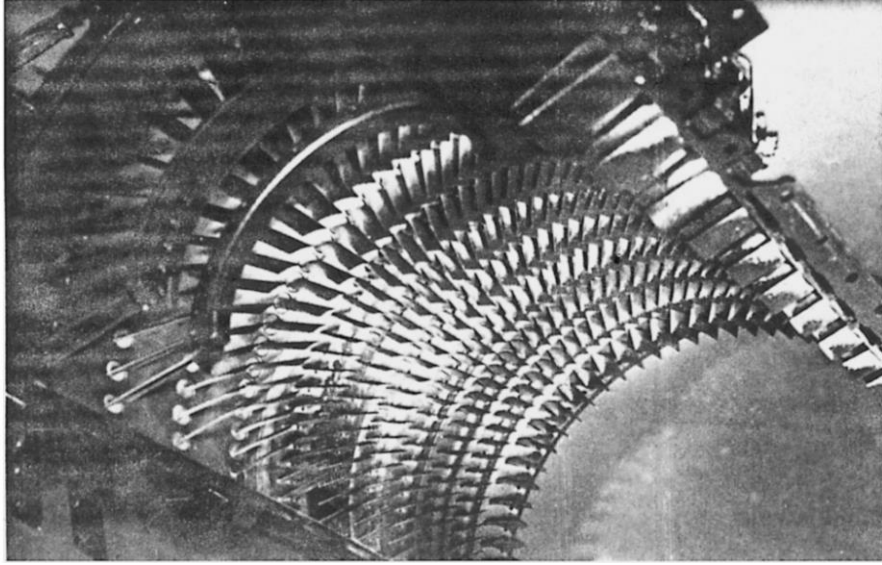
Şekil 2.13. Sünek ve gevrek malzemeler için aşındırıcı partikül çarpma açısına (θ) bağlı olarak erozyon oranı değişimi grafiği (Hutchings ve Shipway, 2017).

Kaplama malzemelerinin erozyon durumuna bakıldığında kaplama işleminin üretim yöntemindeki uygulama açısına göre, altlık malzeme yüzeyine farklı şekilde yönlendirilmiş ayrı tabakalara sahip katmanlı bir yapı elde edilir. Uygulama açısındaki değişkenliğin sonucuna bağlı olarak altlık üzerine kaplanan malzemenin termal yetenekler üzerine farklı aşınma modelleri geliştirmesi muhtemel olup erozyon davranışlarının deneysel olarak irdelenmesini gerektirmektedir. Erozyon aşınması ile kaplama arasında belirli bir ilişki tam olarak bulunamamakla birlikte kaplamadaki gözenekliliğin artması ile erozyon direncinin azalacağı genel bir düşünce olarak literatür bilgisi ile kabul edilmektedir (Hutchings, 1983; Branco ve ark., 2004).

Türbin kompresörlerinde meydana gelen katı partikül erozyonu ile türbin pala veteri uzunluğu azalır, türbin kanat ön ve arka kenarlarının şekli değişir ve kanat yüzey pürüzlülüğü artar. Bu durum, türbin kompresörünün adyabatik verimliliğini %3–4 oranında azalttığı belirlenmiştir (Tabakoff, 1984; Hamed ve ark., 1998). Ayrıca türbin kanatlarında meydana gelen erozyon aşınması kanat yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde, ortalama pürüzlülük (Ra) değerinde büyük bir artış olmasına sebep olmuştur (Taylor, 1989; Tarada ve Suzuki, 1993).

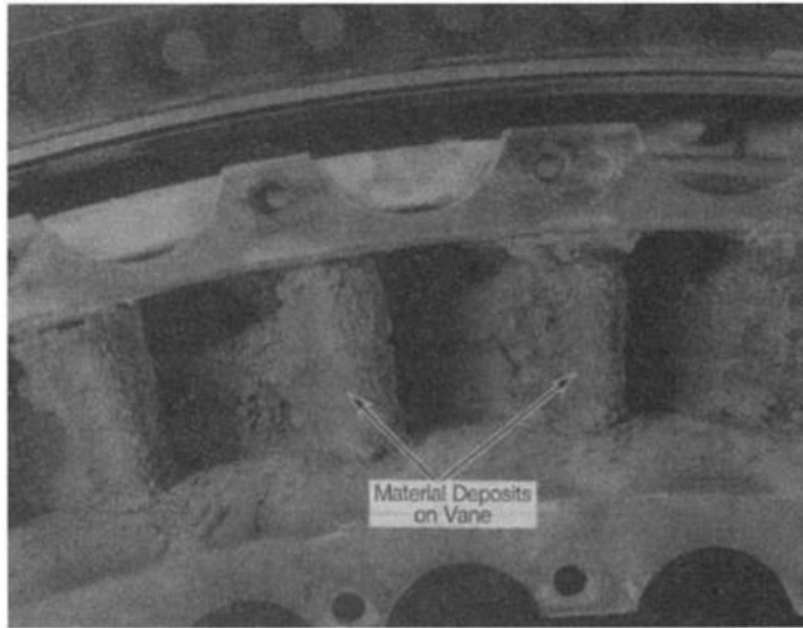
Gaz türbinlerinde meydana gelen erozyon aşınması ile ilgili birçok çalışma yapılmış olup türbinin bütün bölümlerinde erozyon olmasına rağmen en fazla erozyon aşınmasının türbin giriş kısmında gerçekleştiği tespit edilmiştir. Ayrıca türbin kompresörünün emme ve basma kısımlarına yeterli büyüklükte katı partiküller (~100-150µm) geldiği zaman erozyon aşınması belirgin olarak gözlemlenmiştir. Ayrıca aşındırıcı partiküllerin yüzeye çarpma açısının dik konumdan (90°) ziyade açılı olarak yüzeye çarptığı (25° ve 30° gibi) vurgulanmıştır (Tabakoff, 1987; Tabakoff, 1989; Tabakoff ve Shanov, 1995). Bu sonucu ispatlayan başka deneysel bir çalışma, Hamed ve ark. (2006) tarafından Cincinnati Üniversitesi'nde pist kumu ile yapılarak, erozyon testlerinden sonra T-53G türbin kompresöründe meydana gelen KPE aşınması Şekil 2.14'de verilmiştir.

Yanardağ patlaması sonucu ortaya çıkan parçalı bulutlar uçak motorları için en tehlikeli ortamlardır. Volkanik kül bulutuna maruz kalan ortamlardaki türbin motorlarının çalışmasıyla ilgili birkaç olay olmuştur. Bu olaylara örnek olarak 23 Haziran 1982'de dört Rolls Royce RB11 motoru ile çalışan British havayollarına ait Boeing 747 uçağı ve 15 Aralık 1989'da Pratt ve Whitney motorları ile çalışan Singapur havayollarına ait Boeing 747-400 uçağı Mt. Redoubt yanardağı külüne maruz kalmışlardır.



Şekil 2.14. Kademeli bir türbin kompresöründe gözlemlenen KPE etkisi.

Cincinnati Üniversitesi'nde yapılan testler, volkanik külün kuvars kumundan dört kat daha aşındırıcı olduğunu göstermiştir (Tabakoff, 1986). Volkanik kül bulutlarıyla karşılaşan ticari uçak motorları, askeri şartname MIL E 5007D'ye göre rutin Arizona yol toz testlerine tabi tutulan askeri uçaklardan daha ciddi aşınma problemlerine maruz kalmışlardır. Dunn ve ark. (1996) yaptıkları çalışmada ise tozlu ortamda çalışan türbin motorları kanatlarında aşırı tolerans kaybının mümkün olduğunu gözlemlemişlerdir. Bu durumun oluşmasına özellikle volkanik küllerin ve ortamdaki tozların sebep olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15. Volkanik kül sonrası türbin kanadında oluşan KPE etkisi.

Bons ve ark. (2001), yaptıkları çalışmada türbin pal ve kanatlarının çalışması esnasında oluşan yüzey pürüzlülüklerini incelemişlerdir. İnceleme sonucunda çalışma anında oluşan yüzey pürüzlülüğünün pale veya kanatın ilk kullanımına göre 4–8 kat daha fazla yüzey pürüzlülüğü oluşturduğunu belirleyerek pale ve kanatlarda oluşan yüzey pürüzlülüğü düzensizliğinin havadaki tozlarla birlikte korozyonun birleşmesinden kaynaklanan erozyonun bu etkiye sebep olduğunu tespit etmişlerdir.

TBK'larda oluşan erozyona karşı ilgi artarken farklı metotlar ile üretilmiş TBK'ların erozyon direnci karakteristiği hakkında yapılan çalışmalar genellikle Elektron Demetiyle Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) (Wellman ve ark., 2005; Steenbakker ve ark., 2006) veya Plazma sprej fiziksel buhar biriktirme (PS-PVD) metotları (Schmitt ve ark., 2016; Rezanka ve ark., 2017) ile yapılan TBK'lar üzerinde olmuştur. Zhu ve ark. (2010) yaptığı çalışmada düşük termal iletkenlik gösteren TBK'lar geliştirmiştir. Geliştirilen düşük termal iletkenlikteki TBK'ların (kübik YbGd-YSZ) erozyon deneylerini yüksek sıcaklıkta yapmıştır. Sonuç olarak geliştirilen yeni TBK'lar düşük termal iletkenliğe sahip olmasına rağmen standart 7YSZ TBK'lara göre %40 daha az erozyon direnci göstermiştir.

Janos ve ark. (1999) yaptığı çalışmalarda termal yaşlandırmaya (1093°C) tabi tuttıkları APS yöntemi uygulanmış TBK'ların erozyon aşınma durumlarını incelemişlerdir. İnceleme sonucunda termal yaşlandırmaya maruz kalan numunelerin mikro sertliği ve erozyon direnci termal yaşlandırma sıcaklığı ile artmıştır. Elde edilen sonuçlara göre mikro sertlik ve erozyon oranı arasında bir korelasyon kurulabileceği gösterilmiştir.

Cernuschi ve ark. (2011) ise farklı metotlar ile üretilen TBK'ların yüksek sıcaklık erozyon direncini incelemişlerdir. Yüksek oranda katmanlı (gözeneklilik oranı %5) olan TBK'larda elde edilen erozyon oranları APS, EB-PVD ve PS-PVD yöntemleri etkisindeki TBK'lar ile karşılaştırılabilir erozyon oranlarını belirlemişlerdir. Öte yandan, gözenekli (gözeneklilik oranı %19) APS uygulanmış TBK numunelerde ise test edilen diğer kaplamalara göre önemli ölçüde daha yüksek erozyon oranları bulunmuştur.

Erozyon direncini artırma üzerine TBK yüzeylerinde lazer sır işlemi uygulanarak yapılan analiz odaklı çalışmada ise lazer sırlama ile yüzeyin mikro sertliği ve yüzey pürüzlüğünde önemli oranda iyileşme gerçekleşmiştir. Erozyon testleri bütün aşındırıcı partikül çarpma açılarında oda sıcaklığında gerçekleşmiş ve açının artması ile erozyon oranının arttığı sonucuna varılarak gevrek malzeme özelliği sergilediği sonucuna varılmış olup lazer sırlama işlemine maruz kalan TBK'lar 30°, 45° ve 60° aşındırıcı partikül

çarpma açılarında diğer TBK'lara göre üçte bir oranında daha az erozyon oranı göstermiştir (Tsai ve ark., 2007).

Erozyon aşınması üzerine çalışan araştırmacıların hemen hemen tümü, çalışma koşullarını daha iyi temsil etmesi ve kompresör kanat profili uygulamaları için 10-300 µm kalınlık aralığındaki kaplamaların erozyon aşınmasını belirlemek amacıyla test koşullarında değişiklik yapmışlardır (Tabakoff ve Shanov, 1995; Hamed ve ark., 2005; Feuerstein ve Kleyman, 2009; Cernuschi ve ark., 2011).

Türbin parçalarının çalışma koşullarında maruz kaldığı KPE olayını daha iyi temsil etmek amacı ile yukarıda belirtildiği üzere çeşitli parametrelerin değiştirilmesi ve denenmesi gerekmektedir. KPE aşınması, aşındırıcı partiküllerin sertliğinden, gevrekliğinden ve partikül şeklinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Havacılık sektöründe kullanılan malzemeler için KPE deneylerinde alümina yerine silika aşındırıcı partiküllerin kullanılmasıyla ilgili çalışma koşullarına uyarlanan deneysel çalışmaların varlığı da belirlenmiştir (Schell ve ark., 2004).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde sırasıyla Yüksek Sıcaklık Katı Partikül Erozyon (YSKPE) aşınma test cihazı, numune tutucu, partikül besleme ünitesi tasarımı ve üretimi, aşındırıcı partikül özelliklerinin belirlenmesi, aşındırıcı partikül çarpma hızı ölçümü, deney numunesi hazırlama, deney numunesi mekanik özellikleri ve deneyler sonrası malzemelerin erozyon oranlarının belirlenmesi hakkında genel bilgilere yer verilmiştir.

3.1. YSKPE Aşınma Test Cihazı Tasarımı ve Üretimi

Katı Partikül Erozyon (KPE) aşınmasını laboratuvar şartlarında gerçekleştirmek için yaygın olarak kullanılan yöntemler; aşındırıcı partiküllerin bir gaz veya sıvı ile hızlandırıldığı veya aşındırıcı partiküllerin çarpma hızı elde etmesi için dairesel hareketin kullanıldığı yöntemlerdir. Bu yöntemlerden aşındırıcı partikülün bir gaz veya sıvı ile hızlandırıldığı yöntemde aşındırıcı partiküller bir nozul içine konularak nozul içinden geçen gaz veya sıvı akışkan yardımı ile hızlandırılması sağlanır. Hızlandırılan aşındırıcı partiküller nozul ucundan belirli bir açıda ve mesafede duran hedef malzeme yüzeyine çarptırılırlar. Gaz jeti veya gaz püskürtme olarak adlandırılan bu yöntemde aşındırıcı partiküller, taşıyıcı olarak gaz (genellikle hava) veya sıvı (yağ veya su) ile hızlandırılır. Gaz jeti yönteminde aşındırıcı partikülleri taşıyıcı olarak havanın kullanıldığı test yöntemini tanımlayan uluslararası kabul gören standart ASTM-G76 (2013)'dir.

ASTM-G76 (2013) standardı oda sıcaklığında gerçekleşen KPE testlerini tanımlamaktadır. Mevcut standart ile 50–450 μm boyutunda Al_2O_3 aşındırıcılar kullanarak $15^\circ - 90^\circ$ çarpma açılarında ve 15–75 m/s gibi düşük çarpma hızlarında KPE testleri gerçekleştirilebilmektedir. Belirtilen aralıklarda ideal sonuçlar vermekle birlikte yüksek sıcaklık ve hız gereksinimi duyan enerji santralleri ve gaz türbinleri gibi sistemlerde oluşan KPE olayını deneysel koşullarda temsil etmede yetersiz kalacağı aşikârdır. Sonuç olarak ülkemizde de henüz uygulaması bulunmayan ve yukarıdaki şartları simüle etmek için en ideal standart olan ASTM_G211-14 (2014) “Standard Test Method for Conducting Elevated Temperature Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets” isimli standart geliştirilmiştir. Bu standart ile 410 paslanmaz çelik (X7Cr14) gibi yüksek sıcaklığa maruz kalacak numuneler üzerine $15^\circ - 90^\circ$ çarpma açılarında, 75–250 m/s çarpma hızlarında, $24^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C}$ sıcaklık aralığında KPE testlerinin yapılabileceği tanımlanmıştır. Bu nedenle, yüksek dayanıma sahip yeni

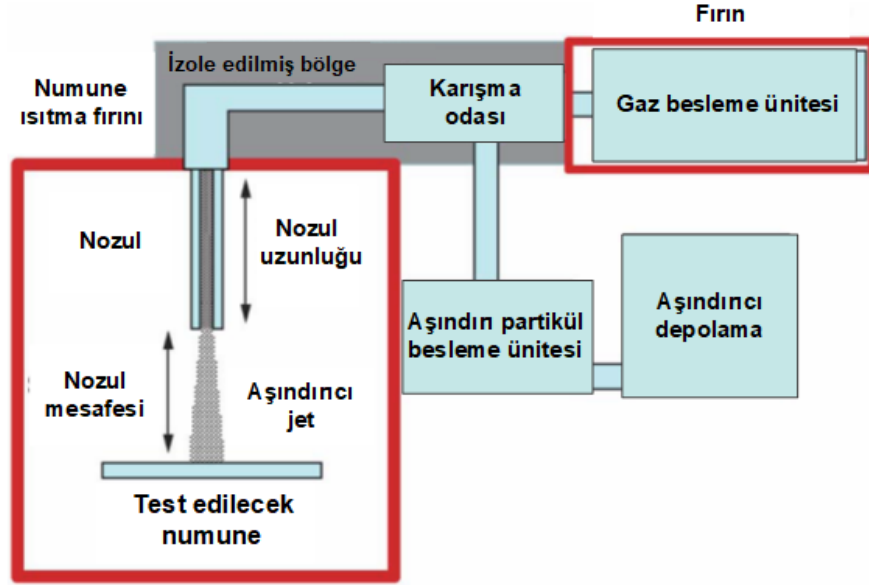
nesil malzemelerin ve kaplamaların yüksek sıcaklık erozyon performansını karakterize etmek, böylece onların gelişimini ve tasarımını hızlandırmak için bu farklı durumlara uygulanabilecek bir test ortamı gerekliliğine ihtiyaç duyulmuştur. Belirtilen ihtiyacı daha net tanımlamak amacıyla ASTM G76 ve ASTM G211-14 standartlarının karşılaştırması Çizelge 3.1’de verilmiştir.

Çizelge 3.1. ASTM G211-14 ve ASTM G76 standartları karşılaştırması.

Erozyon Test Parametreleri	ASTM G76	ASTM G211-14
Nozul çapı (mm)	1 – 8	1 – 8
Aşındırıcı partikül	Alümina (Al ₂ O ₃)	Alümina (Al ₂ O ₃)
Partikül hızı (m/s)	15 – 75	75 – 250
Sistem basıncı (Bar)	0 – 10	0 – 10
Test açıları (°)	30 ve 90 ± 2	30 ve 90 ± 2
Test sıcaklığı (°C)	18 – 28	600 ± 5
Nozul-numune mesafesi (cm)	Erozyon iz çapı < 2 (90°)	Erozyon iz çapı < 2 (90°)
Erozyon oranı	mg/g; mg/kg; g/kg	mg/g; mg/kg; g/kg

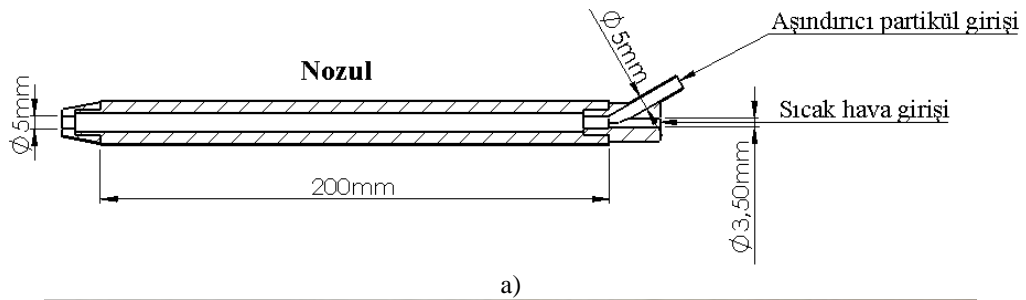
Bu doktora tez çalışması kapsamında, ülkemizde kullanımı olmayan ASTM G211-14 standardına uygun şartlarda KPE testlerini gerçekleştirebilecek bir test makinası ortaya konularak bu makine ile birlikte sıcaklık kontrolü (numune, gaz ve aşındırıcı partikül), akışkan hızı, aşındırıcı partikülün ölçüsü ve şekli ile aşındırıcı partikül çarpma açısı ayarlanma imkânına sahip olunmuştur. Şekil 3.1’de ASTM G211-14’e uyumlu yüksek sıcaklıkta çalışabilen KPE aşınmasına ait şematik gösterim verilmiştir.

Ülkemizde bu test cihazının deneysel çalışmalarda kullanılabilmesi amacıyla ASTM G211-14 standardında belirtilen parametreleri sağlayabilmek için öncelikle nozul çapı, nozul boyu, hava debisi, hava hızı ve havanın istenilen sıcaklığa kadar ısıtılabilmesi için gerekli ısıtıcı gücünün tayin edilmesi gerekmektedir.



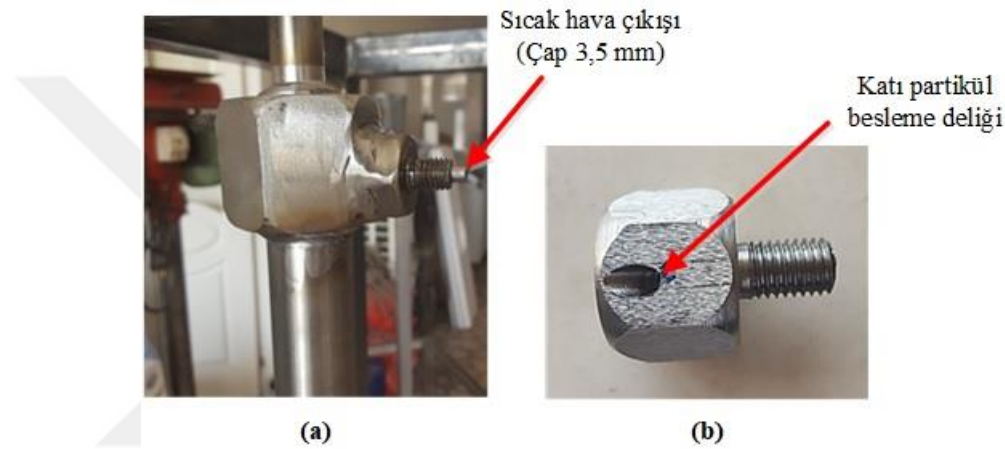
Şekil 3.1. ASTM G211'e uyumlu yüksek sıcaklıkta çalışabilen KPE aşınmasına ait şematik gösterim.

Bu parametrelerden nozul çapı ve boyunu belirlemek için literatür çalışmaları detaylı incelenmiş ve ısıtılmış hava ile aşındırıcı katı partikülün nozul içinde birleşmesinden sonra laminer bir akış sağlayabilecek tarzda nozul boyunu belirlemek amacıyla; nozul çapı 5 mm ve boyu 200 mm olacak şekilde bir tasarım yapılmış ve üretilmiştir. Malzeme olarak nozul'un yüksek sıcaklıklara dayanabilmesi için 304 kalite Cr-Ni malzeme seçilmiştir. Ayrıca nozul tasarımında, yüksek sıcaklıklarda nozul malzemesinin direk aşındırıcı partikül ile temas edip aşınmaması için farklı iç çapa sahip seramik veya quartz boruların yerleştirilebileceği ve sökülüp takılabileceği bir sistem düşünülmüştür. Şekil 3.2'de tasarlanan ve Cr-Ni malzemeden üretilen nozul resimleri verilmiştir.



Şekil 3.2. Nozul tasarımı ve imalatı; a) 2B çizimi, b) Cr-Ni malzemeden üretilmiş son hali.

Havanın istenilen sıcaklıklara ulaşması sağlandıktan sonra aşındırıcı katı partiküllerin sıcak hava ile etkileşimi amaçlanmıştır. Nozul ile bağlantısı yapılacak sıcak hava girişinin elde edilmesi için gerekli tasarımın ilk prototipine ait imalat sonrası görüntüsü Şekil 3.3(a)'da verilmiştir. Aşındırıcı katı partikülün sıcak hava tarafından emilerek alınabilmesi amacı ile ısıtılan havanın çıkış boru çapı 3,5 mm'ye düşürülmüş ve bu çap daralmasından sonra katı partikül besleme deliği 30° açığa ayarlanmıştır. Böylece çapın daraldığı noktada hızı artan hava, çapın genişlediği bölgede bir emme etkisi oluşturacaktır. Şekil 3.3(b)'de görüldüğü gibi nozul bağlantısına ait partikül beslemenin yapılabilmesi için katı partikül besleme deliği elde edilmiştir.



Şekil 3.3. Nozul ile sıcak hava bağlantısı görseli; a) Isıtılan havanın çıkış noktası, b) Çıkış noktası ile nozul arasındaki bağlantı elemanı.

Kompresör tarafından beslenen sistemin hava çıkış sıcaklığını istenilen değerlere getirebilmek için aşağıdaki parametreler kullanılarak rezistans teli güç hesabı yapılmıştır. Bu güç hesabının oluşturulmasında (3.1), Mükemmel Gaz Denkleminden faydalanılmıştır. Bu denkleme göre P; hava basıncı,

$$P = \rho * R_{hava} * T \quad (3.1)$$

denkleme vasıtası ile belirlenmekle birlikte ρ ; havanın yoğunluğunu (kg/m^3), R_{hava} ; havanın gaz sabitini (kJ/kg.K) ve T; havanın sıcaklığını (K) ifade etmektedir. (3.1) denkleme kullanılarak havanın yoğunluğunu belirlemek amacıyla; $P=150 \text{ kPa}$, $R_{hava}=0,287 \text{ kJ/(kgK)}$ ve $T=1173 \text{ K}$ verileri kullanılmıştır. Mükemmel gaz denklemine bağlı olarak tasarım başlangıcında belirlenen referans değerler hesaba katılarak havanın yoğunluğu $0,445 \text{ kg/m}^3$ olarak bulunmuştur.

Havanın yoğunluğu başlangıç tasarım verilerine göre belirlendikten sonra \dot{m} ; havanın kütleli debisi (kg/s),

$$\dot{m} = \rho * \dot{V} \quad (3.2)$$

denkleminde bağı olarak belirlenmesi gerekmektedir. (3.2) denkleminde tanımlanan \dot{V} ; havanın hacimsel debisini (m^3/s) ifade etmektedir. Havanın hacimsel debisini bulabilmek amacıyla deney setinde kullanılan nozul kesit alanına ve hava hızı değişimine bağı olarak (3.3) denkleminde faydalanılmıştır.

$$\dot{V} = \vartheta * A \quad (3.3)$$

(3.3) denkleminde ϑ ; hava hızını (m/s), A; nozul kesit alanını (m^2) ifade etmekle birlikte hesaplamalarda nozul çapı, 5 mm olarak alınmış ve hava hızı için ise 300 m/s değeri kullanılmıştır. Yapılan hesaplamalar sonucunda hacimsel debi, $5890 \text{ m}^3/\text{s}$ bulunmuş olup (3.2) denkleminde kütleli debi $2,62 * 10^{-3} \text{ kg/s}$ olarak hesaplanmıştır.

Havanın kütleli debisi hesaplandıktan sonra ASTM G211 standardı uyarınca havanın sıcaklığını istenilen değere getirebilmek amacıyla gerekli olan gücü hesaplamak için (3.4) denkleminde formülize edilen ısıtıcı güç hesabı denklemini kullanılmıştır. Bu denkleme göre W_{isit} ; ısıtıcı gücünü (kW) ifade etmekle birlikte,

$$Q + W_{isit} = \dot{m} * \left[C_p(T_2 - T_1) + \left(\frac{\vartheta_2^2 - \vartheta_1^2}{2 * 1000} \right) \right] \quad (3.4)$$

denklemini ile Q; sistemin kaybettiği veya kazandığı ısı olup (3.4) denkleminde sistemin adyabatik ($Q=0$) olduğu kabul edilmiştir. (3.4) denkleminde olan C_p ; özgül ısı (kJ/kg.K), T_2 ; belirlenen hava çıkış sıcaklık (1173 K) değerini, T_1 ise kompresörden gelen hava giriş sıcaklık (yani yaklaşık oda sıcaklığını) değerini, ϑ_2 ; belirlenen hava çıkış hızını (300 m/s), ϑ_1 ise hava giriş hızını (hareketsiz hal girişi) belirtmekte olup bu verilere bağı olarak W_{isit} ısıtıcı gücü 2,73 kW olarak hesaplanmıştır.

Denklemin (3.4) kullanılarak elde edilen güç değerine ilave olarak sistemsel kayıplar ve verim durumu hesaplamaya dahil edildiğinde yaklaşık 1,85 kat emniyet katsayısı kabulü ile ısıtıcı gücü tekrar hesaplandığında 5 kW'lık bir gücün istenilen sıcaklıklara havanın ısıtılması için yeterli olacağı sonucuna varılmıştır. Bu ısıtıcı gücüne ulaşabilmek amacıyla rezistans telinin kullanılmasına kanaat getirilmiştir. Bu sebeple

rezistans telinin çapını ve boyunu hesaplamak için Elektriksel Güç denklemi kullanılarak aşağıdaki hesaplama yöntemi takip edilmiştir. Burada öncelikle (3.4) denkleminde hesaplanan güç değeri ve elektrik şebeke sisteminin gerilim değeri bilindiği için akım şiddetinin bulunması amaçlanmıştır. Elektriksel güç denkleminde (3.5), P; güç değerini (kW), I; akım şiddetini (A) ve U; gerilim değerini (V) ifade etmektedir.

$$P = I * U \quad (3.5)$$

(3.5) denkleminde, (3.4.) denkleminde bulunan W_{ist} değeri emniyet değeri ile birlikte P; güç değeri olarak denkleme girmekte olup 5 kW olarak alınmış ve U; gerilim değeri 220 V olarak kullanılmıştır. Buna göre I; akım şiddeti 22,7 A olarak hesaplanmıştır. Buradan rezistans telinin bu akımı geçirebileceği direnç değerini hesaplamak için Ohm Kanunundan (3.6) yararlanılmıştır.

$$U = I * R \quad (3.6)$$

Bu kanuna göre R; direnç değeri 9,7 Ω olarak hesaplanmıştır.

Havayı ısıtma sisteminde kullanılacak rezistans teli seçiminde, endüstriyel olarak imalatı ve bulunabilirliği olan 0,8 mm tel çapında ve Cr-Ni malzemedeki rezistans teli seçilmiştir. Seçilen rezistans telinin, verilen güç değerinde ısı iletimini ve dayanımını ölçmek için bir ön deney yapılmıştır. Bu ön deneyde rezistans teli spiral bir yapıya getirilerek seramik bir boru içinden geçirilmiştir. Bu borudan hava geçirilerek rezistans teline temas etmesi sağlanarak havanın ısınması amaçlanmıştır. Daha sonra rezistans teline 5 kW'lık bir güç verilmiştir. Bunun sonucunda seçilen rezistans teli, istenilen sıcaklıklara gelmeye başladığı an telde ergime olayı gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'de 5 kW'lık güç verildiği zaman eriyen rezistans teli görülmektedir.

Rezistans telinin boyunun hesaplanmasında ise S; tel kesitini (mm^2)

$$S = d^2/1,27 \quad (3.7)$$

denkleminde ifade etmekle birlikte d; tel çapını (mm) tanımlamaktadır. Tel çapı 0,8 mm olarak alındığında tel kesiti 0,5 mm^2 olarak belirlenir.



Şekil 3.4. Ergimiş rezistans telinin görünümü.

Tel kesit alanı hesaplandıktan sonra rezistans telinin boyunu bulmak amacıyla;

$$L = R * S / \Phi \quad (3.8)$$

formülü kullanılır. Bu formülde L; tel boyu (m), R; tel direnci (Ω) ve Φ ise telin öz direncini ($(\Omega * \text{mm}^2)/\text{m}$) ifade eder. (3.6) denkleminde bulunan direnç değeri ve (3.7) denkleminde bulunan tel kesit alanı değerleri yerine konulduğu zaman ve de telin öz direnci Cr-Ni malzeme için $1,1 \Omega * \text{mm}^2/\text{m}$ alındığında tel boyu 4,44 m olmaktadır.

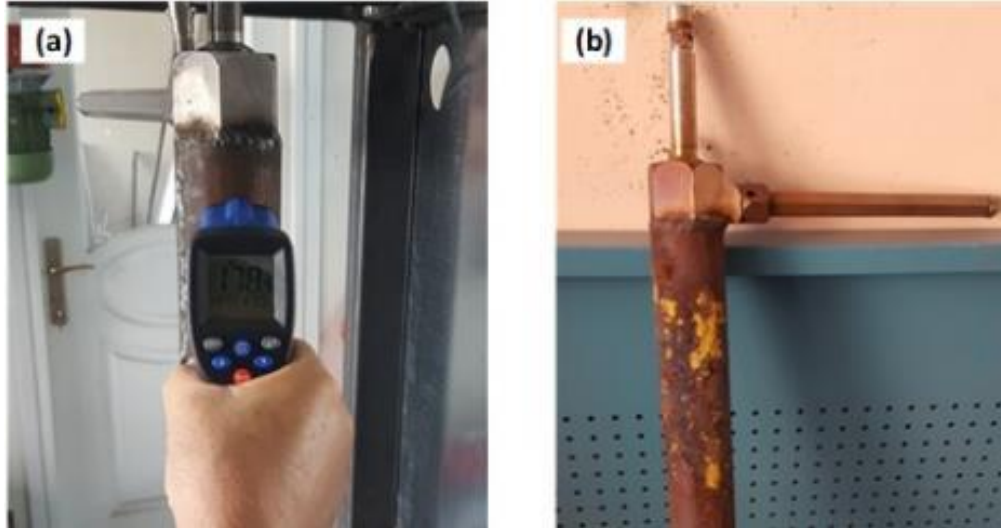
Deneme amacıyla ön tasarım kapsamında seçilen rezistans telinin hesaplanan güç değerinde akım verilmesi ile istenilen sıcaklıklara gelmeden ergimesi sebebiyle telin çapı piyasada standart çap değeri olarak bulunan 1,5 mm'ye çıkarılmıştır. Rezistans telinin çapının artması tel direnç değerini düşürdüğü için rezistans teli boyu eski çap değerine göre seçilen tel boyundan yaklaşık 3,5 kat daha fazla olan 15,6 m olarak belirlenmiş ve spiral hale getirilmiştir. İlk tasarımdan istenen sonuç alınmadığı için ısıtma sistemine ait 2 nolu tasarımında spiral hale getirilmiş rezistans telinin içine konulduğu seramik borunun yüksek sıcaklıklarda kırılma riskine ve ısıtılmış havanın patlama problemine karşı seramik borunun dışına 2,35 mm et kalınlığına ve 100 mm çapa sahip St37 malzemeden bir boru geçirilmiştir. Rezistans teline temas edecek olan havanın ısıtılmış sistem ile temas yüzeyinin fazla olması ve rezistans telinde kısa devre olayı olmaması

amacıyla rezistans telinin bulunduğu hazneye seramik çakılları konulmuştur. Burada seramik boru içine kompresörden gelen basınçlı havanın geçmesi ve ısınması sağlanacağı için çalışma şartlarında sistemin güvenli olması son derece önemlidir. Spiral hale getirilen rezistans telinin boyuna göre seramik boru seçilirken boyu 120 cm, boru iç çapı 38 mm ve dış çapı 52 mm olacak şekilde tercih yapılmıştır. Rezistans telinin elektrik bağlantıları ısıtma sisteminin en soğuk olduğu bölge olan kompresör girişinin altına ayarlanmıştır. Şekil 3.5’de ısıtma sistemine ait 2 nolu tasarımın şaseye bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Isıtma sisteminin 2 nolu tasarımına ait şase bağlantısı.

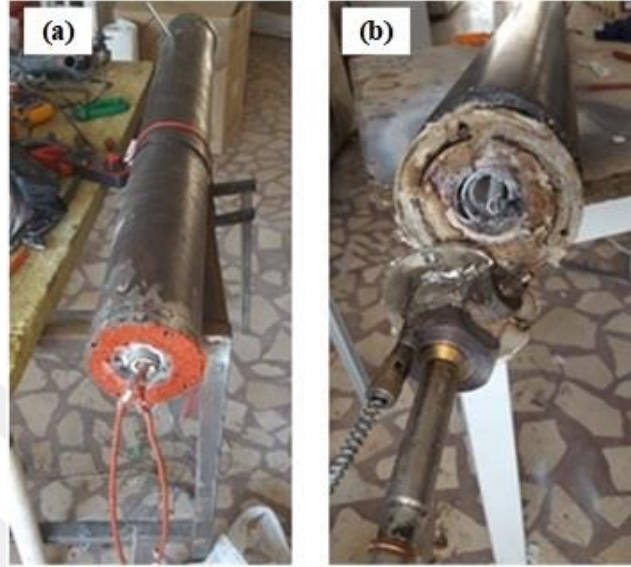
Tasarlanan sistemin daha sonra elektrik bağlantıları yapılarak rezistans telinin ısınması gözlemlenmiştir (Şekil 3.6(a)). Ön deney sonucunda rezistans telinin çapı büyüdüğü için bir ergimeye maruz kalmamıştır fakat tel çevresinde oluşan yüksek sıcaklık en dış katmanda olan demir boruda pul pul dökülmeye sebep olmuştur. Şekil 3.6(b)'de bu durum verilmiştir. Ayrıca rezistans teline doğrudan temas eden kompresörden gelen hava yüksek sıcaklıklarda rezistans telinde oksitlenmeye sebep olmuş ve rezistans telinin zamanla bu bölgelerden kopma riskini ortaya çıkarmıştır. Test sonucunda hava istenilen sıcaklığa çıkmamıştır, bu durum yeni bir tasarım yapmayı gerekli kılmıştır.



Şekil 3.6. Isıtma sistemi 2 nolu tasarımı; a) Test sırasında sıcaklığın ölçülmesi, b) Test sonrası St 37 borunun dış görünümü.

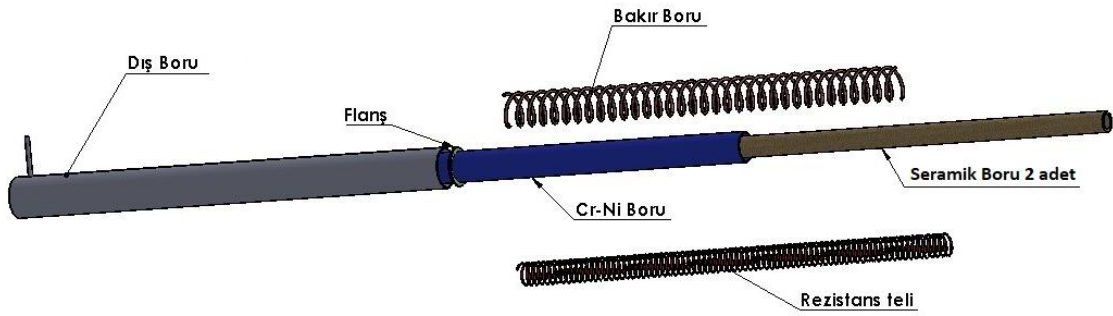
Yukarıdaki tasarımdan istenilen sonucun elde edilememesi sebebiyle ısıtma sistemine ait 3 nolu tasarıma geçilmiştir. 2 nolu tasarımda önceki tasarımda kompresörden gelen basınçlı havanın ısıtılan rezistans teli ile yeterli teması sağlamadığı düşünülerek kademeli olarak ısı geçişi sağlanması amacı ile iç içe geçmiş borulardan oluşan, havanın sıcak metal yüzeyine temas alanını artırma düşüncesiyle yeni bir tasarım yapılmıştır. Kompresörden gelen hava öncelikle en dıştaki St 37 boru içine girerek yukarı doğru çıkacak daha sonra tekrar Cr-Ni malzemedeki oluşan boru içine girerek aşağı inecektir ve son olarak da rezistans telinin üzerine sarıldığı seramik boru içinden geçerek ısınması sağlanacaktır (Şekil 3.7 (a)). Bu sistemde elektrik akımının verileceği rezistans tellerinin elektrik devresi ile bağlantısında hava sızdırmazlığı ve elektrik yalıtkanlığının sağlanması önemli bir problem olmuştur. Bu problemi çözmek amacı ile ilk önce boru ucuna bağlanan flanşa buji bağlantısı yapılarak bir taraftaki ucu elektrik devresine, boru içinde kalan ucu da rezistans teline bağlanmıştır. Bu sayede hem elektrik yalıtkanlığı hem de hava sızdırmazlığı sağlanmıştır. Bu tasarımın denenmesi esnasında bujilere fazla akım verilmesi sebebiyle bujilerin yandığı görülmüştür. Bu durum bujilerin kendi içerisinde bulunan fazla akım gelmesine karşı bir sigorta sisteminin varlığıyla açıklanabilir. Bu tasarımdaki buji sisteminin istenilen yetkinlikte çalışmaması sonucunda bu problem fiber kullanımı ile çözülmüştür. Fiber malzemenin dış çap ölçüsü flanşa bırakılan deliğe göre tornada işlenmiş olup iç çap ölçüsü de elektrik akımını iletcek bir vidaya göre imal edilmiştir. Şekil 3.7 (b)'de de fiber malzeme gösterilmiştir.

Bu tasarımda da rezistans tellerine akım verdikten sonra havanın ısınması incelenmiş ve dış boru 400°C–500°C sıcaklıklara geldiği halde havanın istenilen sıcaklığa ulaşmadığı belirlenmiştir. 3 nolu tasarıma ait deney öncesi ve sonrası ısıtma sisteminin iç kısmı görüntüsü Şekil 3.9’da verilmiştir.

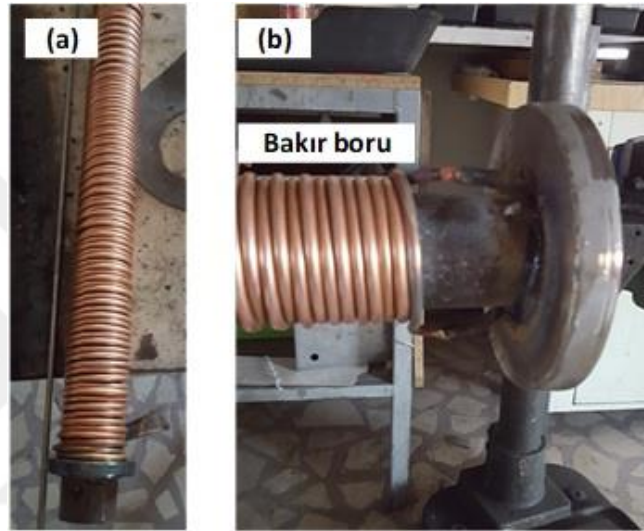


Şekil 3.9. Isıtma sisteminin 3 nolu tasarımının ön deneyleri; a) Deney öncesi ısıtma sisteminin bağlantılarının yapılması, b) deney sonrası ısıtma sistemi içinin görünümü.

Isıtma sisteminin 3 nolu tasarımına ait yapılan ön deneylerde havanın ısı değerinin artırılması için yeterli temas yüzeyini sağlayamamasından dolayı istenilen sıcaklıklara gelemeyişi sonucuna varılmıştır. Havanın temas yüzeyini artırma amacı ile 6 mm iç çapa sahip bakır boruların seramik boru yüzeyine sarılması ve bu bakır boruların içinden havanın geçmesi sağlanarak ısıtma sistemine ait yeni bir tasarıma ihtiyaç duyulmuş ve 4 nolu tasarıma geçilmiştir. Önceki tasarımlardan farklı olarak bu tasarımda rezistans teli iki adet seramik boru arasına konulmuş ve yay sargısı haline dönüştürülen bakır borunun en dıştaki seramik boruya temasına bağlı olarak maksimum ısı eldesi sağlanması amaçlanmıştır. Saf bakırın ısı iletim katsayısı 386 W/m.C ve ergime sıcaklığı 1083°C olduğu için bakır borunun rezistans teli sıcaklığını havaya daha iyi aktarabileceği düşünülmüştür. Ayrıca bakır boru, havanın ısınması istenilen sıcaklıklarda ergime yapmayacağı düşünülerek seçilmiştir. Bakır borudan geçen hava tekrar yüksek sıcaklıkta bulunan seramik borunun içinden geçerek havanın istenilen sıcaklığa ulaşması hedeflenmiştir. Bu tasarıma ait 3B bilgisayar destekli çizim sonrasında elde edilen patlatılmış görünümü Şekil 3.10’da verilmiştir. Şekil 3.11’de ise bakır boruların seramik boru üzerine sarmal ağ şeklindeki örgüsü ve flanş bağlantısı gösterilmiştir.

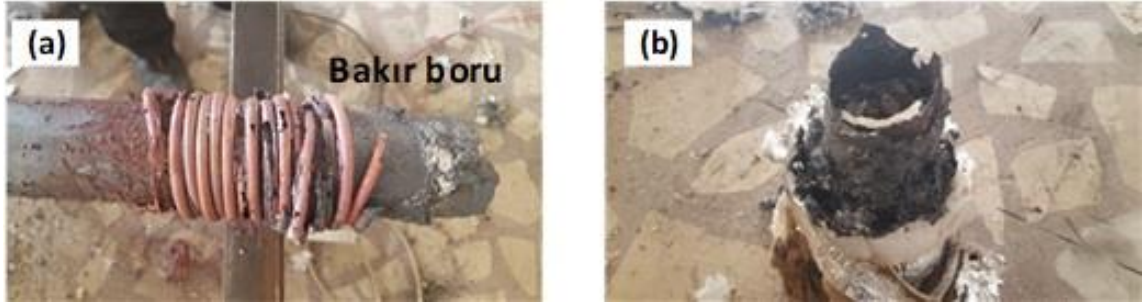


Şekil 3.10. Isıtma sisteminin 4 nolu tasarımına ait 3B çizim patlatılmış görünümü.



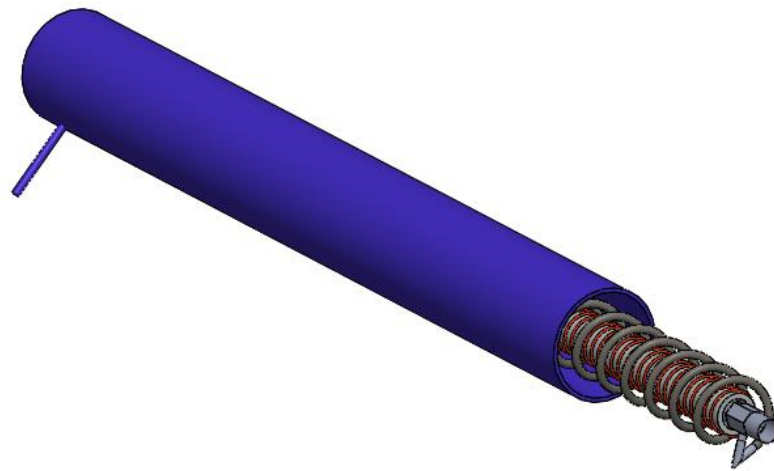
Şekil 3.11. Isıtma sisteminin 4 nolu tasarımı; a) Seramik boru üzerine bakır borunun sarılması, b) Bakır borunun flanşla bağlantısı.

4 nolu tasarım sonrasında ön ısıtma deneylerine geçildiğinde hava yaklaşık 700°C civarında bir sıcaklığa ulaştıktan sonra rezistans teli akım çekmemeye başlamıştır. Sistem elektrik bağlantısı kesilip oda sıcaklığında soğutulmaya bırakıldıktan sonra rezistans telinin akım çekmeme sebebini araştırmak amacıyla sistemin demontajı yapılmıştır. Demontaj işlemi sonrasında Şekil 3.12’de görüldüğü üzere bakır boruların tamamen eriyip kömür şekline dönüştüğü bir manzara ile karşılaşmıştır. Bakır boruların ergimesi, fırın içinde 1100°C ’lerin üzerinde bir sıcaklığın oluştuğu kanaatini ortaya çıkarmıştır. Fakat ısıtma sistemi içindeki bu yüksek sıcaklık varlığına rağmen havanın sadece 700°C ’lere kadar ısınması gerçekleşmiştir. Bu tasarımda kullanılan rezistans telinin iki seramik boru arasında olması, seramik boruların yalıtım görevi gördüğü ve rezistans telinin gerçek sıcaklığının ısıtılmak istenen havaya tam aktarılamadığı yorumunun yapılmasına yol açmıştır. Ergimeye uğrayan bakır borular incelendiğinde ısının havaya yeterince aktarılamadığı olarak yorumlanmıştır.

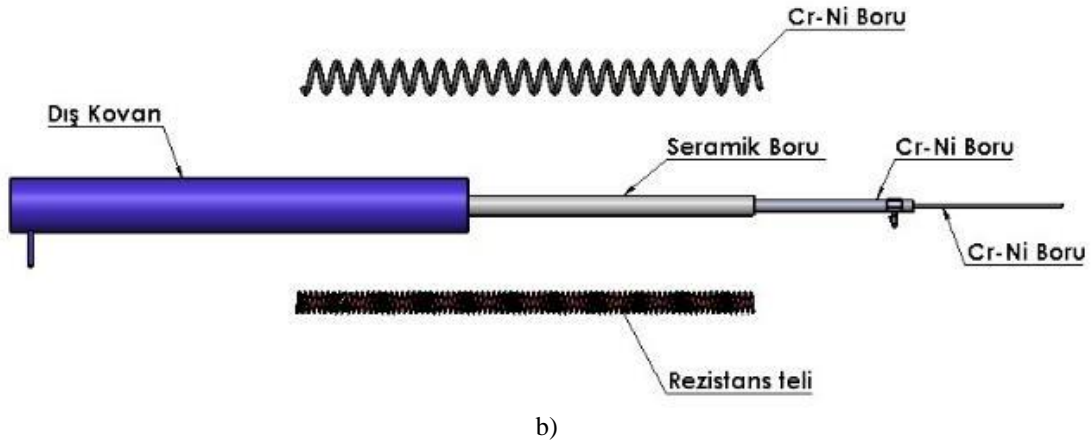


Şekil 3.12. Isıtma sistemine ait 4 nolu tasarımın ön deneyi; a) Delinmiş bakır boru, b) Ergimiş bakır boru.

Bakır boru ile yapılan 4 nolu tasarımda da istenilen sonuca ulaşılamamıştır. Fakat havanın daha küçük çaplı bir boru içerisinde geçirilmesi ile daha yüksek sıcaklıklara çıkılabileceği ön görüşüne sahip olunmuştur. Bu yüzden bundan sonra yapılacak tasarımda bundan önceki yapılan tasarımlara göre 3 temel şarta dikkat edilmesine karar verilmiştir. Bunlardan ilki havanın daha küçük çaplı bir boru içerisinde geçirilmesinin sağlanması, ikincisi boru malzemesinin dayanabileceği sıcaklık sınırının 1200°C 'lerin üzerinde olmasının gerekliliği ve rezistans teli ile havanın geçtiği boru arasında sıcaklık yalıtımını sağlayacak seramik borunun bulunmaması gerektiğine kanaat getirilmiştir. Bu düşüncelerden yola çıkarak ısıtma sistemine ait nihai tasarım olan 5 nolu tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda havanın ilerleyeceği boru Cr-Ni malzeme olarak belirlenmiş ve rezistans teli ile havanın geçeceği boru arasında seramik boru kullanılmamasına dikkat edilmiştir. Şekil 3.13'de ısıtma sistemine ait 5 nolu tasarımın 3B bilgisayar destekli çiziminin montaj ve patlatılmış görüntüleri verilmiştir. Son tasarım verileri dikkate alınarak Çizelge 3.2'deki parametreler tasarımda kullanılmıştır.



a)

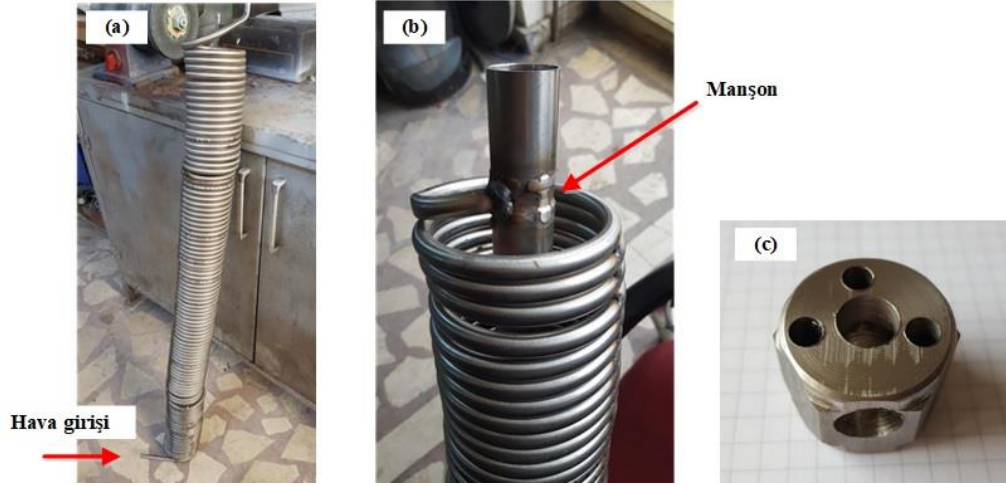


Şekil 3.13. Isıtma sistemine ait 5 nolu tasarımın 3B çizimi; a) Montaj görüntüsü, b) Patlatılmış görünüm.

Çizelge 3.2. Isıtma sistemine ait 5 nolu tasarımda kullanılan bileşenlerin boyutları.

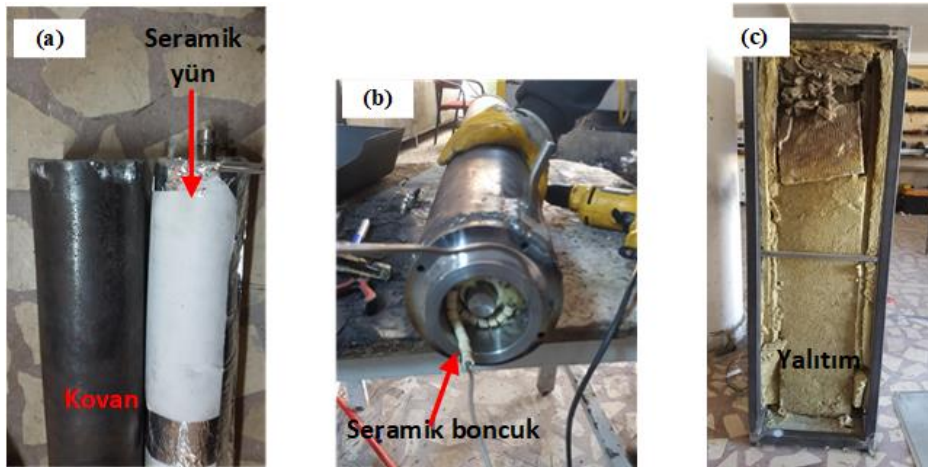
Malzeme tanımı	Ölçü	Malzeme tanımı	Ölçü
Rezistans teli çapı	3 mm	Rezistans teli boyu	15 m
Seramik boru dış çapı	42 mm	Seramik boru iç çapı	32 mm
Cr-Ni boru dış çapı	10 mm	Cr-Ni boru iç çapı	8 mm
Cr-Ni boru boyu	24 m	Cr-Ni boru büküm çapı	80 mm
Dış boru çapı	140 mm	Dış boru boyu	110 cm
Seramik boru içine yerleştirilen Cr-Ni boru dış çapı	30 mm	Seramik boru içine yerleştirilen Cr-Ni boru boyu	90 cm
Seramik boru içine yerleştirilen Cr-Ni 2. boru dış çapı	8 mm	Seramik boru içine yerleştirilen Cr-Ni 2. boru boyu	80 cm

İlgili sisteme ait yapılan son tasarımda toplam 6 m boyunda ve 4 adet Cr-Ni boru önce birbirine kaynatılarak 24 m boyunda bir boru elde edilmiş ve daha sonra bu boru sarmal örgü haline getirilmiştir. Şekil 3.14'de havanın geçeceği Cr-Ni boruların sarmal görünüşleri ve kaynak yapılmış görselleri verilmiştir. Rezistans teli ile sarılmış seramik borunun içinde de havanın hareketinin sağlanması için sarılan Cr-Ni boru Şekil 3.14(c)'de gösterildiği üzere bir bağlantı elemanı ile kaynatılmıştır. Ayrıca bu manşon şeklindeki bağlantı elemanının alt tarafına da Cr-Ni malzemedeki düz bir boru kaynatılarak seramik borunun içinde havanın girmesi sağlanmıştır. Böylece seramik boru içinde yüksek sıcaklıklara çıkılması durumunda hava o bölgeden geçerek ısınmış olacaktır.



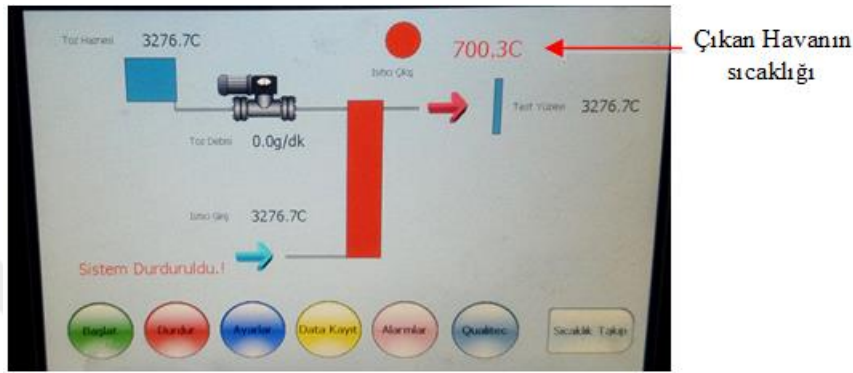
Şekil 3.14. Isıtma sisteminin 5 nolu tasarımı; a) Cr-Ni borunun sarmal yapısı, b) Hava geçiş bağlantı manşonu kaynaklı birleştirilmesi ve c) Havanın geçeceği bağlantı manşonu.

Isıtma sistemi içinde oluşan ısının etrafa yayılmaması ve çevre ısısının bükülmüş Cr-Ni borudan geçen havayı etkilememesi için Şekil 3.15(a)'da gösterildiği gibi bükülmüş boru sistemi tamamen seramik yün ile sarılarak en dışta bulunan ve kovan ismi verilen dış boruya geçirilmiştir. Bu sistemde seramik boru üzerine sarılan rezistans teli ile bükülmüş Cr-Ni boru arasında elektriksel yalıtkanlığı sağlamak amacıyla kullanılan seramik bir boru konulmadığı için bükülmüş Cr-Ni boru ile rezistans teli arasında elektriksel yalıtkanlığı sağlamak amacı ile rezistans teline Şekil 3.15(b)'de gösterildiği gibi seramik boncuklar geçirilmiştir. Ayrıca sisteme elektrik vermeden önce bir elektrik kaçağının olup olmadığı rezistans telinin iki ucundaki direnç değeri multimetre yardımıyla ölçülerek kontrolü sağlanmıştır. Şekil 3.15(c)'de ise çevreden ısı alışverişinin olmaması için kovan, yalıtım malzemesi ile tekrar kaplanmıştır.



Şekil 3.15. Isıtma sistemine ait 5 nolu tasarım; a) Cr-Ni borunun seramik yün ile sarılması, b) Seramik boncuk uygulaması ve c) Isıtma sisteminin ısı yalıtımının sağlanması.

Elektriksel ve ısı yalıtımları kontrol edildikten sonra rezistans teline akım verilerek kompresör yardımı ile 1 bar basınçta havanın akışı sonrasında ısıtma sisteminin çalışması başlatılmıştır. Bir ısı ölçer yardımı ile havanın sıcaklığı ölçülmeye başlanmış ve ölçülen havanın sıcaklığı PLC sisteminden oluşan LCD ekranında Şekil 3.16'da verildiği şekilde izlenmiştir. İlk başlarda PLC sistemi ile rezistans teline verilen akım, kontrollü verilerek sistem sıcaklığı adım adım yükseltilmiş olup sistemin istenilen sıcaklığa gelmesi beklenilmiştir.



Şekil 3.16. PLC sisteminin genel görünüşü ve hava çıkış sıcaklığının okunması.

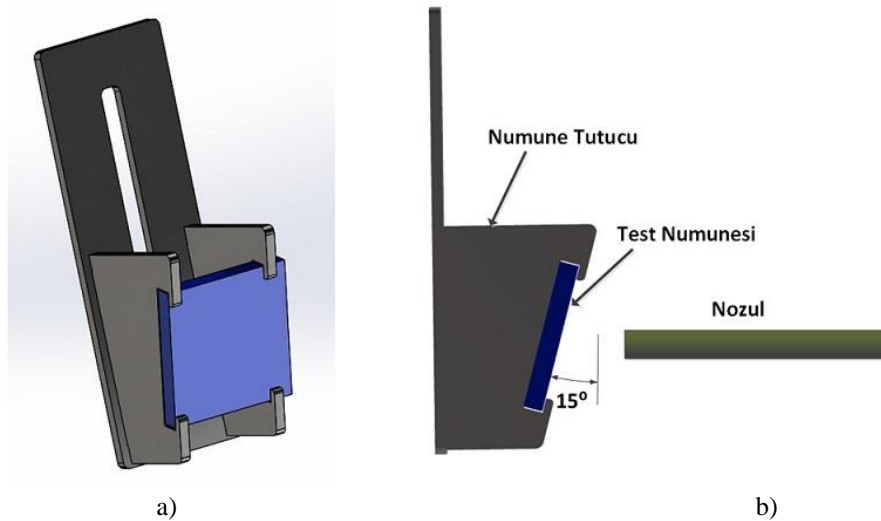
Isıtma sisteminin 5 nolu tasarımının prototipi ile havanın istenilen sıcaklıklara çıkılabileceği deneysel olarak izlenmiş olup nihai olarak bu sistemin üretimi gerçekleştirilmiştir. Yapılan ön deneylerde hava sıcaklığı hiçbir problemle karşılaşmadan 700°C sıcaklığa kadar çıktığı gözlemlenmiştir. Böylelikle kompresörden gelen havanın ASTM G211 uluslararası standardına uygun bir biçimde ısıtılabilen bir sistem tasarlanmış ve üretimi gerçekleştirilmiştir.

3.2. YSKPE Aşınma Test Cihazı Numune Tutucu Tasarımı ve Üretimi

Erozyon aşınma deneyleri gerçekleştirilirken test numunelerinin hareketlerini kısıtlayan sabit bir numune tutucu aparata bağlanması son derece önemlidir. Aksi takdirde nozuldan çıkan aşındırıcı partiküllerin numuneye çarpması sırasında numune ile tutucu arasında olan bir boşluk veya numunenin oynaması durumunda oluşacak aşınma izleri bu durumdan olumsuz etkilenecektir. Bu nedenle numune tutucu tasarımı yapılırken ilk önce numunenin nozul ile aynı hizaya gelmesini sağlayabilecek ve numunenin rijit bir şekilde tutucu da durmasına imkân verecek bir numune tutucu tasarımı düşünülmüştür. Ayrıca erozyon aşınma testlerinde aşınmaya en fazla etki eden etmenlerden biri olan ve aşınacak

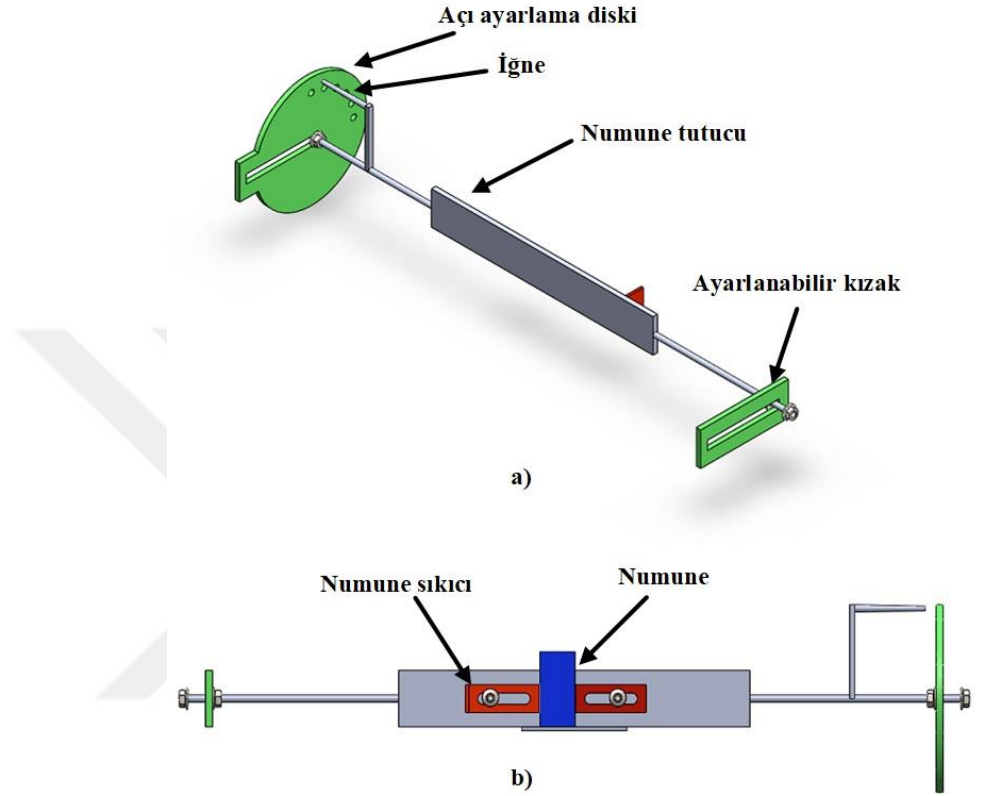
numunenin sünek veya gevrek malzeme olmasını belirlemede önemli bir etken olan çarpma açısının da numune tutucu da ayarlanabilmesi önemli yere sahiptir. Erozyon aşınma testlerinde her zaman aynı boyutlarda numune elde edilmesi zor olduğu için numune tutucu tasarımında farklı boyutlarda numunelerin de bağlanabileceği bir tasarım düşünülmüştür. Numune tutucunun rijit olması, farklı numune boyutlarında numunelerin bağlanabilmesi, çarpma açısının ayarlanabilmesi, numunenin montaj ve demontajının kolay olması ve nozul ile aynı hizada, mesafe ayarının yapılabilmesi temel tasarım parametreleri olarak belirlenmiştir.

Yukarıdaki bilgiler ve tasarımsal parametreler ışığında ilk olarak Şekil 3.17’de numune tutucunun 3B çizimi gösterilen 1 nolu tasarımı yapılmıştır. Bu numune tutucu tasarımında farklı açılarda numunenin bağlanabileceği, istenilen açıya göre çıkarılıp takılabilen, yükseklik ayarı kızak yardımı ile ayarlanabilen bir fikstür tasarımı yapılmıştır. Numunenin çıkarılıp takılmasında kolaylık olması bakımından kızaklı bir geçiş tercih edilmiştir. Tasarlanan bu numune tutucu üretilmiş ve montajı yapılmıştır fakat uygulamada yukarıda belirtilen tasarım parametrelerinden rijitlik ve farklı boyutlardaki numunelerin bağlanabilme şartlarını tam sağlayamadığı gözlemlenmiştir. Numunenin tutucuya bağlanmasının sadece kızak yardımı ile gerçekleşmesi, kızak ile numune arasında boşlukların olabilmesi ve sadece belirli kalınlıklarda numunelerin bağlanabilmesi gibi kısıtlamalardan dolayı bu numune tutucunun istenilen özellikleri sağlayamadığı sonucuna varılarak farklı numune tutucu tasarımları üzerine yoğunlaşmıştır.



Şekil 3.17. Numune tutucuya ait 1 nolu tasarımın 3B gösterimi; a) İzometrik perspektif görünüş, b) Sol yan görünüş.

Numune tutucunun 1 nolu tasarımında görülen eksikliklerden yola çıkılarak yukarıda belirtilen tüm tasarım parametrelerini sağlaması amacı ile yeni bir numune tutucu tasarımı planlanmıştır. Tasarımı yapılan yeni numune tutucunun 3B çizim görüntüsünün izometrik görünümü Şekil 3.18’de verilmiştir.

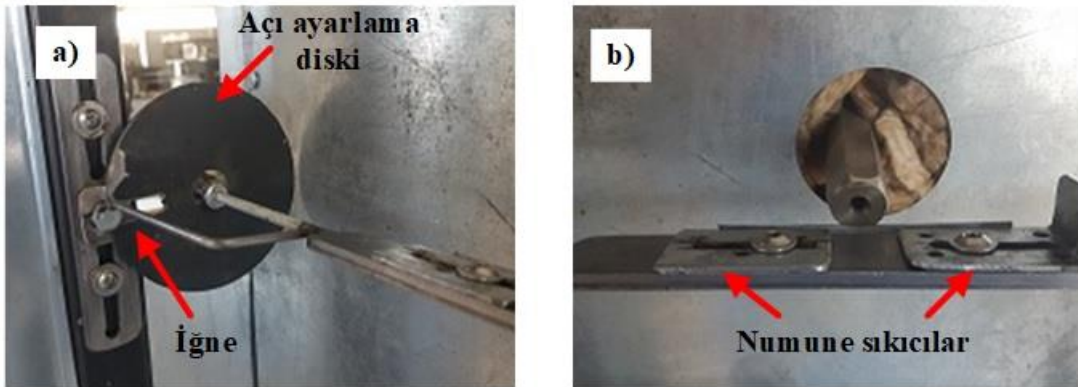


Şekil 3.18. Numune tutucuya ait 2 nolu tasarımın 3B çizimi; a) İzometrik perspektif görünüş; b) Ön görünüş.

Numune tutucunun 2 nolu tasarımında numunenin nozul ile yatay mesafesinin ayarlanabilmesi amacıyla kızaklı bir sistem tercih edilmiştir. Açı ayarlama diski ve ayarlanabilir kızak üzerinde bulunan yarık içinde serbest hareket eden numune tutucu, nozul ile istenilen mesafeyi ayarlayabilme amacıyla her iki tarafında bulunan somunlar yardımıyla sabitlenebilmektedir. Numune tutucunun açı ayarı, numune tutucu üzerindeki iğnenin ucunun, açı ayarlama diski üzerinde bulunan 15° 'lik açı ile açılmış deliklere denk getirilmesi ile sağlanmaktadır. Açı ayarlama diski zemine paralel durmakta, numune tutucu ise üzerindeki somunların gevşetilmesi ile istenilen açıda dönebilmektedir. Numunenin, tutucuya bağlanma şekli numune tutucunun ön görünüşünde verilmiş olup numunenin yerleştirildiği bölgenin her iki tarafında konumlandırılan numune sıkıcılarla numune sabitlenmekte ve civatalar yardımıyla rijitlik sağlanmaktadır. Ayrıca numune

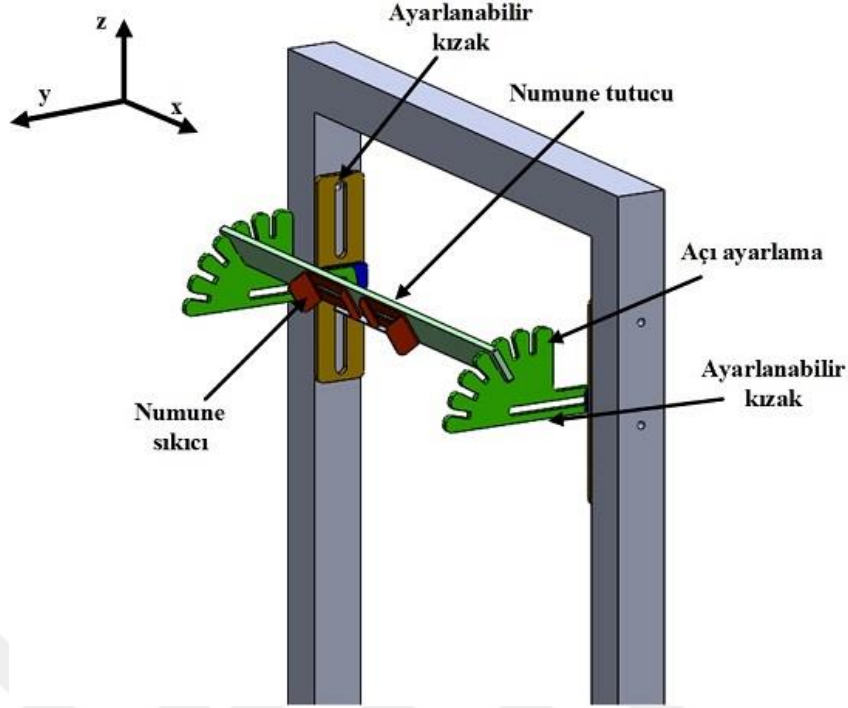
sıkıcıların kızaklı olması farklı boyutlarda numunenin tutucuya bağlanmasına olanak sağlamakla birlikte numunenin nozul ile aynı hizada olmasını sağlayacak serbest hareketlilik imkânı numuneye kazandırılmaktadır.

Tasarlanan bu sistem yukarıda belirtilen tüm tasarım parametrelerini sağlamakta olduğundan bu sistemin prototip üretimi Şekil 3.19’da gösterildiği gibi yapılmıştır. Tasarımı yapılan bu numune tutucu sisteminin prototipi üretilmesiyle numune bağlama denemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu denemelerde açı ayarlama ve ayarlanabilir kızak’ın tek cıvata ile deney seti iskeletine bağlanması ve cıvataların gevşediği durumlarda bu kızakların zemine yatay hizada durmasının zorluğu görülmüştür. Bu durum ise istenilen açı ayarlanmasında pratikliği sınırlamıştır. Ayrıca numune tutucunun sabit olmasından dolayı deney sırasında nozul’dan ısıtılmış hava gelirken numunenin, numune tutucuya nozul ile aynı hizaya gelecek şekilde bağlanmasının zorlukları olduğu gözlemlenmiştir. Ön deneyler sonucunda bu tasarımın, yüksek sıcaklıklarda yapılan deneyler sırasında numune bağlama işini meşakkatli bir hale getireceği sonucuna varılmıştır.

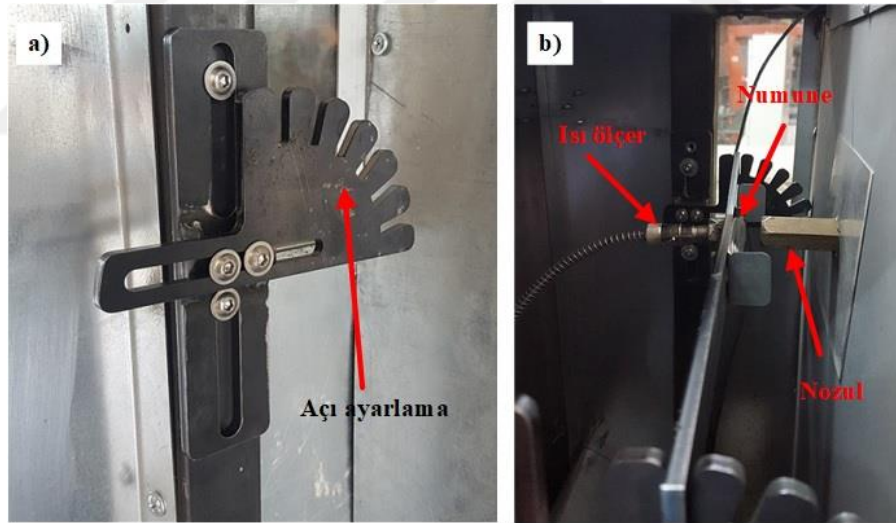


Şekil 3.19. Numune tutucuya ait 2 nolu tasarım; a) Açı ayarlama diski ve iğne, b) Numune bağlantısı.

Tekrarlı yapılan deneyler sırasında ve yüksek sıcaklıklarda çalışıldığı durumlarda numunenin rahat bir şekilde bağlanabilmesi amacı ile yeni bir numune tasarımına ihtiyaç duyulmuştur. Tasarlanan ve üretilen yeni tutucunun, Şekil 3.20’de 3B çizimi ve Şekil 3.21’de de montaj görüntüsü verilmiştir. Bu tasarımda numune tutucu, deney gövdesinden rahat bir şekilde çıkarılabilir ve takılabilir hale getirilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi numune tutucu istenilen açının kızığına oturtulmakta ve deneyler yapılabilmektedir. Bu sistemde açı ayarı da cıvata ayarından bağımsız hale getirilmiş ve 15°’lik açılarla kızakta kanal açılmıştır. Bu durum açı ayarının daha kararlı olmasını sağlamıştır.



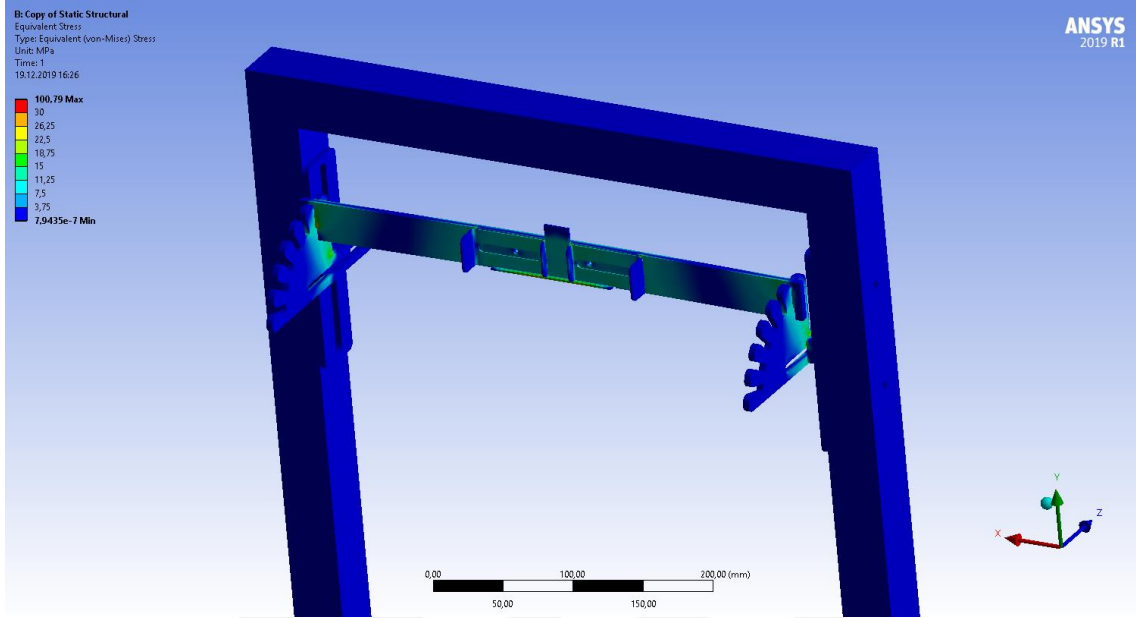
Şekil 3.20. Numune tutucuya ait 3 nolu tasarımın 3B çizimi.



Şekil 3.21. Numune tutucuya ait 3 nolu tasarım; a) Açı ayarlama bölümü, b) Numune tutucu aparatı.

Ayrıca ayarlanabilir kızakların test cihazı iskeletine iki civata ile bağlanması sağlanarak kızakların zemine paralelliği garanti altına alınmıştır (Şekil 3.21 (a)). Bu sistemde numune, üç eksen de hareket edebilmekte ve açı ayarlama sistemiyle de dördüncü eksen de dönme hareketini yapabilmektedir. Numune sıkıştırma işi bir önceki tasarımda olduğu şekilde iki numune sıkıcı arasında numunenin konulması ile sağlanmaktadır. YSKPE aşınmasına maruz kalacak numunenin sıcaklığını ölçmek için de ayrıca numunenin yerleştirildiği bölgenin arkasına bir delik açılarak numuneye temas

edecek şekilde bir ısı ölçer yerleştirilmiştir (Şekil 3.21 (b)). Şekil 3.22’de numune tutucunun ANSYS.R15 programı kullanılarak mekanik analizi yapılmış ve deneyler esnasında numune tutucuda herhangi bir problem olmayacağına ait veriye ulaşılmıştır.

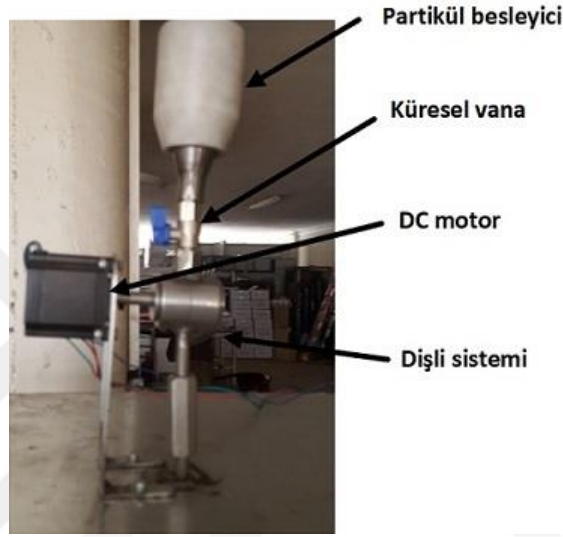


Şekil 3.22. ANSYS.R15 programı kullanılarak numune tutucu için elde edilen mekanik analiz.

3.3. Partikül Besleme Ünitesi Tasarımı ve Üretimi

YSKPE test cihazında hava ısıtma sisteminin ve numune tutucunun tasarımından sonra KPE aşınmasında erozyon oranını bulmada son derece önemli olan aşındırıcı partikül besleme ünitesinin tasarımına odaklanılmıştır. Literatüre bakıldığı zaman gıda, kimya, çimento ve tekstil endüstrisinde kullanılan partikül besleme ünitelerinin hacimsel ve gravimetrik besleme olarak sınıflandırıldığı görülmüştür (Gundogdu, 2004). Hacimsel besleme basit ve en yaygın olarak kullanılan sistemdir. Hacimsel besleme, sabit hacimli bir huniye doldurulan önceden kütlesi veya hacmi bilinen partiküllerin bir besleme cihazı ile nozula verildiği sistemdir. Bu sistemde besleme cihazı ile partiküllerin akış hızının kalibrasyonunun yapılması gerekmektedir. Gravimetrik beslemede ise partiküller bir konveyör sistemi üzerine bırakılarak, konveyör hızının ayarlanması ile partikül besleme hızı ayarlanabilmektedir. Bu yöntem diğerine göre biraz daha pahalı bir yöntemdir. Partikül besleme ünitesi seçiminde basit, pratik ve ucuz olması sebebi ile hacimsel besleme ünitesi seçilmiştir. Ayrıca bu yöntemde farklı aşındırıcı partiküllerin de (demir tozu, alümina, kuvars vb.) rahat bir şekilde kullanılabilmesi bu yöntemi öne çıkarmıştır.

Yukarıda belirtilen temel kriterler referans alınarak aşındırıcı partiküllerin nozula hassas bir şekilde yönlendirileceği partikül besleme ünitesinin tasarımı Şekil 3.23'de görüldüğü gibi prototip amaçlı olarak test cihazı üzerine montaj edilmiştir. Partikül besleme kabına aşındırıcı partiküllerin ağırlıkları önceden belirlenerek konulmuştur. Partiküllerin sıcak hava ile istenilen debide (g/s) karışarak numune yüzeyine yönlendirilmesi amacıyla bir DC motorun şaftı ile dişli sistemi tahrik edilerek partikülün istenilen hızlarda numune yüzeyine çarptırılması amaçlanmıştır.

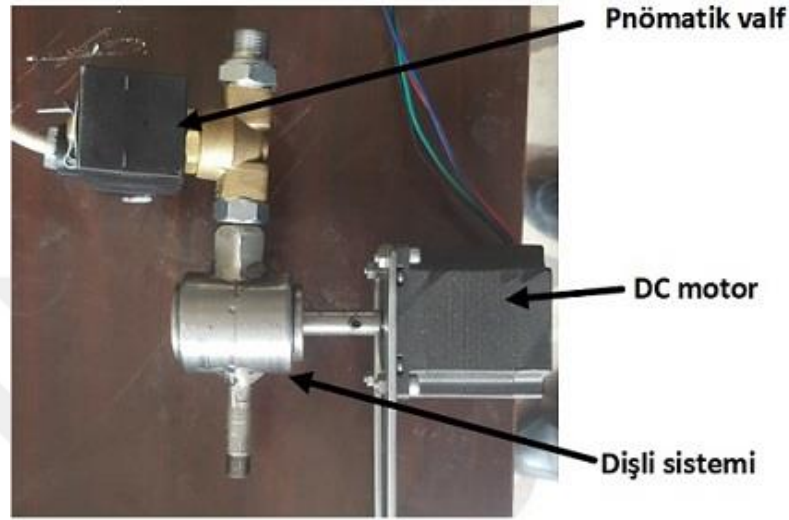


Şekil 3.23. Partikül besleme ünitesinin 1 nolu tasarımı.

Partikül besleme ünitesine ait 1 nolu tasarımın montajının yapılmasından sonra partiküllerin düzenli bir şekilde nozula iletilip iletilmediğini gözlemlemek amacıyla ön deneyler yapılmıştır. Nozul tasarımında aşındırıcı partiküllerin geldiği borudan emme oluşturacak şekilde bir tasarım yapıldığı için nozula hava akışı verildiğinde sistemde oluşan emme etkisi ile aşındırıcı partikül tozlarının DC motorun çalışmadığı durumda dahil partikülleri çektiği gözlemlenmiştir. Bu durumun aşınma deneylerinde erozyon oranını hesaplamada partiküllerin düzensiz gelmesinden dolayı hataya sebep olacağı görülmüştür.

Partikül besleme ünitesinin ilk modelinin değişken miktarda aşındırıcı partikül transferine sebep olabileceği anlaşıldıktan sonra tasarımın revizyonuna ihtiyaç duyulmuştur. Bu tasarımda ise partikül besleyici sistemine bir pnömatik açma-kapama valfi bağlanarak PLC sisteminden pnömatik valfin açma-kapama hızının ayarlanması yoluyla partiküllerin düzenli besleneceği düşünülmüştür. Yeni tasarlanan partikül besleme sistemine pnömatik valf monte edilerek deneme testleri gerçekleştirilmiştir. Bu

testlerde valfin açma-kapama mekanizması çok küçük bir delikten havanın geçip geçmemesine göre tasarlandığı için toz partiküllerinin bu delikten geçmesi esnasında tıkanıklık problemi gözlemlenmiş ve düzenli partikül akışı sağlanamamıştır. Şekil 3.24’de partikül besleme ünitesinin 2 nolu tasarımına ait montaj edilmiş prototip görüntüsü verilmiştir.



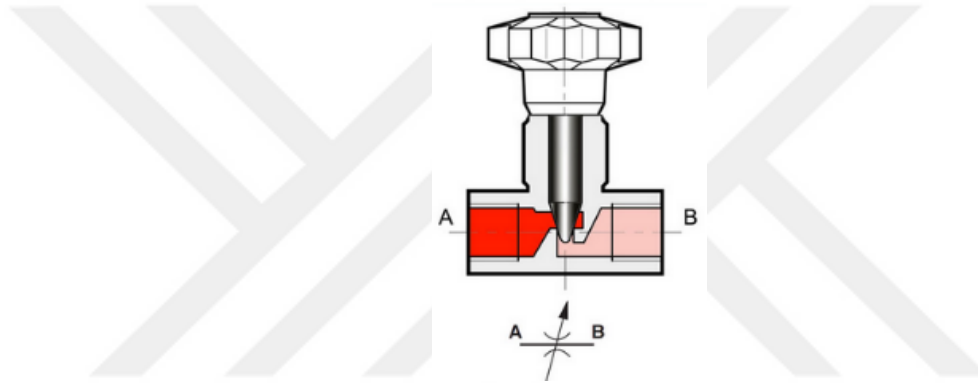
Şekil 3.24. Partikül besleme ünitesinin 2 nolu tasarımı.

Partikül besleme ünitesinin 2 nolu tasarımında da karşılaşılan tıkanıklık probleminin devam etmesinden dolayı farklı bir besleme ünitesi tasarımına ihtiyaç duyularak 3 nolu tasarım gerçekleştirilmiştir. Bu tasarımda partikül besleme işleminin hidrolik hız ayar valfi ile manuel olarak kontrol edilmesi sağlanmış olup Şekil 3.25’de görseli verilmiştir.



Şekil 3.25. Partikül besleme ünitesinin 3 nolu tasarımı.

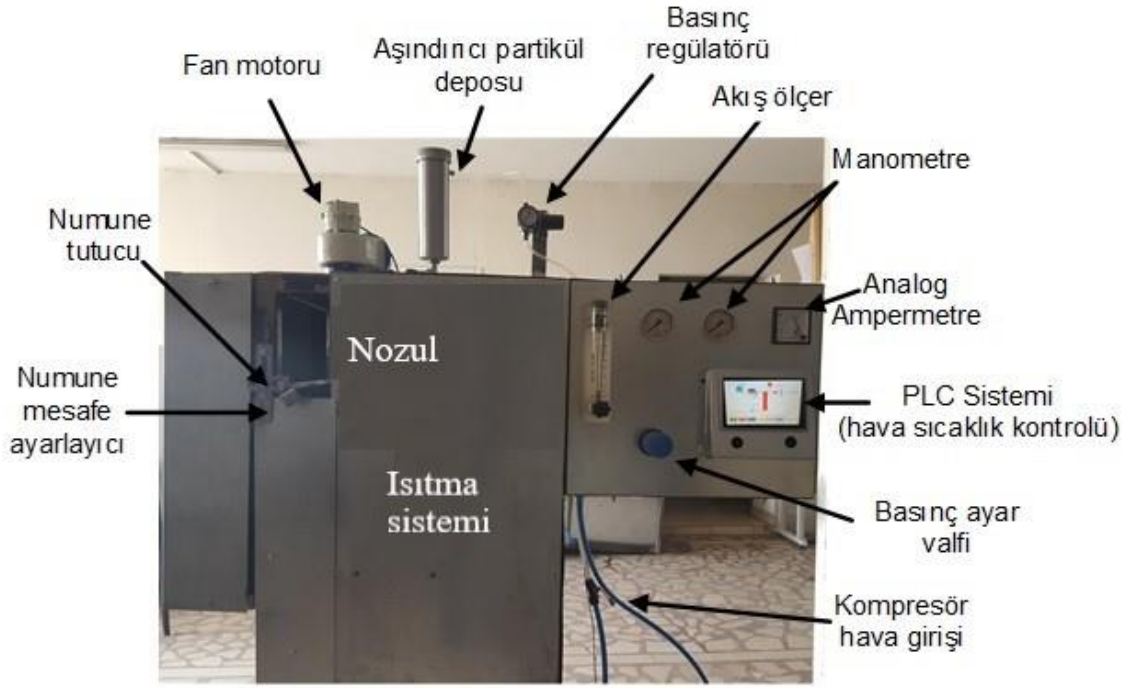
Hız ayar valfinin ayar vanasının çevrim sayısına göre partikülün akış hızı deneysel olarak test edilmiş ve buna göre deneylerde partikülün beslenmesi karşılanmıştır. Hidrolik hız ayar valfinin kesit görünüşü Şekil 3.26'daki gibi bir yapıya sahip olduğu için bu sistemde partikülün tıkanma problemi ile karşılaşılma ve partikül besleme çapı manuel olarak ayarlanarak aşındırıcı partikülün düzenli akışı sağlanmıştır. Hidrolik hız ayar valfinin ayar vanasına uygulanan çevrim sayısına göre partikül besleme hızı ayarlanabilmektedir. Ayrıca nozul tasarımında düşünüldüğü şekilde emme etkisinin zayıf olması durumlarında partikülün besleyiciden nozula akışını sağlayabilmek amacıyla besleyici üzerine bir hava girişi de eklenmiş olup bu hava girişinin pnömatik regülatör ile kontrolü sağlanacak şekilde montajı yapılmıştır.



Şekil 3.26. Hidrolik hız ayar valfi kesit görünüşü ve sembolü.

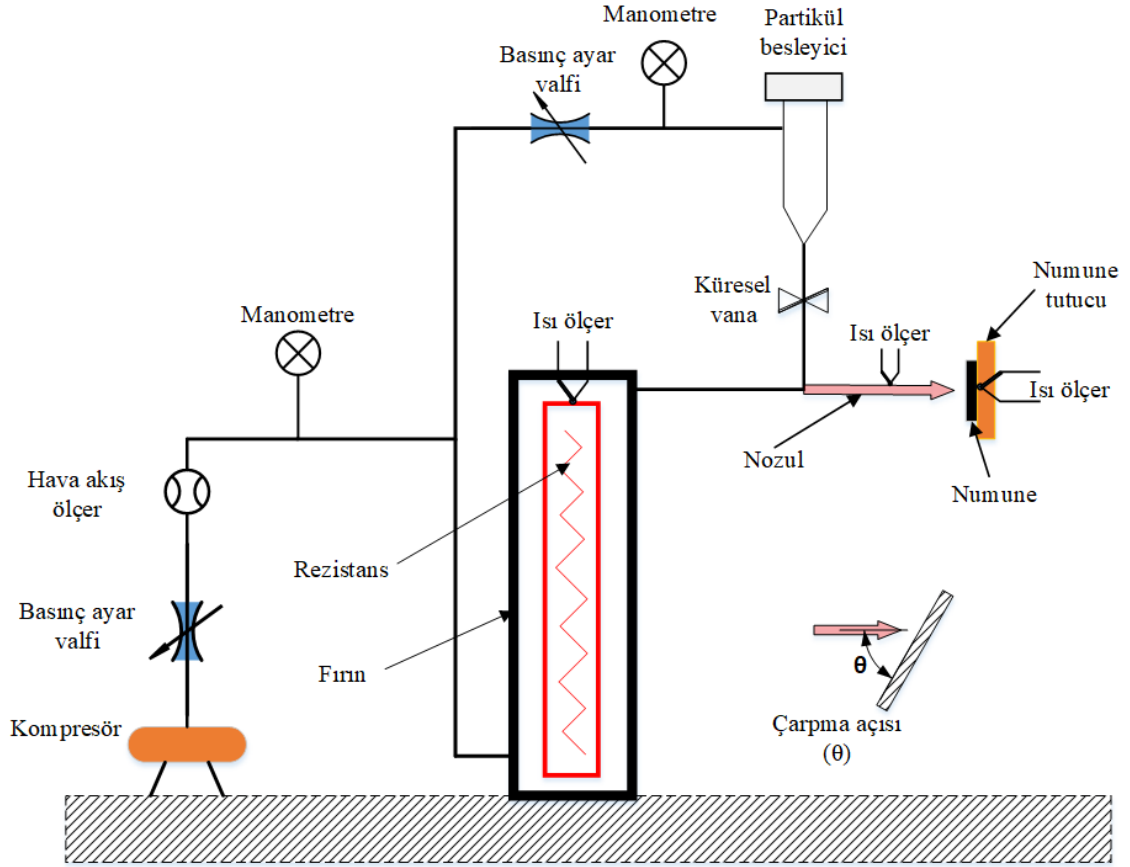
Partikül besleme ünitesinin 3 nolu tasarımın montajı yapıldıktan sonra YSKPE test cihazına kompresörden hava girişi sağlanarak partikül besleme ünitesinin ön deneyleri yapılmıştır. Yapılan ön deneylerde partikül besleme ünitesine ağırlığı önceden bilinen miktarda partikül konularak bu partiküllerin nozuldaki akışı ve toplam partiküllerin akma süresi kontrol edilmiştir. Ağırlığı bilinen miktarda partikülün yapılan tekrarlı deneylerde akma sürelerinin ± 5 saniye hassasiyet ile değiştiği tespit edilmiştir. Toplam partikül miktarı bilindiği ve bu partiküllerin düzenli bir şekilde numune yüzeyine çarptığı gözlemlendiği için partikül besleme ünitesine ait bu tasarımın YSKPE aşınma test cihazına montajına karar verilmiştir.

Isıtma sistemi, numune tutucu ve partikül besleme ünitesi tasarımlarının ve ön deneylerinin yapılarak tasarım doğrulama işlemlerinin bitirilmesi ile birlikte YSKPE aşınma test cihazının montajı tamamlanmıştır. Şekil 3.27'de montajı yapılan YSKPE aşınma test cihazının montaj fotoğraf görüntüsü ve kullanılan komponentlerin sistem üzerinde bir bütün halindeki konumlaması gösterilmiştir.



Şekil 3.27. YSKPE test cihazı montaj resmi.

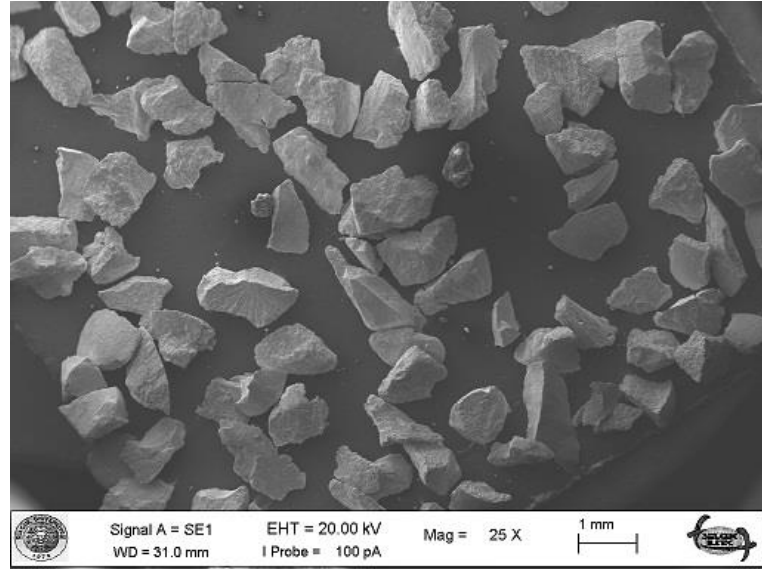
Şekil 3.28’de ise test cihazına ait şematik gösterim verilmiş olup deney setinin farklılığını ortaya koyan ve sıcaklık verilerinin farklı noktalardan kontrol edilmesini sağlayan 3 adet ısı ölçer deney setine monte edilmiştir. Bu ısı ölçerler deney numunesinin, nozul iç yüzeyinin ve ısıtma sistemi içerisinde sıcaklığını ölçme amacı ile yerleştirilmiştir. Deney setinde kullanılan fan motoru yardımıyla deneyler esnasında oluşabilecek tozun dağılmasının önlenerek dış ortama atılması amacıyla baca yardımı ile kullanılmıştır. Ayrıca, akış ölçer ile sisteme giren havanın litre/dakika olarak ayarlanabilmesi, basınç ayar valfi ile sisteme giren basıncın kontrol edilebilmesi, analog ampermetre ile ısıtma sisteminin çalışması esnasında sistemin elektrik şebekesinden çektiği akım şiddeti değerinin (amper) belirlenmesi, PLC sisteminin kontrolüyle sistemin istenen sıcaklıklara çıkarılabilmesi ve ısı ölçerlerin kontrolünün sağlanması test cihazının temel yetenekleri olarak belirlenmiştir.



Şekil 3.28. YSKPE test cihazı şematik gösterimi.

3.4 Aşındırıcı Partikül Özellikleri

Deneylerde açısız geometriye sahip ve $\sim 400 \mu\text{m}$ ortalama çapında alümina (Al_2O_3) aşındırıcı partikülleri kullanılmıştır. Bu partiküllerin; sertliği, aşınma direnci ve 2000°C 'ye kadar yüksek sıcaklıklarda kararlılığı nedeniyle diğer araştırmacılar tarafından (Wang ve ark., 2012; Wang ve ark., 2014; Schmitt ve ark., 2015; Cernuschi ve ark., 2016) sert metallerin kaplanması işlemi uygulanmış KPE aşınma testlerinde yaygın olarak tercih edilmesi yapılan tez çalışmasındaki aşındırıcı partikül seçiminde önemli kriteri oluşturmuştur. Şekil 3.29'da kullanılan alümina tozlarının SEM görüntüsü ve Çizelge 3.3'de ise en genel özellikleri verilmiştir.



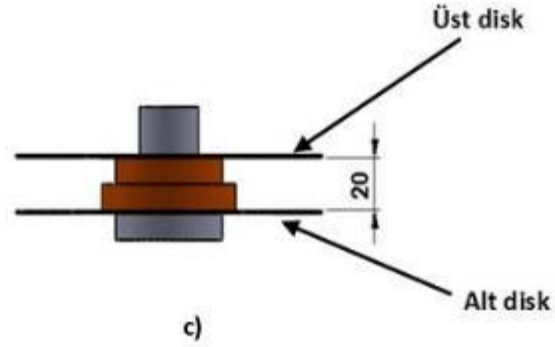
Şekil 3.29. Aşındırıcı partiküllerin (Alümina) SEM görüntüsü.

Çizelge 3.3. Aşındırıcı partiküllerin (alümina) özellikleri.

Yoğunluk (g/cm ³)	3,9 – 4,1
Sertlik (Mohs)	9
Ergime Noktası (°C)	2050

3.5. Aşındırıcı Partikül Çarpma Hızı Ölçümü

Katı Partikül Erozyon çalışmalarında aşınma direncini etkileyen en önemli değişkenin partikül hızı olduğu literatürdeki çalışmalarla ispatlanmıştır (Hutchings ve Shipway, 2017). Aşındırıcı partikül hızını doğru bir şekilde ölçmek son derece önemlidir. Parçacık Görüntülemeli Akış Hızı Ölçümü (PIV), Lazer Doppler Anemometresi (LDV) ve Çift Disk Metodu standartça kabul gören hız ölçüm teknikleridir. Bunlar arasında daha ekonomik ve basit oluşu sebebi ile en yaygın kullanılanı çift disk metodudur (Ruff ve Ives, 1975). Çift disk metodunun hız ölçümünün belirlenmesine ait şematik gösterimi Şekil 3.30'da verilmiş olup deneylerde kullanılan aşındırıcı partikül çarpma hızının belirlenmesinde bu metottan faydalanılmıştır.



Şekil 3.31. Çift disk metodu disklerinin 3B çizimi; a) Üst disk, b) Alt disk ve c) Montaj yan görünüşü.

İki disk arasındaki mesafeden (L) bir partikülün ortalama bir hızla (ϑ) geçmesi için gerekli zaman (t) doğrusal hareket denklemlerinden L/ϑ olarak ifade edilir. Bir çemberdeki yay uzunluğu formülünden yola çıkarak alt diskte oluşan iki iz arasındaki mesafe (S);

$$S = \theta * r \quad (3.9)$$

denklemleri ile belirlenir ve burada θ : izler arasındaki açıyı (radyan), r : iz yarıçapını (mm) ifade etmektedir. Dönme hareket denklemleri kullanılarak θ açısı yerine $\omega * t$ yazıldığı zaman (3.9) denklemi;

$$S = (\omega * t) * r \quad (3.10)$$

denkleminde dönüşür. (3.10) denkleminde ω ; açısal hız (radyan/s) ifadesi yerine motor dönme devrine (n) bağlı tanım yazılır ve t zamanı yerine L/ϑ konularak ise;

$$S = \left[\frac{2 * \pi * n}{60} \right] * \frac{L}{\vartheta} * r \quad (3.11)$$

denklemleri ile partikül hızını ölçmede bilinen parametrelere göre bir denklem (3.11) elde edilir. Bu denklem çarpma hızının belirlenmesi amacıyla düzenlendiği zaman;

$$\vartheta = \left[\frac{2 * \pi * n}{60} \right] * \frac{L}{S} * r \quad (3.12)$$

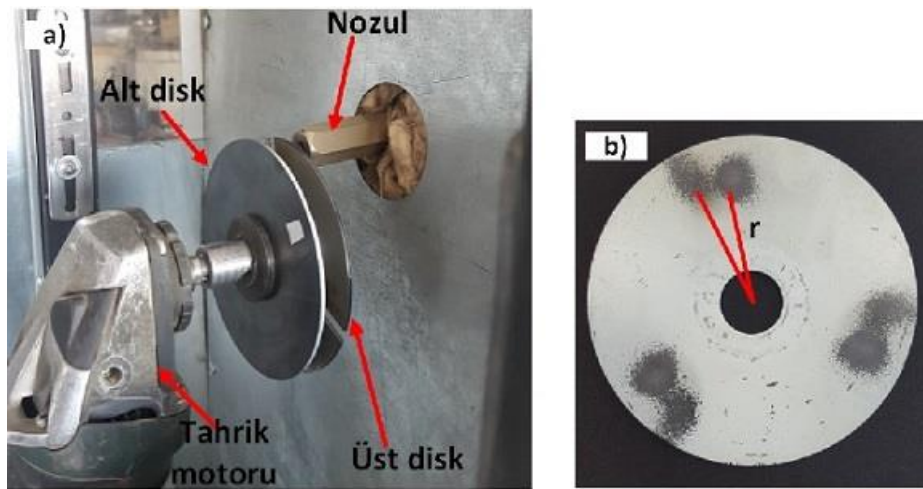
aşındırıcı partikül hızını ifade eden denklem ortaya çıkar.

Teorik hesaplamaları kapsayan bu tanımlamalardan sonra (3.11) denkleminde kullanılan motor devir sayısı (n) değerini bulmak için ilk önce üretilen disk bir dönme motoruna bağlanmış olup takometre yardımı ile motorun devir sayısı belirlenmiştir.

Şekil 3.32’de motora bağlı olarak dönen disk ve takometreden okunan değer dakikadaki dönme devir değeri (rpm) gösterilmiştir. Devir sayısı belirlendikten sonra bir motor miline bağlanan diskler YSKPE aşınma test cihazına Şekil 3.33 (a)’da görüldüğü gibi monte edilmiştir. Motor mili tahrik edilerek YSKPE test cihazı nozulundan çıkan aşındırıcı partiküllerin disklere çarpması sağlanarak aşınma izleri Şekil 3.33 (b)’de gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Motor miline bağlı diskin dönme hızının takometre ile ölçülmesi.



Şekil 3.33. Disklerin konumlandırılması ve izlerin oluşumu; a) Çift diskin motora bağlanması, b) Alt diskte aşınma sonrası oluşan izler.

(3.12) denkleminde aşındırıcı partikül hızını belirleyebilmek amacıyla denklemin bilinmeyen bütün değerlerin ölçülebilir ve bulunabilir olmasına bağlı olarak aşındırıcı partikül hız ölçüm deneylerine geçilmiştir. Partikül hızını ölçmek için ilk önce numune besleme ünitesine aşındırıcı partiküller konulmuş ve YSKPE test cihazında hava akış sıcaklığı 600°C, hava debisi 6 m³/h ve hava basıncı 1 bar ayarlanarak ölçüm gerçekleştirilmiştir. Yapılan ölçümler sonrasında alt diskte üç noktada oluşan aşınma izlerinin arasındaki mesafe ve yarıçapları ölçülmüş ve (3.12) denklemi yardımı ile aşındırıcı partikülün çarpma hızı bulunmuştur. Çarpma hızının bulunmasında partikül hızlarının maksimum ve minimum hızlarının belirlenmesinde S mesafesinin ölçülmesi en büyük belirsizliği sağlamaktadır. İzler arasındaki mesafe 5-6 mm arasında olduğu için belirsizlik oranı %3 ile %7 arasında değişmektedir. İzler arasındaki bölgenin genişliği, partikül büyüklüğü dağılımına ve partikül çarpma hızına bağlıdır. Partikül büyüklüğü ne kadar fazla olursa, partikül o kadar hızlı ve erozyon izi kenarı o kadar keskin olur. Aynı zamanda partikül hızının artması S mesafesinin küçülmesine sebep olur bu durum da partikül hızının belirlenmesi üzerindeki etkisini gösterir. Bütün bu durumlar değerlendirildiğinde partikül hızının ölçülmesinde literatüre de bakıldığı zaman yaklaşık %5 - 6 arasında bir belirsizlik olması kabul edilebilir sınırı ifade ettiği sonucuna varılmıştır (Cernuschi ve ark., 2017).

Çizelge 3.4'de çift disk metodu ile belirlenen aşındırıcı partikül hız ölçümünde kullanılan parametrelerin değerleri verilmiştir. Ölçülen hız değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları alındığında %6,7 hata payı olduğu sonucuna varılarak literatürle uyumluluk sağlanmıştır.

Çizelge 3.4. Çift disk metodu deneyi sonrası ölçülen değerler.

Deney No	S mesafesi (mm)	L mesafesi (mm)	r çap (mm)	Hız (m/s)
1	5,8	12	44	90,8
2	5,4	12	43	95,4
3	5,3	12	46	103,9
Ortalama hız değeri (m/s)				96,7
Standart sapma				6,7

3.6. Deney Numunesi Hazırlama

3.6.1. Altlık Malzeme

Gaz türbin motorlarında, türbin kanatlarında genel olarak nikel ve demir-nikel esaslı süper alaşımlar tercih edilmektedir. Bunun yanında yanma odalarında Ni esaslı ve Co esaslı süper alaşımlar ve türbin nozüllerinde ise Co esaslı alaşımlar kullanılmaktadır. Alaşımların kimyasal kompozisyonu ağırlıklı olarak Ni, Co içerikli olup alaşımın korozyon ve oksidasyon direnci Cr, Al elementlerinin ilavesi ile artırılmıştır. Çalışma koşullarında sırasıyla Cr_2O_3 ve Al_2O_3 bileşikleri oluşturmaktadır ki bu bileşikler korozyona ve oksidasyona karşı direnç sağlamaktadır. Nikel esaslı süper alaşımlardan üretilen parçalar türbin motoru ağırlığının yaklaşık %50'sini oluşturmaktadır (Altuncu, 2011).

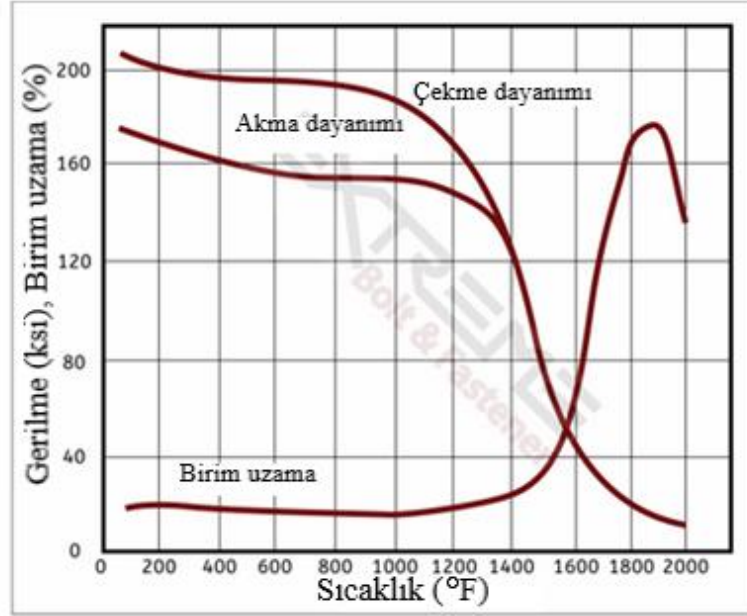
Bu tez kapsamında altlık malzeme olarak seçilen Inconel 718 veya diğer yaygın olarak kullanılan adıyla Alloy 718 malzeme nikel alaşım malzemeleri arasında termal etkinliğin karşılanması amacıyla yaygın olarak kullanılan malzemelerdendir. DIN standardına göre 2.4668 numarasına denk gelen bu malzeme aynı zamanda UNS N07718 standardını da ifade etmektedir. Kimyasal açılımı NiCr19Fe19Nb5Mo3 olan bu nikel alaşım malzeme, korozyona karşı ekstrem derecede yüksek dayanıma sahiptir.

Yaşlandırılarak sertleştirilebilen bu kalite malzeme, çok değişik sıcaklıklarda mekanik özelliklerini koruyabilmektedir. Inconel 718 malzeme kopma direnci, kırılma direnci çok yüksek bir malzeme olup Çizelge 3.5'de Inconel 718'in sıcaklık ile mukavemet değerlerindeki değişim sayısal olarak verilmiştir.

Çizelge 3.5. Inconel 718'in sıcaklık ile mukavemet değerlerindeki değişme (Metals, 2019).

Sıcaklık (°C)	Çekme Dayanımı (MPa)	Akma Dayanımı (MPa)	Uzama (%)
21	1450	1206	22
200	1365	1123	20
425	1316	1075	19
540	1275	1068	18
650	1158	1027	19
760	765	758	27

Şekil 3.34’de ise sıcaklık-gerilme-birim uzama farklılığı grafiksel olarak verilmiştir. Grafiğe bakıldığında zaman yüksek sıcaklıklarda bile Inconel 718’in gerilme direncini koruyabildiği görülmektedir. Aynı zamanda yüksek sıcaklıklara da dayanabilen bu malzeme, yaşlandırılarak çökertildikten sonra daha da sert bir yapıya sahip hale gelmektedir (Jena ve Chaturvedi, 1984).



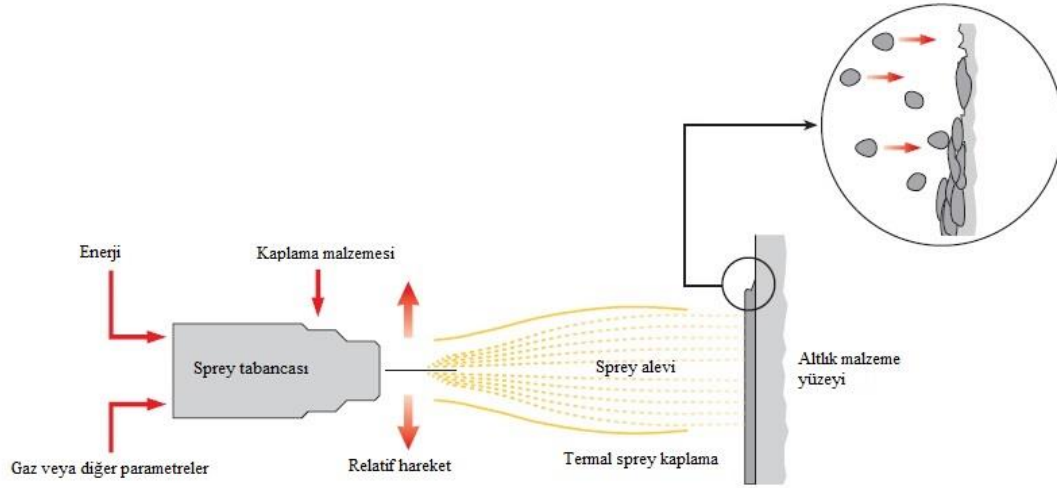
Şekil 3.34. Inconel 718'in sıcaklık ile mukavemet değerlerinin değişim grafiği (Metals, 2019).

Bu tanımlanan temel endüstriyel kullanım yeteneklerine bağlı olarak Inconel 718'in en belirgin özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

- Yüksek sıcaklıkta mükemmel korozyon direnci,
- Yüksek sürünme, kopma dayanımı ve süneklik (700°) kabiliyeti,
- Yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemet ve tokluk özelliği gösterir.

3.6.2. Termal Sprey Kaplama Uygulamaları

Termal sprej kaplama, metalik veya metalik olmayan kaplama malzemesinin (toz, tel veya çubuk formunda) erimiş veya yarı erimiş bir duruma ısıtıldığı ve daha sonra proses gazı veya atomizasyon jetleri ile hedef malzeme yüzeyine püskürtüldüğü yüzey mühendisliği işlemlerinden biridir. Bu parçacıklar yüzeye yapışır ve bir kaplama oluşturmak için yüzeyde birikir. Kaplamanın üzerinde biriktirildiği hedef malzeme veya altlık malzeme erimemiş halde kalır. Şekil 3.35’de termal sprej kaplama yönteminin şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.35. Termal sprey kaplama prensibi (Metco, 2016).

Termal sprey kaplama yönteminin uygulanması 1900'lü yılların başlarını bulur. Bu yöntem ilk olarak M.U.Schoop (Zurich, Switzerland) tarafından erimiş ve toz metaller kullanılarak "Metalizasyon" işlemi ile anılmıştır (Davis, 2004). 1908 yılında Schoop elektrik ark sprey yönteminin patentini almıştır. 1939'da Reinecke ilk plazma püskürtme işlemini başlatmıştır. Termal sprey kaplama teknolojisindeki gelişmeler, 1950'lerden sonra çok daha yüksek bir hızda gerçekleşmiştir. Günümüzde termal sprey tekniğinin farklı varyasyonları mevcut olup bunlar; Atmosferik Plazma Sprey (APS), Yüksek Hızda Oksi Yakıt Püskürtme (HVOF), Vakumlu Plazma Püskürtme (VPS) ve Soğuk Gaz-Dinamik Sprey (CGDS) (Von Niessen ve Gindrat, 2011) yöntemleri olarak sınıflandırılır. Çizelge 3.6'da APS, HVOF, VPS ve CGDS termal sprey kaplama yöntemlerinin partikül hızı ve işlem sıcaklıkları karşılaştırması verilmiştir.

Çizelge 3.6. Termal sprey kaplama yöntemlerinin partikül hızı ve işlem sıcaklık karşılaştırma değerleri (Kutz, 2018).

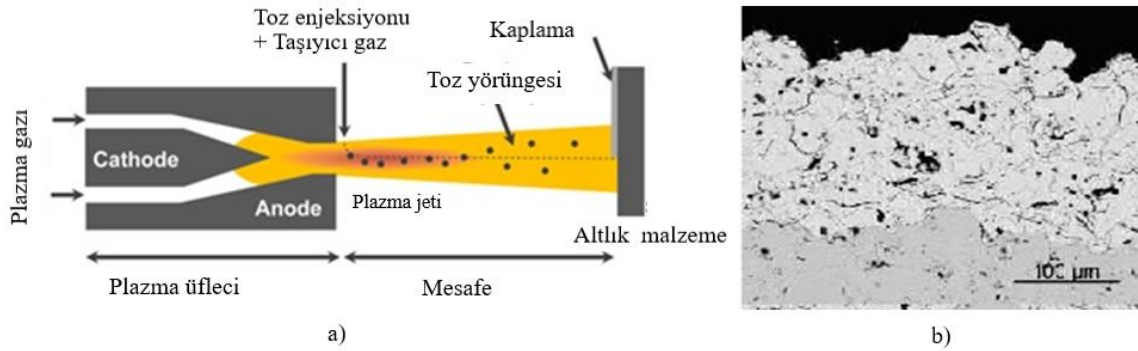
Metot	Partikül hızı (m/s)	İşlem sıcaklığı (°C)
APS	200 – 300	15000
HVOF	700 – 800	2500 – 3000
VPS	200 – 300	15000
CGDS	800 – 900	800 – 900

Termal sprej kaplamanın en büyük avantajı, önemli bir ısı girişi olmadan çok çeşitli kaplama malzemelerini, altlık malzeme yüzeyinde biriktirmek için kullanılabilmesidir. Teoride, dağılmadan eriyen herhangi bir kaplama malzemesi, altlık malzeme yüzeyinde fazla çarpılmaya neden olmadan sprej malzemesi olarak kullanılabilir. Termal sprej yönteminin en büyük dezavantajı, sprej tabancası ile altlık malzeme yüzeyine yüksek hızda püskürtülen kaplama malzemesinin tabancadan çıkışı sonrası liner bir hat boyunca ilerleyip yüzeye çarpmasından kaynaklanan tam homojen dağılımı gösterememesidir. Bu dezavantajda yeni geliştirilen Plazma Sprej Fiziksel Buhar Biriktirme (PS PVD) yöntemleri ile aşılmaktadır.

3.5.2.1. Atmosferik Plazma Sprej (APS) Kaplama Yönteminin Uygulanışı

Atmosferik plazma sprej (APS) işleminde, anot ve katot arasında meydana gelen bir elektrik arkı, oluşan proses gazlarını (argon, hidrojen, azot veya helyum) plazma durumuna iyonize eder (Şekil 3.36 (a)). Yöntemde kullanılacak seramik toz partikülleri, plazma jetine enjekte edilir, bu bölümde ısıtılır ve alt tabakaya doğru hızlandırılır. Böylece erimiş veya kısmen erimiş partiküller altlık malzemenin yüzeyine yüksek hızda çarparlar. Bu gerçekleşen olay partiküllerin deformasyonuna yol açar ve splat adında (1-5 µm kalınlık ile 200-400 µm çap) bir yapıda yüzeye yayılırlar (Vuoristo, 2014). Sıcak parçacıklardan gelen ısı, soğuk olan altlık malzemesine aktarılır ve splat'lar hızla katılır ve küçülür. Altlık malzeme yüzeyinde veya daha önceki tabaka yüzeyinde gerilmeleri engelleme işi splat'lar arasında çekme gerilmelerinin oluşması ve bununda mikro çatlaklara yol açması sonucunda kısmi bir yüzey pürüzlülük formu sağlanır (Kuroda ve Clyne, 1991). Splatlar arasında çekme gerilmesinden dolayı oluşan çatlaklar ve daha büyük küresel tozların etkisiyle ortaya çıkan gözenekler Şekil 3.36 (b)'de gösterilmiştir. Bu türden gözeneklerin kaplama mikro yapısında olması termal iletkenliği azaltır ve seramik üst kaplamanın daha iyi termal izolasyon ve termo-mekanik özellik göstermesini sağlar. Ayrıca mikro çatlaklar, bireysel splatların sınırları boyunca kısmi olarak kaymasına izin verir ve bu işlem oda sıcaklığında bile bir çeşit birikmiş gerilmenin serbest kalmasını sağlar (Ahrens ve ark., 2004). Bu nedenle kaplama yapısındaki istenilen gözenekliliği sağlamak amacıyla plazma sprej parametrelerinin (plazmanın gücü, plazma gaz bileşimi, altlık malzeme ile torç arasındaki mesafe, soğuma, hız vb.) iyi seçilmesi gerekmektedir. Tez çalışması kapsamında elde edilen numunelerin oluşturulmasında APS

yöntemi kullanılmış olup standart üretimin sağlanabilmesi amacıyla TEI firmasından deney numuneleri temin edilmiştir.



Şekil 3.36. Atmosferik plazma sprej yöntemi; a) Toz enjeksiyonlu uygulama şeması (Heberlein ve ark., 2014), b) Bu yöntemin TBK örneğinin mikro çatlaklı mikro yapısı (Lee, 2006).

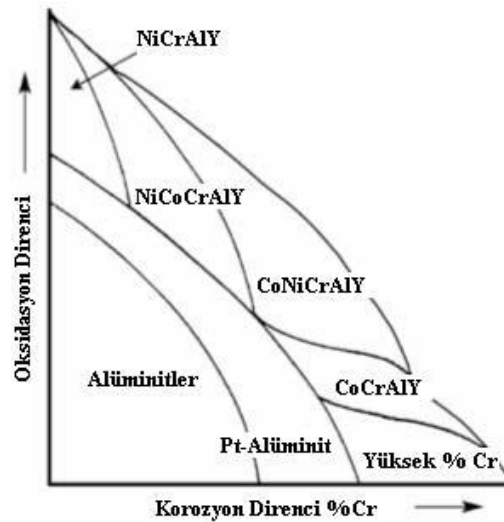
3.6.3. Metalik Bağ Kaplama Uygulaması

Seramik tabaka ile altlık malzeme arasında olan metalik bağ kaplama TBK sistemi içinde önemli bir role sahiptir. Birincil fonksiyonları, altlık malzemeyi oksidasyondan korumak ve metalik altlık malzeme ile seramik üst kaplamanın birbirine yapışmasını sağlamaktır. Ayrıca sünek malzeme özelliği göstererek seramik üst kaplama ve altlık malzeme termal genişleme katsayı farklılığından kaynaklanan uyumsuzluğu gidermek diğer önemli bir görevidir. Metalik bağ kaplama ve seramik üst tabaka arasında çalışma şartları sırasında oluşan termal olarak gelişen oksit tabaka (TGO) TBK'ların dağılmasını önlemeden sorumlu önemli bir tabakadır.

Günümüzde bağ kaplamada kullanılan alaşımlar MCrAlY (M=Ni, Co) simgesi ile ifade edilir ve bu alaşımlar, APS (atmosferik plazma sprej), EB-PVD (Elektron ışını demeti fiziksel buhar biriktirme) veya HVOF (yüksek hızda oksijen yakıt püskürtme) yöntemleri ile yüzeye kaplanabilir (Chen ve ark., 2008). Ayrıca bağ kaplamada Platin (Pt) veya Nikel (Ni) ile değiştirilmiş alüminalar, difüzyon yöntemi ile kaplanabilir (Schulz ve ark., 2003).

MCrAlY esaslı bağ kaplama tabakası seramik tabakanın süper alaşım altlık üzerine yapışmasını sağlamakta ve yüksek sıcaklıklarda farklı genişleme davranışlarından kaynaklı gerilmeleri azaltmaktadır. Yüksek sıcaklıklarda çalışma koşullarında bağ kaplamalar, seramik tabakanın süper alaşımdan oluşan altlık malzemeden ayrılmasına ve dökülmesine karşı önemli rol oynamaktadır. Sonuç olarak oksidasyon ve korozyon direncini artırmak amacıyla altlık yüzeyinde 75-200 µm kalınlık aralığında metalik

(MCrAlY, M: Ni ve/veya Co) esaslı bir bağ kaplama tabakası kullanılmaktadır. Bu bağ kaplamanın kimyasal kompozisyonda kullanılan elementlerin görevi; oksidasyon (Ni, Al), korozyon (Co) ve yapışma özelliklerinin (Y) geliştirilmesidir. Yüksek sıcaklıklarda çalışma ortam koşullarına bağlı olarak farklı kompozisyonlarda MCrAlY esaslı bağ tabakalar geliştirilmiştir (Şekil 3.37).



Şekil 3.37. Oksidasyon ve korozyon direnci için MCrAlY esaslı bağ kaplamaların seçimi (Novak, 1994).

TBK içinde çalışma koşulları esansında TGO tabakasının oluşması kaçınılmaz olduğu için metalik bağ kaplamada kullanılacak elementlerin seçiminde alüminyumca zengin bir bileşim, TGO tabakasında alümina ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) formu oluşturması için tercih edilir. Böylece bağ kaplamaya gelen oksijen difüzyonu, alüminyum ile alümina formu oluşturmasıyla seramik üst tabaka ve bağ kaplama ara yüzeyindeki TGO tabakası ile kontrol edilmiş olur. TGO tabakasında alümina istenilmesinin bir sebebi de yüksek sıcaklıklarda en yavaş büyüyen oksit (Clarke ve ark., 2012) olup çok düşük oksijen yayılımı nedeniyle mükemmel bir oksijen difüzyon bariyeri oluşturmaktadır (Sims ve ark., 1987), YSZ üst kaplama malzemesiyle uyumlu faz sağlamakta (Meier ve Pettit, 1992) ve mükemmel mekanik özelliğe sahip yapışkan bir tabaka meydana getirmektedir (Padture ve ark., 2002). Bu özellikler; TBK'nın yüksek sıcaklıklarda seramik üst tabaka ile metalik bağ kaplama arasında termal genişleme uyumsuzluğundan dolayı doğabilecek iç gerilmeleri azaltmaya yardımcı olan önemli özelliklerdir.

Metalik bağ kaplamadaki MCrAlY'deki yüksek Al ve Cr içeriği, oksidasyon ve korozyon direnci açısından faydalı fakat kaplama yorulma direnci açısından da zararlı olduğu bulunmuştur (Birks ve ark., 2006). Diğer taraftan, uzun çalışma süreleri

sonucunda dışa doğru difüzyona bağlı olarak Al tükenmesi, koruyucu olmayan Ni ve Co içeren oksitlerin oluşumuna yol açar bu da yapıda çatlakların başlaması ve yayılması için bazı bölgelerin oluşmasına sebep olur (Shillington ve Clarke, 1999). MCrAlY içinde itriyum (Y) elementinin rolü çok yönlüdür. Az miktarda (ağırlıkça %0,1-1) itriyum elementi alüminyumun yapışkanlığını geliştirdiği, yüksek miktarda itriyum elementinin ise alüminyum ile $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG: itriyum alüminyum garnet) veya $YAlO_3$ (YAP: itriyum alüminyum perovskit) gibi alüminyum tabakada karışık Y-Al oksit oluşturduğu görülmüştür (Gudmundsson ve Jacobson, 1989). Bazı araştırma sonuçları bu karışık Y-Al oksitlerin alümina ölçeğinde yapışma gücünü artırdığını desteklemiş (Song, 2012) olmakla birlikte diğer araştırmalarda ise alüminadan farklı termal genleşme katsayısı nedeniyle yapışma için zararlı olduklarını belirtmişlerdir (Nijdam ve Sloof, 2007). Alümina ölçeğinde yapışmasını etkilemenin yanı sıra, yüksek konsantrasyonlarda Y'nin alümina ölçeğinin büyüme oranını da artırdığı belirlenmiştir (Newcomb ve ark., 1996).

MCrAlY bağ kaplamalarında farklı amaçlar için küçük miktarlarda eklenen renyum (Re), tantal (Ta) ve sözde reaktif elementler (örn., hafniyum (Hf), seryum (Ce), zirkonyum (Zr)) gibi bir dizi başka elementlerde vardır. Örneğin, bağ katmanı ve TGO'nun ara yüzeyindeki kükürt'ün (S) ayrışması zararlı olarak bilinir ve bu etkiyi hafifletmek için tepkime katmanı bileşimine reaktif elementler (Zr, Y) eklenir (Smialek ve ark., 1994). Çizelge 3.7'de bağ kaplamaya katılan farklı elementlerin kaplama üzerinde oluşturdukları etkiler verilmiştir.

Çizelge 3.7. Bağ kaplamaya katılan farklı elementlerin etkileri (Bakan, 2015).

Elementler	Metalik bağ kaplamaya etki eden özellikleri
Re	Termo-mekanik yorulma direnci
Ta	Akma dayanımı ve sürünme direnci
Ce, Hf	Oksidasyon direnci, meta stabil alümina büyümesini engelleme
Co	Bağ kaplamanın termal genleşme katsayısını ($1/^\circ\text{C}$) artırma

Yüzey pürüzlülüğü APS ile üretilmiş TBK'larda önemli bir etmendir. Yüzey pürüzlülüğü tabakalar arası mekanik kenetlenmeyi etkileyen bir özelliktir. Bu nedenle, optimize edilmiş bir bileşim ve bağ kaplamanın pürüzlülüğü TBK'nın çalışma süresini iyileştirmek için ele alınan iki önemli faktördür. Bağ kaplama pürüzlülüğü TBK'nın

dayanımı açısından da önemli bir özelliktir. Bağ kaplama pürüzlülüğünün koruyucu oksit tabakasının morfolojisini de etkilediği bulunmuştur (Gil ve ark., 2006).

Bu tez çalışması kapsamında da TEI firması bünyesinde üretim gerçekleştiren ekipmanlar vasıtasıyla APS yöntemi ile üretilen bağ kaplamalar yukarıdaki bilgiler ışığında Oerlikon Metco firmasına ait Amdry 962 kodlu NiCrAlY ve Amdry 365 kodlu NiCoCrAlY tozları kullanılarak üretilmesi sağlanmıştır.

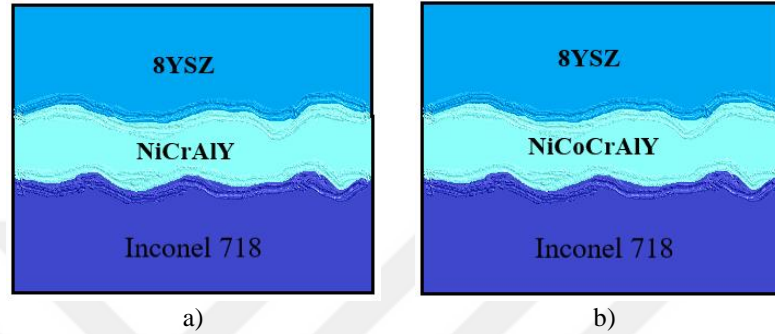
3.6.4. Seramik Üst Kaplama Uygulaması

Seramik üst kaplamanın en önemli özelliği metalik altlık malzeme ve bağ kaplama için termal izolasyon sağlamasıdır. Bununla birlikte, seramik üst kaplamanın yerine getirmesi gereken bir takım başka özellikler de vardır. Günümüzde ağırlıkça %6-8 oranında olan itriyum oksit ile stabilize olmuş zirkona (YSZ), TBK üst kaplaması yaygın olarak kullanılmaya devam etmektedir. YSZ, uzun süreli yüksek sıcaklığa maruz kalmasında sınırlı bir sıcaklık kapasitesine sahip olmasına rağmen istenen özelliklerin mükemmel bir kombinasyonu olduğu için son on yıl içerisinde diğer malzemelerle ikame edilmesi mümkün olmamıştır.

Seramik üst kaplama malzemesinde; yüksek ergime noktası, düşük termal iletkenlik ve yüksek termal genleşme katsayısı istenilen en önemli özelliklerdir. YSZ yüksek ergime noktasına sahiptir ($\sim 2700^{\circ}\text{C}$) ve bütün seramikler içerisinde yüksek sıcaklıkta düşük termal iletkenlik gösteren bileşiklerden biridir. Hasselman ve ark. (1987) tarafından yapılan bir çalışmada %5,3 ağırlığa sahip bir YSZ'nin 600°C sıcaklıkta termal iletkenliği $2,6 \text{ W/mK}$ olarak belirlenmiştir. Pawlowski ve ark. (1985) ise yaptıkları çalışmada ağırlıkça %7,25 ve farklı mikro yapı ve gözeneklilikte olan YSZ'nin termal iletkenliğini $0,7-1,4 \text{ W/mK}$ olarak raporlamışlardır.

YSZ ayrıca süper alaşımlara yakın bir termal genleşme katsayısına sahiptir. YSZ'nin termal genleşme katsayısı $11 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ iken yoğun olarak altlık malzemesi olarak kullanılan süper alaşımların termal genleşme katsayısı ise $14 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ 'dir (Cao ve ark., 2004). Bu durum yüksek sıcaklıklarda termal genleşmeden kaynaklanan gerilmelerin az olmasına sebep olmaktadır. TBK'larda gözenekliliğin artması ısı yalıtımına olumlu katkı sağladığı için gözenekliliğin ve çatlakların (ara katman çatlakları, segmentasyon çatlakları, vs.) kaplama prosesi sırasında yapı içerisinde belirli bir sınır değerinde olması özellikle istenilir.

Ağırlıkça %6–8 arasında YSZ kullanımı günümüzde rakipsiz olduğu için bu aralıkta kullanılan 8YSZ TBK'ların YSKPE aşınma uygulamalarında da önemi artmasından dolayı yapılan bu tez çalışması kapsamında YSKPE deneylerinde seramik üst kaplamanın APS yöntemiyle 8YSZ ile kaplanmasına karar verilmiştir. Şekil 3.38'de de tez kapsamında APS yöntemi ile bağ ve seramik kaplamalara ait TBK deney numunelerinin şematik gösterimi verilmiştir.



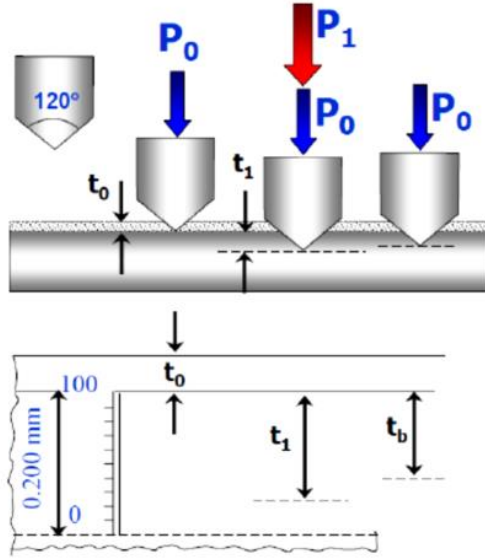
Şekil 3.38. APS ile kaplanan TBK deney numuneleri; a) NiCrAlY + 8YSZ, b) NiCoCrAlY + 8YSZ.

3.7. Deney Numuneleri Mekanik Özellikleri

3.7.1. Sertlik Ölçümleri

Deney numunelerinde kaplamalı ve kaplamasız numuneler için sertlik ölçümü Rockwell sertlik ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Rockwell sertlik testi uygulama kolaylığı, pratik olması ve daha ucuz olması gibi nedenlerle diğer optik ölçüm gerektiren (Brinell, Vickers) sertlik ölçme yöntemlerine göre daha yaygın olarak kullanılan bir sertlik ölçme metodudur. Bu test yönteminde malzemelerin çekme dayanımı, aşınma direnci, süneklik ve diğer fiziksel özellikleri ile ilgili faydalı bilgiler belirlenebilmektedir.

Rockwell testi, 120° elmas koni uç veya çeşitli çaptaki bilye uçların yaptığı penetrasyon derinliğinin ölçülmesi metoduna dayanır. Test edilecek malzemeye uygun olarak uç ve yük seçildikten sonra malzemeye 98 N'luk bir ön yük uygulanır. (Bu Rockwell Superficial metodunda 29,4 N'dir). Bunun amacı malzemedeki oksit, tufal vb. farklılıkların elimine edilerek teste başlanmasıdır. Batıcı uç, deney yüzeyi ile dik temas eder duruma getirilir ve daha sonra şoka, titreşim ve salınma yol açmadan, ön yük kuvveti P_0 uygulanır (Şekil 3.39).



Şekil 3.39. Rockwell sertlik ölçümünün şematik gösterimi.

Ön yük uygulandıktan sonra Rockwell saati otomatik olarak sıfırlanır. Daha sonra toplam yük uygulanır (1-8 sn arasında). Toplam yük stabil hale geldikten sonra 4 ± 2 sn arasında beklenir. Bekleme işleminden sonra toplam yük kaldırılır ve ön yük baskısı üzerinde iken Rockwell komparatöründen veya dijital ekrandan sertlik değeri direkt olarak okunur. Elde edilen sertlik ölçümleri HR 15N ölçüm metoduna göre ve ASTM E18-12 standardına göre yapılmıştır (Standard, 2012). Şekil 3.40'da Rockwell HR 15N sertlik ölçüm cihazına ait görsel verilmiştir.



Şekil 3.40. Rockwell HR 15N sertlik ölçüm cihazı.

Rockwell testi ölçümünde her bir deney numunesi grubu içinden 3 numune seçilerek, bu numuneler üzerinden 3 ölçüm alınmıştır. Dolayısıyla bir deney grubu için toplamda 9 ölçüm yapılmıştır. Yapılan bu ölçümlere göre ortalama sertlik değerleri ve standart sapmaları Çizelge 3.8’de verilmiştir. Ortalama sertlik değerleri incelendiği zaman kobalt (Co) esaslı bağ kaplamaların sertlik değerinin düşük olduğu belirlenmiştir. Ayrıca altlık malzemenin (kaplamasız) sertlik değeri, bağ ve seramik kaplamalı numunelerden fazla çıkmıştır.

Çizelge 3.8. Deney grupları ortalama HR 15N sertlik değerleri ve standart sapmaları.

	NiCrAlY	NiCoCrAlY	NiCrAlY + 8YSZ	NiCoCrAlY + 8YSZ	Kaplamasız
Ortalama sertlik (HR 15N)	68,2	65,8	69,2	73,8	79
Standart sapma	4,5	3,4	5,9	3,7	1,7

Ortalama sertlik ve standart sapma değerleri hesaplanan numune grupları için birbirleri arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark olup olmadığını tespit etmek amacıyla numune grupları Student-t testine tabi tutulmuştur. Bu teste göre ilk başta bütün deney grupları kaplama yapılmamış numune grubu ile kıyaslanmıştır. Numune gruplarının birbirlerine göre yapılan Student-t testi sonucunda oluşan olasılık değerleri (p) Çizelge 3.9’da verilmiştir.

Çizelge 3.9. Sertlik için Student-t testi uygulamasına ait p değerleri.

	NiCrAlY	NiCoCrAlY	NiCrAlY + 8YSZ	NiCoCrAlY + 8YSZ
Kaplamasız	0,0001	0,0000	0,0009	0,0100
NiCrAlY	-	0,2561	0,7109	0,0214
NiCoCrAlY	-	-	0,1717	0,0007
NiCrAlY + 8YSZ	-	-	-	0,0801

Çizelgede verilen değerler incelendiğinde ilk satırda kaplamasız numune ile karşılaştırılan numunelere karşılık gelen p değerlerini ifade etmektedir. Burada α (0,05) değerinden küçük olan p değerlerinin iki değişken grup arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir farklılık oluşturduğunu göstermektedir. Dolayısıyla APS yöntemi ile yapılan kaplamaların, kaplamasız numune ile istatistiksel açıdan karşılaştırıldığında anlamlı bir fark oluşturduğu sonucuna varılmıştır ($p < 0,05$). Bağ kaplama ve seramik kaplama uygulamalarının sonuçların anlamlılığını arttırmak açısından kendi iç gruplarında değerlendirilmesinin daha anlamlı sonuçlar vereceği bilgisiyyle sadece bağ kaplama yapılan grupların istatistiksel incelemesinde aynı yöntem ile kaplama yapılan fakat farklı element içeriğine sahip numuneler arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark olmadığı belirlenmiştir. Seramik kaplama uygulanan numunelerin ise farklı element içeriğinden dolayı bağ kaplamada olduğu gibi istatistiksel açıdan anlamlı bir fark oluşturmadığı sonucu yinelenmiştir.

3.7.2. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

Deney numune gruplarının yüzey pürüzlülüğü Mitutoyo Sufitest 402 test cihazı ile ölçülmüştür. Numuneler, pürüzlülük taraması yapılmadan önce ultrasonik etanol banyosunda 10 dakika kalacak şekilde yıkanmış ve kurumaya tabi tutulmuştur. Her bir deney numune grubu için 3 numunedan R_a pürüzlülük değeri ölçümü yapılarak ortalama pürüzlülük değeri belirlenmiştir. Şekil 3.41’de yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile yapılan bir ölçümün görüntüsü verilmektedir.



Şekil 3.41. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm uygulaması.

Çizelge 3.10’da ise yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerlerinin ortalama ve standart sapma değerleri elde edilmiştir. Pürüzlülük değerlerine bakıldığında en az pürüzlülüğe

kaplamasız numunelerin sahip olduğu görülmüştür. En fazla pürüzlülük değerini APS yöntemi ile sadece bağ kaplama uygulanmış numuneler göstermiştir. Seramik kaplamaların pürüzlülük değerleri kaplamasız numuneye göre fazla olmalarına rağmen sadece bağ kaplanmış numunelere göre genel olarak düşük çıkmıştır. Bağ kaplamaların yüzey pürüzlülüğü değerlerinin fazla çıkması seramik üst kaplama ile mekanik kenetlenmeyi artırdığı için beklenen bir sonucu temsil etmektedir.

Çizelge 3.10. Yüzey pürüzlülüğü ölçüm değerleri.

	NiCrAlY	NiCoCrAlY	NiCrAlY + 8YSZ	NiCoCrAlY + 8YSZ	Kaplamasız
Ortalama pürüzlülük değeri (Ra)	17,9	12,1	10,5	10,3	0,5
Standart sapma	0,6	0,6	0,8	1,0	0,0

Yüzey pürüzlülüğü ortalama sertlik ve standart sapma değerleri hesaplanan numune gruplarının birbirleri arasında istatistiksel açıdan anlamlı bir fark oluşturup oluşturmadığını tespit etmek amacı ile Student-t testi uygulanmıştır. Bu teste göre ilk olarak bütün deney grupları kaplama yapılmamış numune grubu ile kıyaslanmıştır. Numune gruplarının birbirlerine göre yapılan testler sonucunda oluşan olasılık değerleri Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Yüzey pürüzlülüğü için Student-t testi uygulamasına ait p değerleri.

	NiCrAlY	NiCoCrAlY	NiCrAlY + 8YSZ	NiCoCrAlY + 8YSZ
Kaplamasız	0,0003	0,0009	0,0019	0,0037
NiCrAlY	-	0,0002	0,0001	0,0015
NiCoCrAlY	-	-	0,0524	0,0841
NiCrAlY + 8YSZ	-	-	-	0,7696

Bu testlere ait yapılan değerlendirmede kaplamasız numune ile yapılan bütün grupların olasılık değeri $p < 0,05$ elde edilmiştir. Bu sonuç göstermiştir ki istatistiksel açıdan bütün numune gruplarının kaplamasız numune grubu ile anlamlı bir fark oluşturduğu şeklinde yorumlanmıştır. Sadece bağ kaplama yapılan grupların birbirleri arasında yapılan kıyaslamada da istatistiksel açıdan anlamlı bir fark ortaya çıkmıştır. Seramik üst kaplama yapılan numunelerin diğer numune grupları ile kıyaslanmasından da anlamlı bir fark görülmüş olup seramik üst kaplama yapılan farklı bağ kaplamasına sahip numune gruplarının ise birbirleri arasında yüzey pürüzlülüğü açısından anlamlı bir fark gözlemlenmemiştir.

3.7.3. Gözeneklilik Ölçümleri

Kaplamaların gözeneklilik ölçümlerinde “Cıva Porozimetresi” (Micromeritics) kullanılmıştır. Cıva porozimetresi, gözeneklilik çapını ve dağılımını bulmada piyasada yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntem ile gözenek çapı 1 mm’den nanometre seviyesine kadar olan çaplarda ölçüm yapılabilir. Çalışma prensibi, malzeme yüzeyi ile kimyasal bir tepkimeye girmeyen ve malzeme yüzeyini ıslatmayan cıvanın yüksek yüzey gerilimi özelliğinin kullanılmasına dayanır (Mikijelj ve Varela, 1991). Cıva, kılcal hareket ile kendiliğinden gözeneklere nüfuz etmediğinden, dış basınç uygulanarak gözeneklere zorlanması gerekir. Bu durumda gözeneklerin silindirik şekilde kabul edilmesiyle cıvanın gözeneklere nüfuz edebilmesi için bir basınç (P) uygulanması sağlanmalıdır. Bu basınç, gözenek çapı (r) ile ters orantıdadır ve cıvanın yüzey gerilimi (γ) ile dengelenir. Bu durum Washburn denklemi (Diamond, 2000) ile ifade edilir:

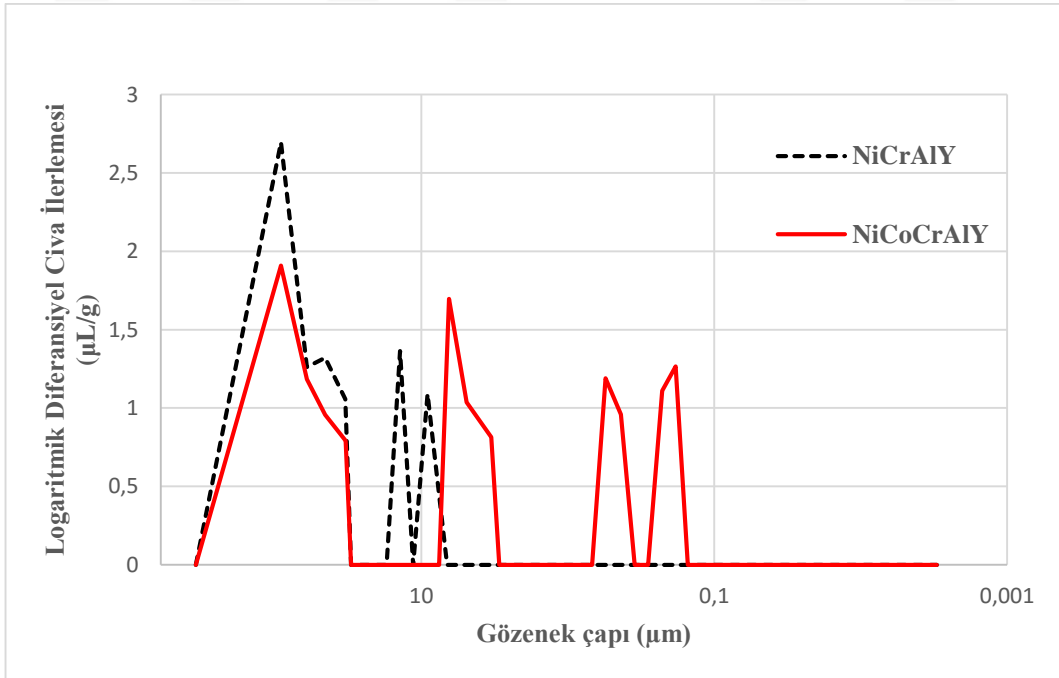
$$P = \frac{-2\gamma\cos\theta}{r} \quad (3.13)$$

Burada θ , malzeme yüzeyi ile cıva arasındaki temas açısını ifade eder. Buradan uygulanan basıncın ve malzeme sabiti olan γ ve θ değerlerinin bilinmesiyle gözenek çapı (r) ölçülebilir. Ayrıca her basınç değişiminde gözenek içine nüfuz eden cıvanın hacmi bilinmesiyle gözenek çapına bağlı gözenek hacmi de bulunabilir. Sonuç olarak bu yöntem ile toplam gözeneklilik oranı ve gözeneklilik çapına bağlı olarak değişen toplam gözenek alanı (m^2/g) grafikleri elde edilebilir. Bu tez kapsamında üretilen kaplamaların gözeneklilik değerleri Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Bağ kaplamaların gözeneklilik değerleri incelendiğinde en fazla gözeneklilik Co esaslı bağ kaplama numunelerinde görülmektedir. Ortalama gözenek çapı küçük olmasına rağmen toplam gözenek alanı fazla olduğu için Co esaslı bağ kaplamada gözenek oranı fazla çıkmıştır. Bağ kaplamaların gözenek çapının – logaritmik diferansiyel cıva ilerlemesi değişimine göre kıyaslama grafiği Şekil 3.42’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde Co esaslı bağ kaplamaların küçük gözenek çaplarında diğer bağ kaplamaya göre yoğun bir gözeneklilik gösterdiği belirlenmiştir.

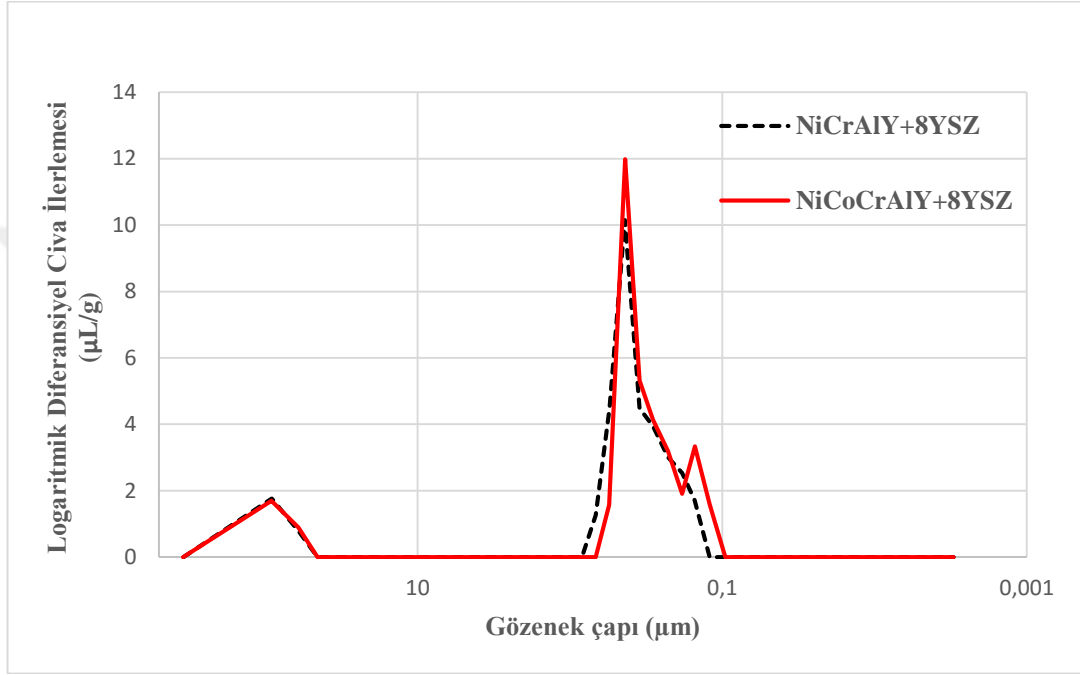
Çizelge 3.12. Bağ ve seramik kaplamaların yüzey gözeneklilik değerleri.

	NiCrAlY	NiCoCrAlY	NiCrAlY + 8YSZ	NiCoCrAlY + 8YSZ
Toplam gözenek alanı (m²/g)	0.002	0.015	0.044	0.052
Ortalama gözenek çapı (µm)	4.7655	0.9642	0.4431	0,4087
Gözeneklilik (%)	2.3367	2.7747	3.4643	3.8314



Şekil 3.42. Bağ kaplamaların gözenek çapına bağlı logaritmik diferansiyel cıva ilerlemesi karşılaştırılması.

Seramik üst kaplamaların gözeneklilik değerleri incelendiğinde aynı seramik tozdan farklı bağ kaplamalar üzerine kaplama yapıldığı halde gözeneklilik değerlerinin iki numune grubunda birbirine çok yakın çıktığı görülmüştür. Seramik üst kaplamaların gözenek çapının – logaritmik diferansiyel cıva ilerlemesi kıyaslama grafiği Şekil 3.43’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde iki numune grubunun da gözenek çapına göre logaritmik diferansiyel cıva ilerlemesi benzer bir seyir göstermektedir.



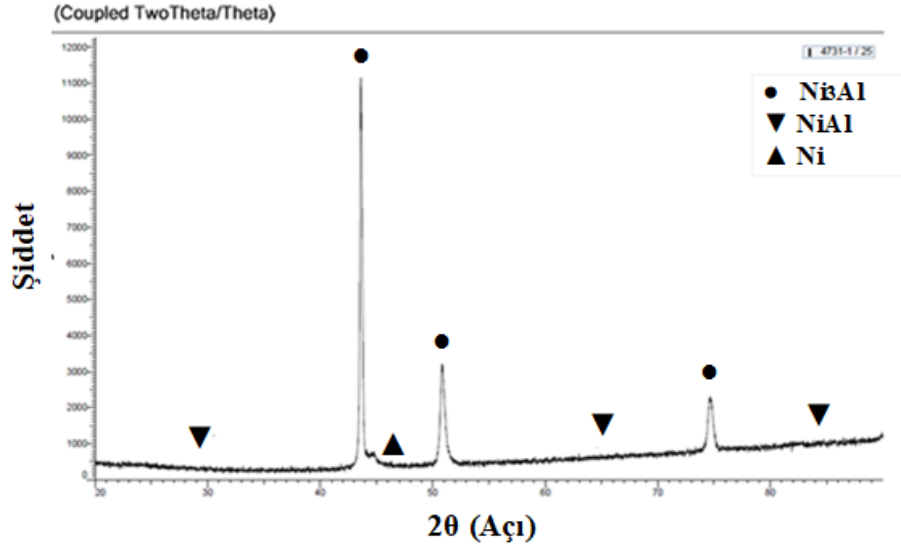
Şekil 3.43. Seramik üst kaplamaların gözenek çapına bağlı logaritmik diferansiyel cıva ilerlemesi karşılaştırılması.

3.7.4. Bağ ve Seramik Üst Kaplamaların X-Işını Difraksiyonu (XRD) Analizleri

X-ışını difraksiyonu, genellikle üç boyutlu bir yapıda olan kristal kafes sistemine sahip malzemedeki atomların düzenli, tekrar eden düzlemleri ile tanımlanan kristal yapılarını incelemek için kullanılan bir yöntemdir. Bu yöntemde X ışınları, 0,02 ile 100 Å aralığında dalga boyuna sahip elektromanyetik radyasyondur. Bu dalga boyları atomların boyutuna benzer olduğundan, X-ışını ve atom etkileşimleri, kristal yapıyı belirlemek için yararlı bilgiler sağlar.

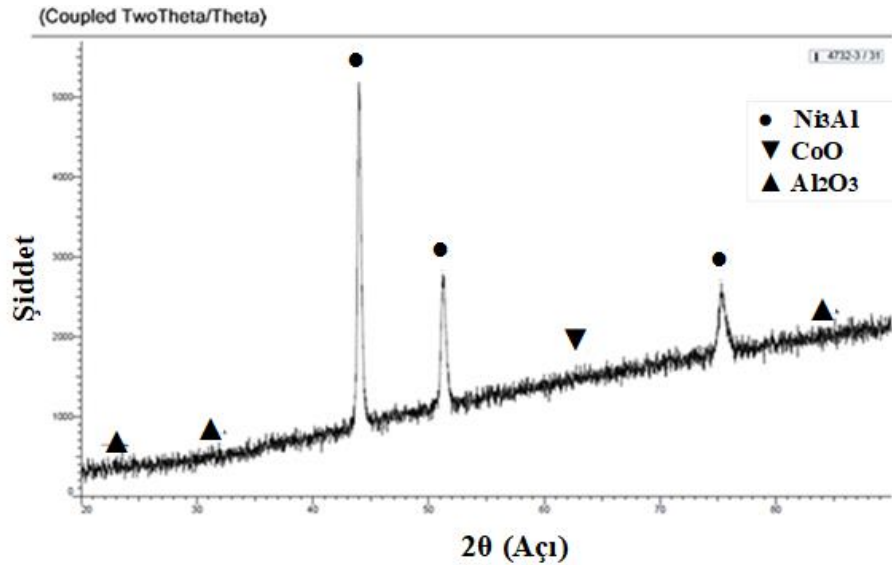
Üretilen bağ ve seramik üst kaplamaların XRD grafikleri Shimadzu marka cihaz ile ölçülmüş olup incelenen XRD grafiklerinden deney numunelerinin yapılarındaki NiCrAlY, NiCoCrAlY ve $ZrO_2-8Y_2O_3$ türü elementlerin varlığı tespit edilmiştir.

Şekil 3.44’de verilen XRD analiz grafiğinde, APS yöntemi ile kaplanan NiCrAlY bağ kaplamanının esas olarak iyi bir kristaliteye sahip Ni_3Al , NiAl ve Ni bazlı katı çözeltili fazlarından oluştuğu gösterilmiştir.



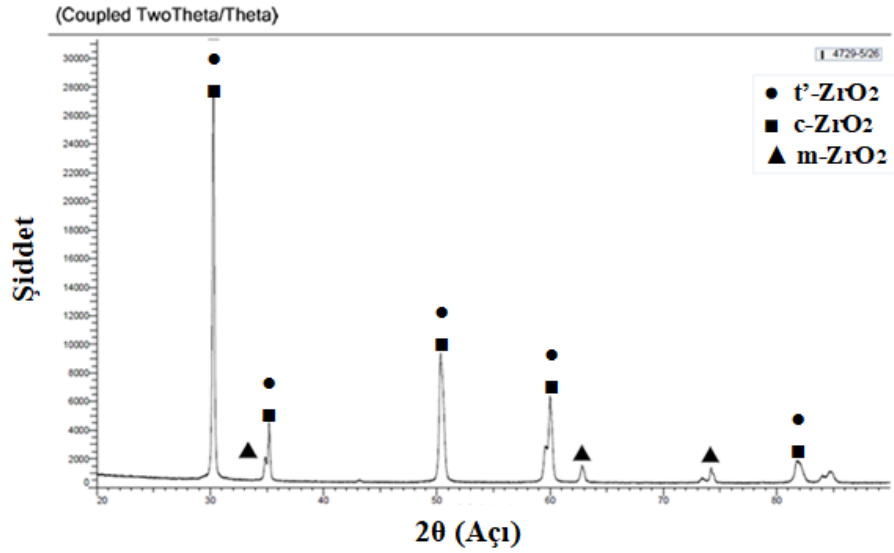
Şekil 3.44. NiCrAlY bağ kaplamanın XRD grafiği.

Şekil 3.45’de verilen XRD analiz grafiğinde, APS yöntemi ile kaplanan NiCoCrAlY bağ kaplamanının esas olarak Ni_3Al ve CoO fazlarından oluştuğunu göstermektedir. APS yöntemi ile püskürtme sırasında Al elementinin O ile teması sonrasında yapıda Al_2O_3 fazı da oluşmuştur. Termodinamik açıdan Al_2O_3 fazı oluşumu düşük enerji gereksinimi ve yüksek kararlılığının olmasından kaynaklanmaktadır.



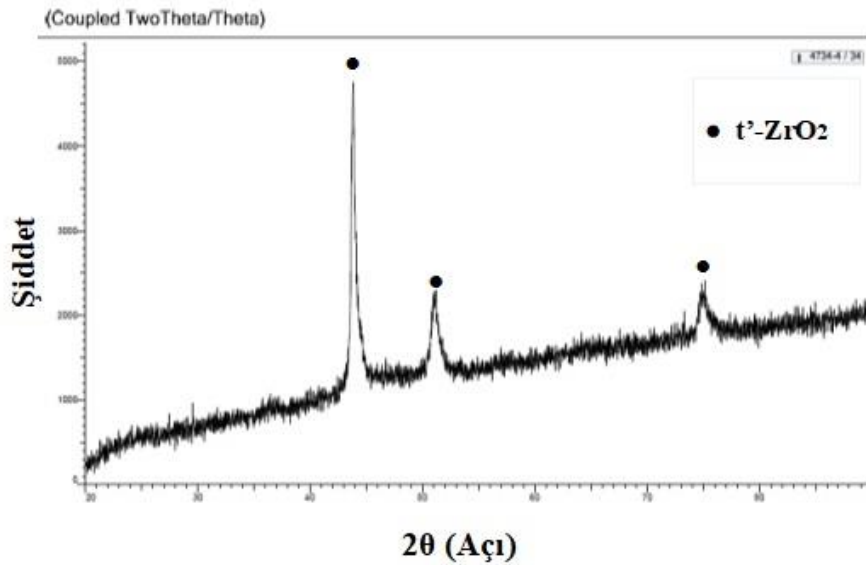
Şekil 3.45. NiCoCrAlY bağ kaplamanın XRD grafiği.

Şekil 3.46’da verilen XRD analiz grafiğinde ise NiCrAlY bağ kaplama üzerine seramik üst kaplama uygulanmış numuneye ait fazlar verilmiştir. Bu analizde birincil faz olarak yarı kararlı tetragonal zirkona (t' -ZrO₂) ve daha sonra kübik zirkona (c -ZrO₂) fazları belirlenmiştir. Yapıda az da olsa monoklinik zirkona (m -ZrO₂) fazları da bulunmuştur.



Şekil 3.46. NiCrAlY Bağ kaplamalı 8YSZ TBK kaplamaların XRD grafiği.

Şekil 3.47’de NiCoCrAlY bağ kaplama üzerine seramik üst kaplama uygulanmış deney numune grubuna ait XRD grafiği gösterilmekle birlikte yapıda birincil faz olarak yarı kararlı tetragonal zirkona (t' -ZrO₂) fazı bulunmuştur.

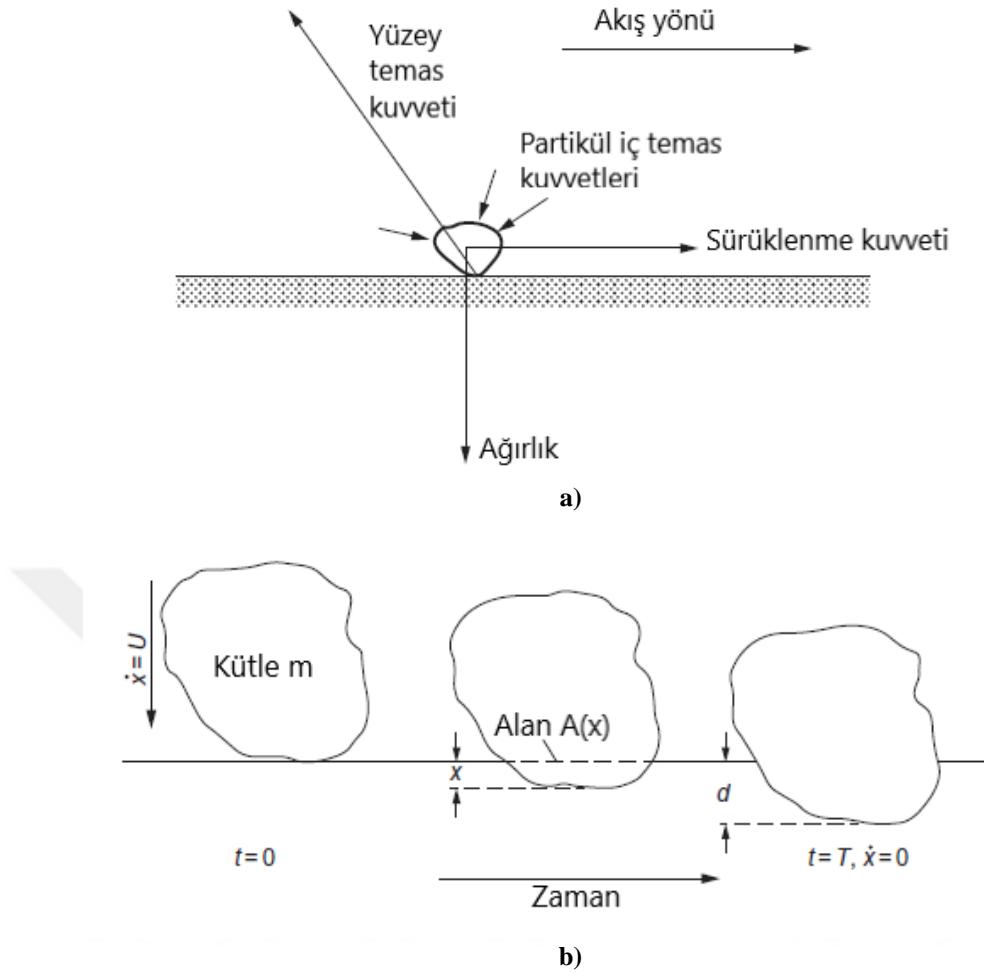


Şekil 3.47. NiCoCrAlY Bağ kaplamalı 8YSZ TBK kaplamaların XRD grafiği.

3.8. YSKPE Deneyleri Sonrasında Erozyon Oranının Belirlenmesi

Deney numunesine etkileyen aşındırıcı partikül kütlesinin (m) erozyon oranına etkilerini araştırmak için kümülatif erozyon deneyleri yapılmıştır. Bu deneylerde öncelikle yüzeydeki deformasyonu görmek amacı ile düşük aşındırıcı partikül ağırlıklarından başlanarak daha sonra yüksek aşındırıcı partikül ağırlıklarında, numune yüzey aşınma durumları gözlemlenerek yapılan her test sonrasında $\pm 0,0001$ g hassasiyete sahip hassas terazi vasıtasıyla deney numunesi ağırlığı ölçülerek, bağ ve seramik üst kaplamanın aşınması incelenmiştir. Bu durum tekrarlı testler ile doğrulanmış ve sadece kaplamanın belirli bir katmanını aşındıracak aşındırıcı partikül kütlesi nihai olarak bulunmuştur. Aşındırıcı partikül kütlesinin düşük olması durumunda hedef malzemede kıyaslama yapılabilecek bir aşınma olmaması durumuyla karşılaşılabılır. Ters durumda yani aşındırıcı partikül kütlesinin fazla olması durumunda ise hedef malzemenin seramik üst kaplaması aşındıktan sonra bağ kaplamanın da aşınması erozyon oranını etkileyecektir. Bu yüzden tekrar deneyleri ile bağ ve seramik üst kaplamada kıyaslama yapabilecek şekilde aşınmasını sağlayan aşındırıcı kütlesi belirlenmeye çalışılmıştır. Yapılan deneysel çalışmada testler için kullanılacak aşındırıcı partikül kütlesini belirlemede gözeneklilik durumu önemli olmakla birlikte kıyaslama amacıyla aşındırıcı partiküllerin numunelerde oluşturduğu erozyon aşınması baskınlığı referans alınarak partikül kütlesi belirlenmiştir. Tekrarlı testler sonucunda seramik üst kaplamalarda 1 Bar hava basıncında ve 600°C sıcaklıkta yapılan deneylerde 100 g aşındırıcı partikül, bağ kaplamalarda ise 1 Bar hava basıncında ve 600°C sıcaklıkta yapılan testlerde 50 g aşındırıcı partikül kullanılmasına karar verilmiştir.

Erozyon oranının belirlenmesinde literatürde hedef malzeme yüzeyine çarpan tek bir partikülün davranışının incelenmesinden yararlanılmıştır. Şekil 3.48'de malzeme yüzeyine çarpan tek partikülün oluşturduğu kuvvetler ile hedef malzeme yüzeyinde meydana gelen sönümlenme mekanizmasına ait model verilmiş olup erozyon oranına ait teorik varsayım bu kabul çerçevesinde aşınma mekanizması tanımlanmıştır.



Şekil 3.48. Erozyon aşınma mekanizması; a) Tek partikülün hedef malzeme yüzeyinde ilerlemesi, b) t=0 anında ilk temas olur daha sonra t=T anında partikül hızı sıfırlanır (Hutchings ve Shipway, 2017).

Partikülün çarpmasında meydana gelen dinamik kuvvetler ve malzeme yüzeyinde meydana gelen pekleşme olayı ihmal edilerek statik olarak aşınma mekanizmasının analitik çözümü aşağıdaki şekilde yapılır. Yüzeyle çarpan partikül sadece plastik deformasyon yaptığı kabul edilerek partikülün yüzeyde oluşturduğu basınç sertlik (H) ile ifade edilir. Partikülün t=T anında malzeme yüzeyine girme mesafesi x ve alanı A(x) olarak belirlenirse partikülün hareket denklemi aşağıdaki şekilde yazılır:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} = -HA(x) \quad (3.14)$$

Partikülün d mesafesi ilerledikten sonra yapmış olduğu iş;

$$\int_0^d HA(x) dx = \frac{1}{2} mU^2 \quad (3.15)$$

denklemleri ile ifade edilir. Burada m: partikül kütlesi, U: partikül hızıdır (m/s).

Partikülün malzeme yüzeyine girinti oluşturan son hacmi;

$$V = \int_0^d A(x)dx \quad (3.16)$$

denklemleri ile ifade edildiğinde ve H sabit olduğundan denklem 3.15 aşağıdaki şekle dönüşür.

$$V = \frac{mU^2}{2H} \quad (3.17)$$

Hedef malzeme yüzeyinde girinti oluşturan aşındırıcı partikülün son durumu ile ilgili birkaç farklı durum ortaya çıkabilir: girinti bölgesinden uzağa elastik deformasyon oluşturarak aşındırıcı partiküller birikebilir, girintinin etrafında plastik olarak deforme olmuş bir malzeme kenarı oluşturabilir veya aşınma kalıntısı oluşturacak şekilde malzeme yüzeyinden çıkabilir. Malzeme yüzeyinde bir şekilde aşınma oluşturarak partikülün uzaklaştığı durum göze alınarak yapılan değerlendirmede denklem 3.17'ye malzeme yoğunluğu da eklenerek formül güncellendiğinde;

$$\Delta W = K\rho \frac{mU^2}{2H} \quad (3.18)$$

aşınan malzemenin kütle kaybını (ΔW) ifade eden denklem ortaya çıkar (ρ : malzeme yoğunluğu, K: birimsiz sabit bir değer).

Erozyonun lineer değiştiği durum göz önüne alınarak erozyon oranı (ER) değeri;

$$ER = \frac{\text{aşınan malzemenin kütle kaybı } (\Delta W)}{\text{aşındırıcı partikül kütlesi } (m)} = \frac{K\rho U^2}{2H} \quad (3.19)$$

formülü ile ifade edilir. Bu formülde bulunan erozyon oranı (mg/g) cinsinden hesaplanmaktadır. Deney öncesi ve deney sonrası hassas terazi ile ölçülen deney numunelerinde meydana gelen numune kütle kaybı, (ΔW) olup mg birimi ile kullanılmış, kaplanmış numune yüzeyine çarpan aşındırıcı partikül kütlesi ise (m) olarak verilerek g cinsinden formülde tanımlanmıştır.

4. ARAŞTIRMA SONUÇLARI VE TARTIŞMA

Inconel 718 süper alaşım malzeme üzerine APS yöntemi ile bağ (NiCrAlY ve NiCoCrAlY) ve seramik kaplanmış (8YSZ) deney numuneleri üç farklı çarpma açısında (30°, 60° ve 90°), üç farklı sıcaklıkta (21°C, 300°C ve 600°C), sabit aşındırıcı partikül çarpma hızı (~97 m/s) ile sabit aşındırıcı partikül boyutunda (~400 µm) erozyon aşınması testlerine maruz bırakılmıştır. Erozyon aşınması deneyleri öncesinde ve sonrasında deney numunelerinin ağırlıkları hassas terazi ile ölçülerek ağırlık kaybı farkını temsil eden değerlerle deneylerde kullanılan aşındırıcı partikül kütleleri oranlanarak erozyon oranı değerleri hesaplanmış olup deneylerin yapıldığı her bir sıcaklıkta çarpma açısı–erozyon oranı grafikleri oluşturulmuştur. Ayrıca bu grafiklere ek olarak sıcaklığın da üçüncü boyut olarak eklendiği çarpma açısı–erozyon oranı–sıcaklık sütun grafikleri çıkarılmıştır. Yapılan deneyler sonucunda grafikte oluşan her bir noktanın belirlenebilmesi için o noktaya ait değerlerde deneyler üç defa tekrarlanmış ve her bir tekrarın erozyon oranı hesaplanmış olup bu değerlerin ortalaması ve standart sapması belirlenerek hata çubukları çarpma açısı–erozyon oranı grafiklerine konulmuştur. Grafiklerin elde edilmesi öncesinde deney numunelerinin yapısal özellikleri ve yapıya dahil olan elementlerin homojen yapıda bulunmaları hakkında EDX haritalama işlemi uygulanarak hem grafiklerin sonuçlarının yorumlanmasına hem de SEM görüntülerine ait verilerin analizine katkı sağlanması amaçlanmıştır.

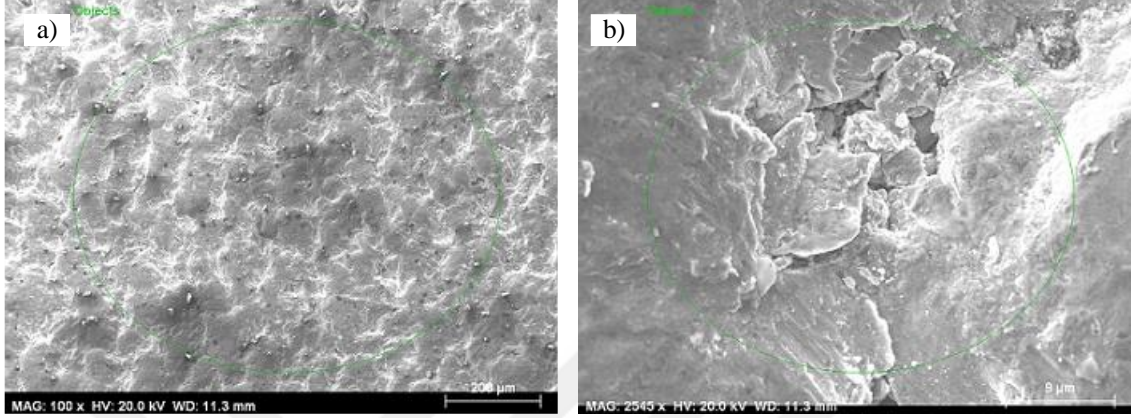
4.1. Bağ Kaplamaların Erozyon Aşınma Deneyleri Sonuçları

Altlık malzeme üzerine uygulanan bağ kaplama işleminin etkisinin incelendiği erozyon aşınma deneylerinde sonuçların karşılaştırılması amacıyla EDX ve EDX haritalama analizleri, erozyon oranlarının belirlenmesi ve SEM görüntülerinin analizleri elde edilmiş olup detaylı değerlendirmeler her bir kapsam için ayrı ayrı yapılmıştır.

4.1.1. Bağ Kaplamaların EDX ve EDX Haritalama Analizleri

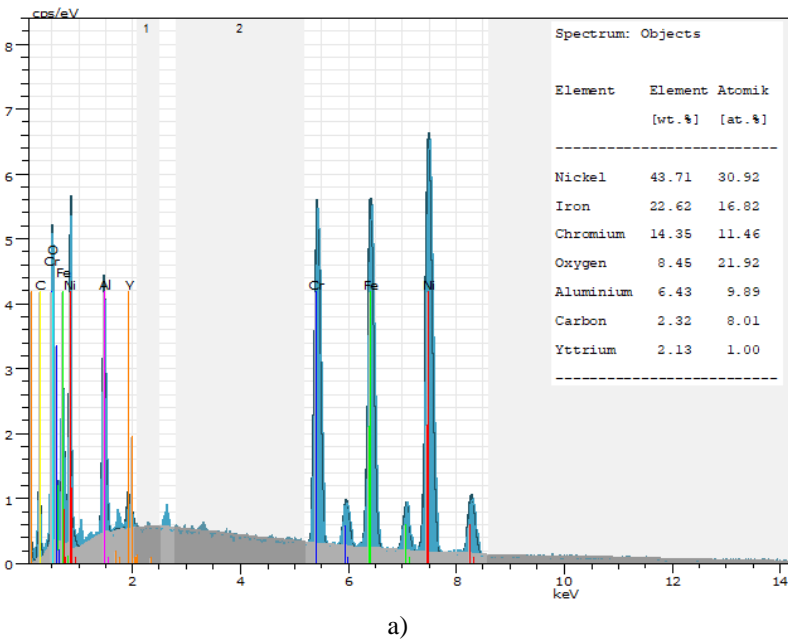
NiCrAlY uygulanmış bağ kaplama işlemi sonrasındaki genel ve bölgesel bir alanı kapsayan EDX haritalama analizini yapmak amacıyla elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.1 (a) ve (b)'de verilmiştir. EDX analizleri 2 µm çapa sahip apatür kullanılarak numune yüzeyinde belirlenen 1100µm*800µm ve 45µm*36µm'lik odaklanılan alanın taranması

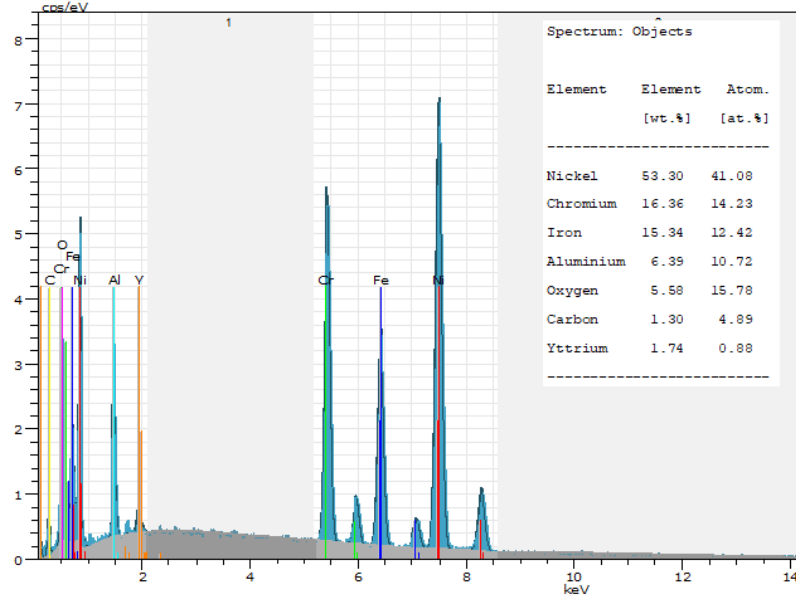
ile gerçekleştirilmiş olup yaklaşık $2.5 \mu\text{m}$ 'lik bir derinlikte haritalama yapılmıştır. EDX element analizi sonucu yapıdaki elementlerin varlığı ve oranı bir bütün halinde Şekil 4.2 (a) ve (b)'de detaylandırılarak yapıda bulunan Fe, C, O, Ni, Cr, Al ve Y elementlerine ait sonuçlar ortaya konulmuştur.



Şekil 4.1. NiCrAlY bağ kaplanmış numune EDX analizi SEM görüntüsü; a) $1100\mu\text{m} \times 800\mu\text{m}$, b) $45\mu\text{m} \times 36\mu\text{m}$.

Bu görüntülerin EDX haritalama işlemine aktarılması sonrası yapıdaki elementlerin homojen olarak dağılımının sağlanıp sağlanamadığına ait fikir edinilmesi amaçlanmıştır. Şekil 4.3 (a) ve (b)'de EDX haritalamaya ait elementlerin varlığını farklı renk seçenekleri ile tanımlayan şematik yapılar ortaya konulmuş olup altlık malzeme dahil yapıda var olan baskın roldeki tüm elementler ve bağ kaplamaya (NiCrAlY) ait temel elementlerin yapıdaki varlığı ayrı ayrı belirlenmiştir.

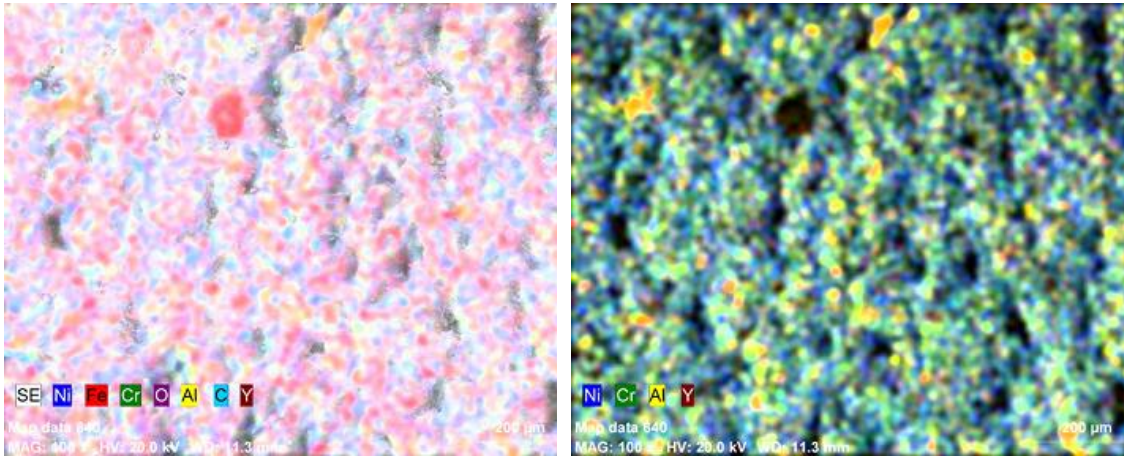




b)

Şekil 4.2. NiCrAlY bağ kaplanmış numune EDX element analizi; a) 1100µm*800µm, b) 45µm*36µm.

Sonuçlar göstermiştir ki APS yöntemi sonucunda bağ kaplama bileşenleri olan Ni, Cr, Al ve Y elementlerinin varlığı ispatlanmış ve numunenin farklı noktalarında yapılan EDX analizleri NiCrAlY elementlerinin ideal beklentiye ulaştığı yani malzemenin her tarafına homojen sayılabilecek bir biçimde dağıldığını göstermiştir.



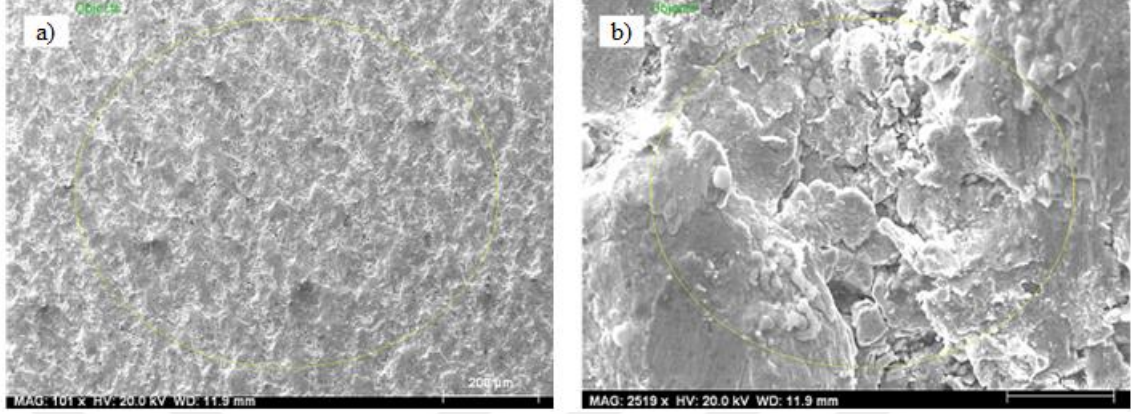
a)

b)

Şekil 4.3. NiCrAlY bağ kaplama numunelerin EDX haritalama analizi; a) Altlık malzeme ve kaplamada bulunan elementler, b) Kaplama yapısında bulunan elementler.

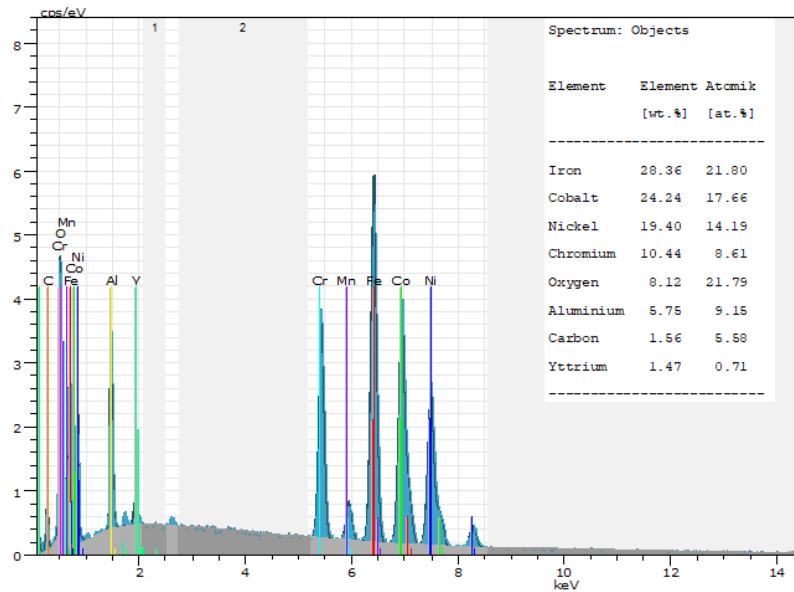
NiCrAlY bağ kaplama numunelerine alternatif olarak elde edilen NiCoCrAlY bağ kaplanmış numunelerin genel ve bölgesel bir alanı EDX haritalama analizi yapmak amacıyla elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.4 (a) ve (b)'de verilmiştir. Bu SEM

görüntülerinden yola çıkılarak elde edilen ikinci numune grubuna ait elementlerin (Fe, C, O, Ni, Co, Cr, Al ve Y) yapı içinde ağırlıkça ve atomik anlamda yüzde dağılımını gösteren EDX element analizi sonuçları ise Şekil 4.5 (a) ve (b)'de ortaya konulmuştur.

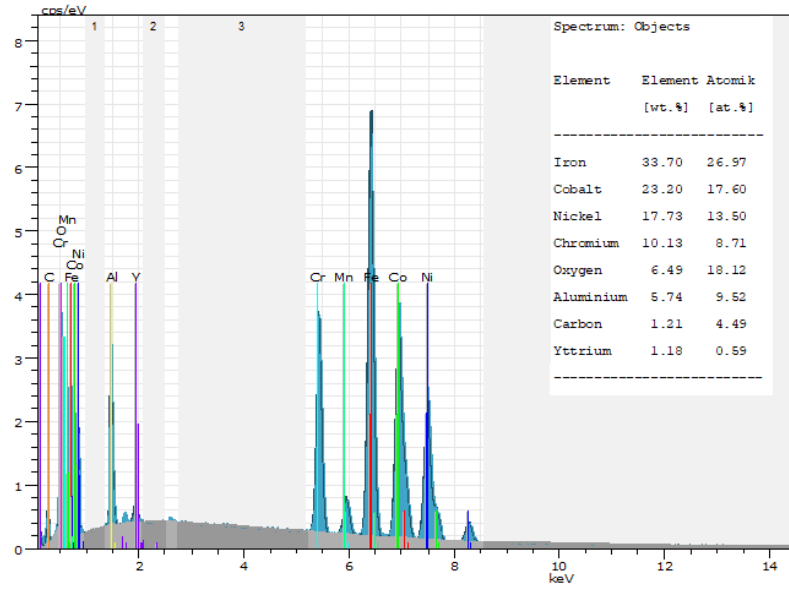


Şekil 4.4. NiCoCrAlY bağ kaplanmış numune EDX analizi SEM görüntüsü; a) 1100µm*800µm, b) 45µm*36µm.

Şekil 4.6' da da EDX haritalamaya ait elementlerin varlığını farklı renk seçenekleri ile tanımlayan ve NiCoCrAlY bağ kaplamaya ait temel elementlerin varlığı görselden anlaşılmaktadır. EDX haritalama sonrası NiCoCrAlY bağ kaplanmış numune grubundan farklı olarak NiCoCrAlY bağ kaplanmış numune grubunda var olan Co elementinin yapıda homojen dağılımı ve baskınlığı Şekil 4.6 (b)'ye bakıldığı zaman açıkça görülmektedir.



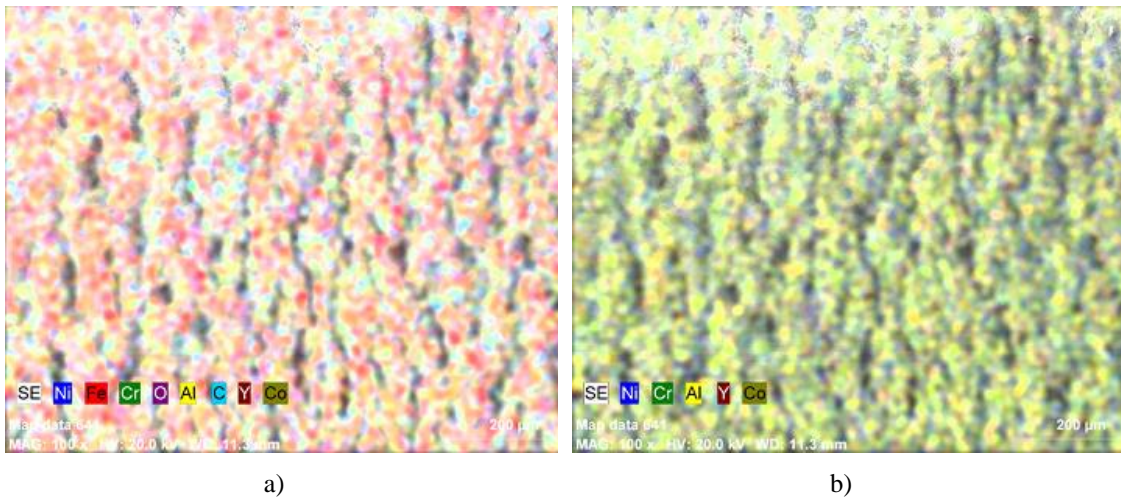
a)



b)

Şekil 4.5. NiCoCrAlY bağ kaplanmış numune EDX element analizi; a) 1100µm*800µm, b) 45µm*36µm.

Bağ kaplamaların karşılaştırmalı YSKPE deneylerinin yapılmasındaki ana amaç, Co elementinin bağ kaplamasının aşınma direncine olan katkısını belirlemek olduğu için EDX haritalama sonrası Co elementinin belirginliği ve homojenliği numune yüzeyine çarpan aşındırıcı partiküllerin Co elementi ile etkileşiminin düzenli olduğunu göstermesi açısından önem arz etmektedir. Co elementinin belirli bölgelerde heterojen bir şekilde dağılmış olması aşınma olayının tekrar edilebilirliğini ciddi olarak etkileyecektir. Bu nedenle tüm elementlerin yapı içinde homojen bir şekilde dağılması aşınma olayının tekrar edilebilirliği açısından son derece önemlidir.



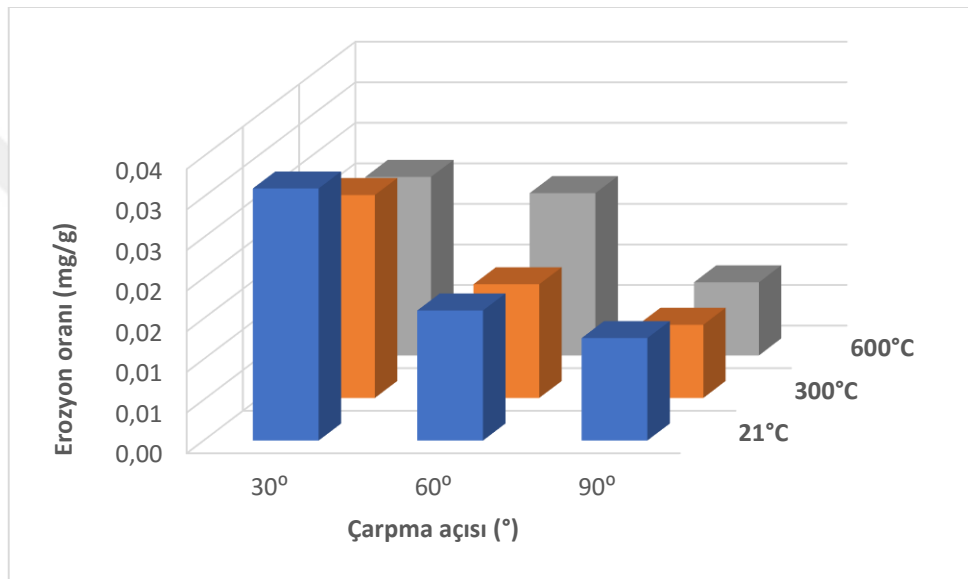
a)

b)

Şekil 4.6. NiCoCrAlY bağ kaplama numunelerin EDX haritası; a) Altlık malzeme ve kaplamada bulunan elementler, b) Kaplama yapısında bulunan elementler.

4.1.2. Bağ Kapslamaların Erozyon Oranlarının Belirlenmesi

Her iki bağ kaplama yapılmış numuneler (NiCrAlY ve NiCoCrAlY) 30°, 60° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarında, 21°C, 300°C ve 600°C sıcaklıklarda ve 50 g aşındırıcı partikül kullanılarak erozyon aşınmasına maruz kalmışlardır. Her iki bağ kaplama numunesinin erozyon aşınma deneyleri sonrası oluşan çarpma açısına ve sıcaklığa bağlı değişen üç eksenli erozyon oranı sütun grafikleri şekil 4.7 ve şekil 4.8’de verilmiştir.



şekil 4.7. NiCrAlY Bağ kaplamaların sıcaklığa bağlı olarak değişen çarpma açısı - erozyon oranı grafiği.

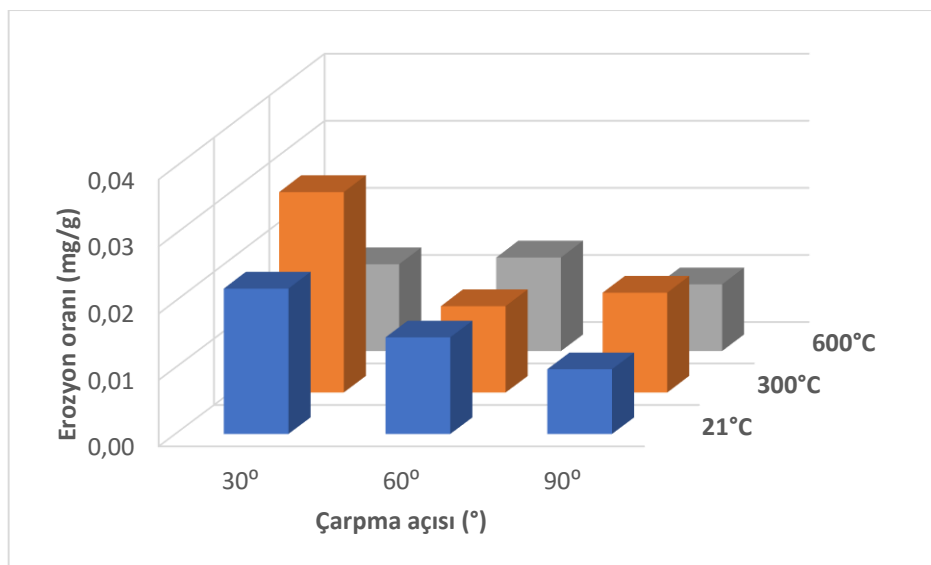
NiCrAlY bağ kaplamaların erozyon oranı grafiği öncelikle çarpma açısı değişkenliğinde incelendiğinde çarpma açısının artmasıyla erozyon oranının azaldığı görülmüştür. Bu eğilim tipik bir sünek malzeme davranışıdır (Finnie, 1960). Bu durum ayrıca literatürde bağ kaplamalar üzerine yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu belirlenmiştir (Nicholls ve ark., 1997; Mishra ve ark., 2006). Sünek malzemelerde en fazla erozyon eğik açılarda (20°–30°) yani aşındırıcı partikülün kazıyıcı etki yaptığı durumlarda meydana gelmektedir.

Sünek malzemelerde aşındırıcı partiküllerin dik açı ile yüzeye çarptığı durumlarda yüzeyde elastik bir deformasyon oluşturmakla birlikte aşındırıcı partiküller malzeme yüzeyine gömülerek ağırlık artışına (inkübasyon) bile sebep olabilirler. Bu nedenle sünek malzemelerin KPE aşınma deneylerinde dik açılarda daha düşük erozyon oranı ortaya çıkar. Ayrıca sünek malzemelerde dik açıda malzeme yüzeyine çarpan aşındırıcı

partiküller yüzeyde mikro ölçeklerde pekleşme olmasına da sebep olabilirler (Hutchings ve Shipway, 2017).

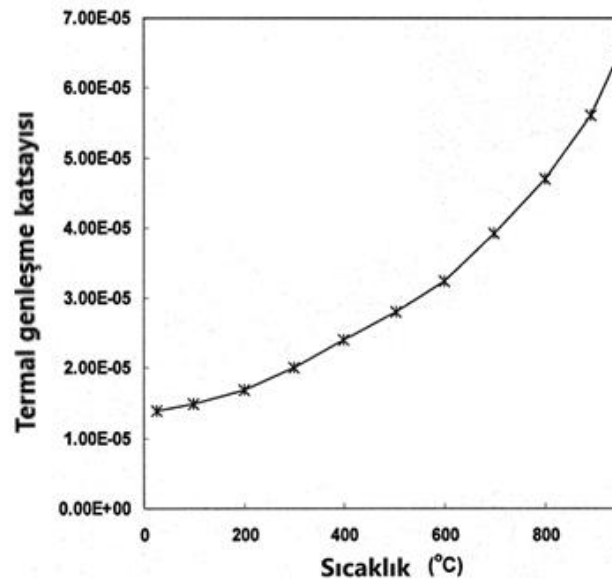
NiCrAlY bağ kaplamaların erozyon oranının sıcaklık ile değişimi incelendiğinde en fazla erozyon aşınması oda sıcaklığında ve 30° çarpma açısında meydana gelmiştir. Aşınma testlerinin yapıldığı sıcaklık değişkenliğine ait erozyon oranı değerleri karşılaştırıldığında 30° çarpma açısında 600°C sıcaklığa ait deney sonuçlarına göre oda sıcaklığındaki erozyon direncinin 1,4 kat yüksek olduğu sonucuna varılmıştır. 300°C sıcaklık verilerine ulaşılan deneylerde ise erozyon direncinin 21°C’de gerçekleştirilen deneylerden daha fazla, 600°C’den ise daha az olduğu belirlenmiştir. Sıcaklık artışı ile erozyon direncinin artması toparlanmaya bağlı mukavemet atışı ile açıklanabilir. Bu etkinin ortaya çıkmasında taneler arasındaki hareketlilik durumu sıcaklıkla birleşerek gözeneklilik formunun azalmasına bağlı olarak tokluk verilerinde artışa sebep olması şeklinde yorumlanabilir. Bu sıcaklık etkisi seramik malzemelerin erozyon oranının belirlenmesi bölümünde detaylı olarak tartışılmıştır.

Üç farklı sıcaklıkta, çarpma açısındaki değişim ile erozyon oranlarına bakıldığı zaman; 21°C sıcaklıkta yapılan deneylerde 30° çarpma açısında meydana gelen erozyon oranı, 90° çarpma açısındaki erozyon oranının 2,2 katı, 300°C’de bu oran 2,7 katı ve 600°C’de 2,4 katı fazla gerçekleşmiştir. 600°C’de yapılan deneylerde sıcaklığa bağlı olarak eğimli çarpma durumlarında yani 30° ve 60° çarpma açılarında erozyon oranının yatay seyrettiği dik çarpmada ise azalan bir erozyon oranı varlığı gözlemlenerek sünek ve yarı sünek arasında bir davranış olduğu yorumu yapılmıştır.



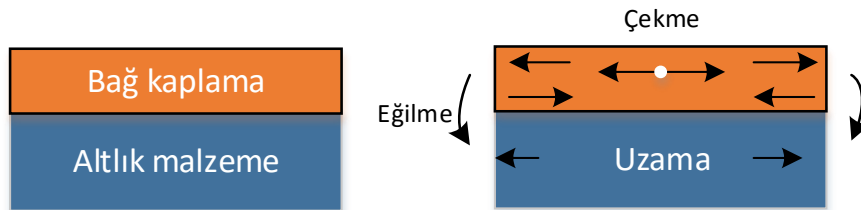
Şekil 4.8. NiCoCrAlY Bağ kaplamaların sıcaklığa bağlı olarak değişen çarpma açısı - erozyon oranı grafiği.

NiCoCrAlY bağ kaplamaların erozyon oranı grafiği açısal değişim bakımından incelendiği zamanda diğer bağ kaplama grubu ile benzer bir eğilim göstererek sünek malzeme davranışı sergilediği belirlenmiştir. Fakat NiCrAlY bağ kaplama grubundan farklı olarak en fazla erozyon aşınması 300°C sıcaklık değerinin 30° çarpma açısında meydana gelmiştir. Kobalt elementinin metalik bağ kaplamada termal genleşme katsayısını artırma özelliğinden yola çıkılarak oda sıcaklığından ani olarak 300°C sıcaklığa çıkılmasıyla altlık malzeme ile bağ kaplama arasında termal genleşme katsayı farklılığından kaynaklanan gerilmelerin sebep olduğu söylenebilir. Şekil 4.9'da NiCoCrAlY bağ kaplamanın sıcaklık ile termal genleşme katsayısının değişiminin literatürden elde edilen grafiği verilmiştir (Khor ve Gu, 2000). NiCoCrAlY bağ kaplamaların ısı iletkenliğinin sıcaklık ile arttığı gözlemlenmiştir. Bu bağ kaplamalar, elektronik ısı iletime neden olan serbest elektronlara sahip olduğundan ısı iletkenliği sıcaklığın belirli derecelerine kadar (<800°C) arttığı bu sıcaklıktan sonra ise ısı iletkenliğinin sıcaklık ile değişmediği sonucu ortaya konulmuştur (Luo ve ark., 1997). Taylor ve Walsh (2004) yaptıkları çalışmada NiCrAlY bağ kaplamanın termal genleşme katsayısının NiCoCrAlY bağ kaplamaya göre daha düşük olduğunu bularak bu durumun kaplama ile altlık malzeme arasında sıcaklık değişimi ile daha düşük yüzey gerilmelerine neden olduğunu ve NiCrAlY bağ kaplamaların daha uzun termal döngü ömrüne sahip olacağını belirtmişlerdir.



Şekil 4.9. NiCoCrAlY Bağ kaplamaların sıcaklığa bağlı olarak değişen termal genleşme katsayısı.

Bağ kaplama ile altlık malzeme ara yüzeyinde ani sıcaklık değişiminde termal genişleme katsayısı uyumsuzluğundan dolayı malzemelerin genişlemesi ve büzülmesi durumlarında ara yüzeyde gerilmeler meydana gelmektedir. Bu gerilmeler de zamanla malzeme içinde çatlakların oluşmasına veya ilerlemesine sebep olmaktadır (Zhu ve Miller, 2000). Şekil 4.10'da malzemenin sıcaklık etkisine maruz kalarak bağ kaplama ve altlık malzeme ara yüzeyinde oluşan gerilmeler şematik olarak verilmiştir.



Şekil 4.10. Sıcaklık etkisi durumunda bağ kaplama ile altlık malzeme ara yüzeyinde oluşan gerilmeler.

Malzemelerin zaman sıcaklık ilişkisinde ömrünü tahmin etmek için Larson-Miller parametresi (LMP) tanımlanır. Bu parametre;

$$LMP = T(20 + \text{Log}t) * 10^{-3} \quad (4.1)$$

formülü ile hesaplanır (T: Kelvin, t: zaman). Farklı sıcaklıkta yapılan deneylerin LMP değerleri tablo 4.1'de verilmiştir (t=0,2 h). Tablo verileri göstermiştir ki zaman verisi çok değişkenlik göstermemekle birlikte sıcaklık parametresi temel farklılığı ortaya koyan ve LMP değerinde belirleyici rol oynamıştır.

Tablo 4.1. Farklı sıcaklıkta yapılan deneylerin LMP değerleri.

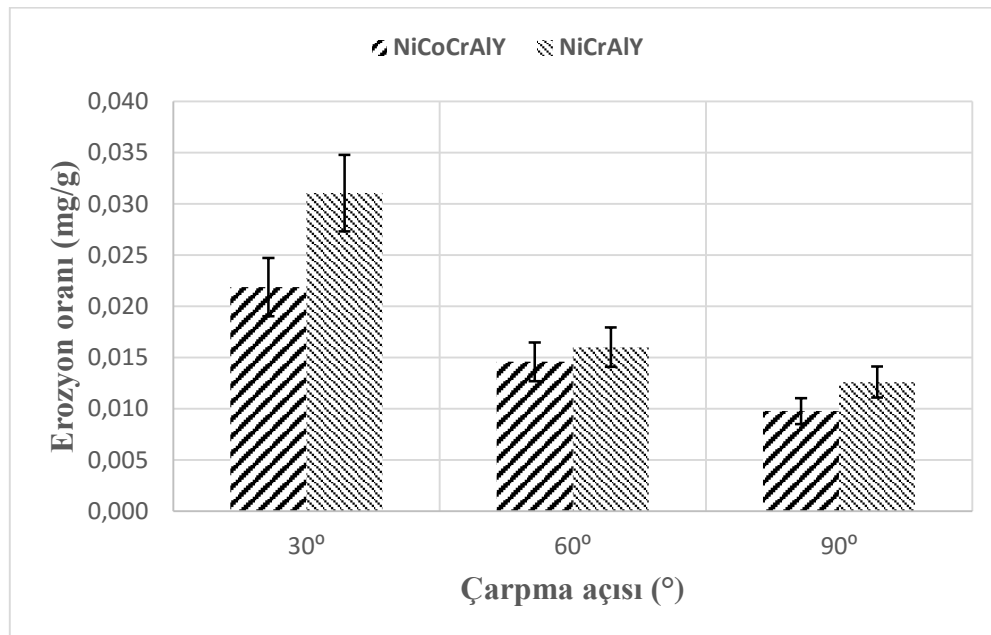
Sıcaklık (°C)	LMP
21	5,6
300	11,1
600	16,9

Kobalt katkılı bağ kaplama uygulamalarına ait erozyon aşınma değerleri özelinde yapılan bir başka karşılaştırma verisinde ise 21°C sıcaklıkta yapılan deneylere ait grafikler detaylandırıldığında çarpma açılarındaki farklılık değerlendirildiğinde sünek malzeme formunun etkisi gözlemlenerek erozyon oranının 2,23 kat arttığı hesaplanmıştır. 300°C ve 600°C sıcaklıklarında yapılan erozyon aşınması deneylerinde ise ne tam olarak

sünek malzeme ne de tam olarak gevrek malzeme gözlemlenmemiş olmakla birlikte bu seyirdeki değişkenliğe kobalt elementinin etkinliği ve sıcaklığın baskın rol oynaması şeklinde yorumlanmıştır.

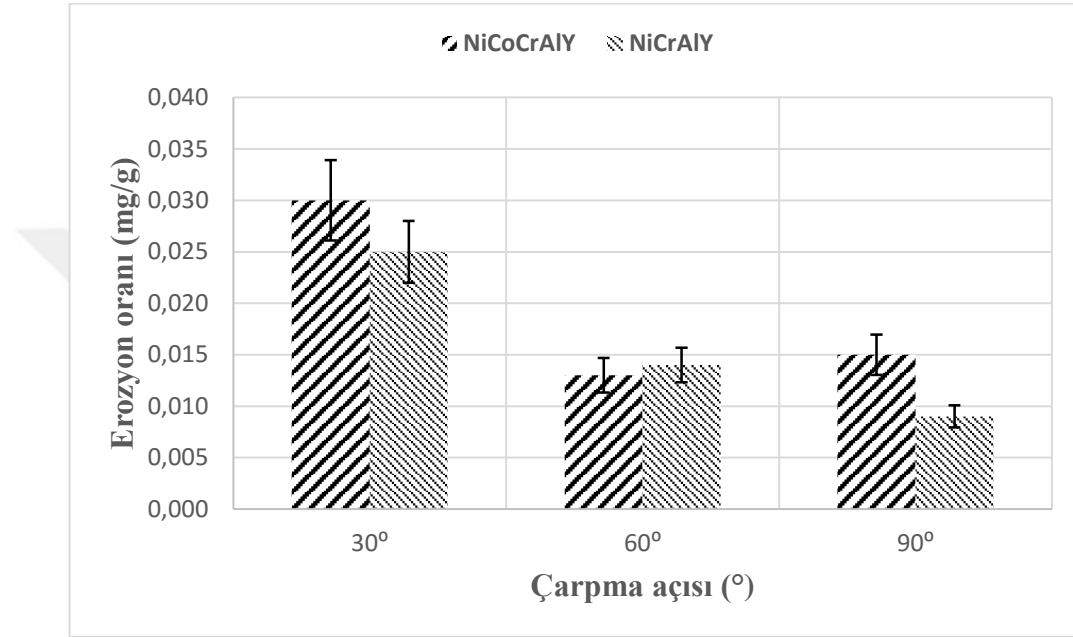
Bağ kaplama işlemi uygulanmış deney numune gruplarına ait sıcaklık-çarpma açısı ve erozyon oranı değişkenliğindeki üç eksenli sütun grafiklerine ilave olarak bu deney gruplarının her bir sıcaklıkta birbirleri ile karşılaştırmalı iki eksenli çarpma açısı-erozyon oranı grafikleri oluşturularak elemental farklılığa sahip bağ kaplama uygulamalarına ait sonuçlar detaylandırılmıştır.

Oda sıcaklığında yapılan erozyon aşınma testlerinin Şekil 4.11'de verilen karşılaştırmalı erozyon oranı-çarpma açısı grafikleri incelendiğinde kobalt katkılı bağ kaplamaların bütün çarpma açılarında diğer deney grubuna göre daha az erozyon oranı sergilediği görülmektedir. Bağ kaplamaların sertlik değeri karşılaştırmalarında kobalt katkılı bağ kaplamalar daha düşük sertlik değeri sergilemiştir. NiCrAlY bağ kaplama uygulanmış deney numunelerinin NiCoCrAlY bağ kaplanmış numunelerle karşılaştırılmasında ortalama gözeneklilik çap verileri daha yüksek olduğu için bu durum NiCrAlY bağ kaplı numunelerin oda sıcaklığında daha fazla erozyon aşınması sergilemesine sebep olmuştur. Ayrıca NiCrAlY bağ kaplanmış numunelerin yüzey pürüzlülük değerlerinin yüksek olması numunelerden kaldırılan pürüzlülük tepelerinin artmasına ve bu durumda aşınmanın fazlalaşmasına sebep olmuştur.



Şekil 4.11. 21°C sıcaklıkta bağ kaplamaların çarpma açısı - erozyon oranı ilişkisi.

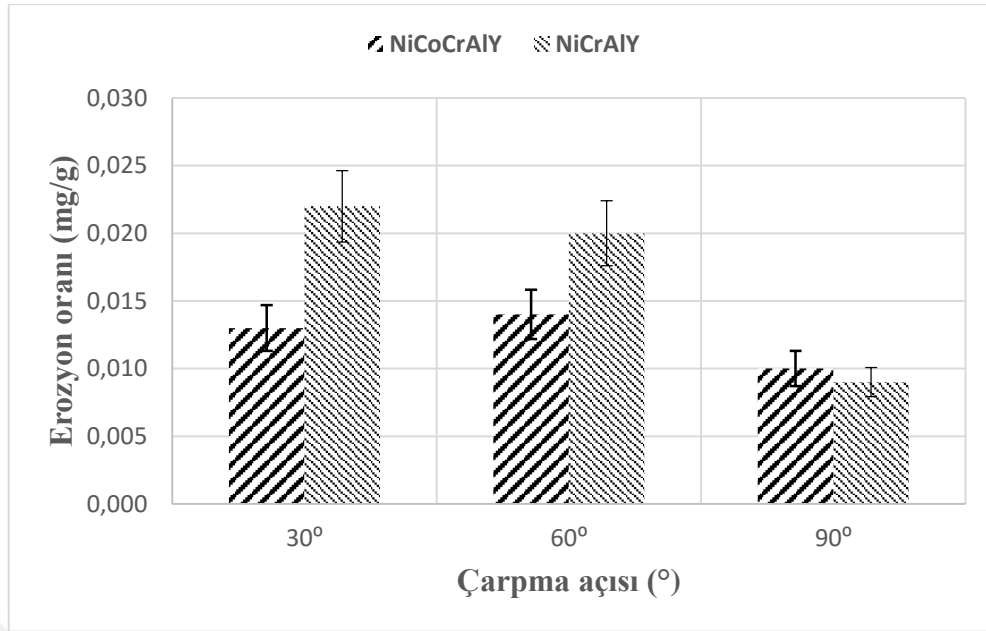
Şekil 4.12'deki grafik verileri detaylandırıldığında 300°C sıcaklıkta, oda sıcaklığında gerçekleştirilen deney sonuçlarından farklı olarak kobalt katkıli bağ kaplamalar 30° ve 90° çarpma açılarında daha fazla erozyon oranı sergilediği gözlemlenmiştir. Bu durum göstermiştir ki kobalt katkıli bağ kaplamaların termal genleşme katsayısının fazla olmasından kaynaklanan altlık malzeme kaplama ara yüzeyinde artan sıcaklıkla birlikte artan yüzey gerilmelerinin etkisi ile açıklanabilir.



Şekil 4.12. 300°C sıcaklıkta bağ kaplamaların çarpma açısı - erozyon oranı ilişkisi.

600°C sıcaklıkta bağ kaplamaların çarpma açısı-erozyon oranı karşılaştırmalı grafiğinin verildiği Şekil 4.13'e bakıldığında kobalt katkıli bağ kaplamaların oda sıcaklığında yapılan deneylere benzer şekilde diğer deney grubundan daha az erozyon aşınması sergilediği görülebilir. Kobalt katkıli bağ kaplamaların belirli bir sıcaklık dengesi sağlandıktan sonra bu dengeyi sağlayacak yetenekte sıcaklık değerlerine ulaşmasıyla birlikte deney numunelerindeki ısı baskınlığı ön plana çıkarak gözeneklilik yapıları revize edilmiş partikül çarpmasına dirençli bir yapı sergilediği sonucuna varılmıştır.

Farklı sıcaklık verilerininin karşılaştırılmasında kobalt katkıli bağ kaplamalar 300°C hariç diğer iki sıcaklık (21°C ve 600°C) değerleriyle mukayese edildiğinde kobalt katkısı olmayan bağ kaplama numunelerine göre sırasıyla %30 ve %41 daha az erozyon oranı sergiledikleri belirlenmiştir.



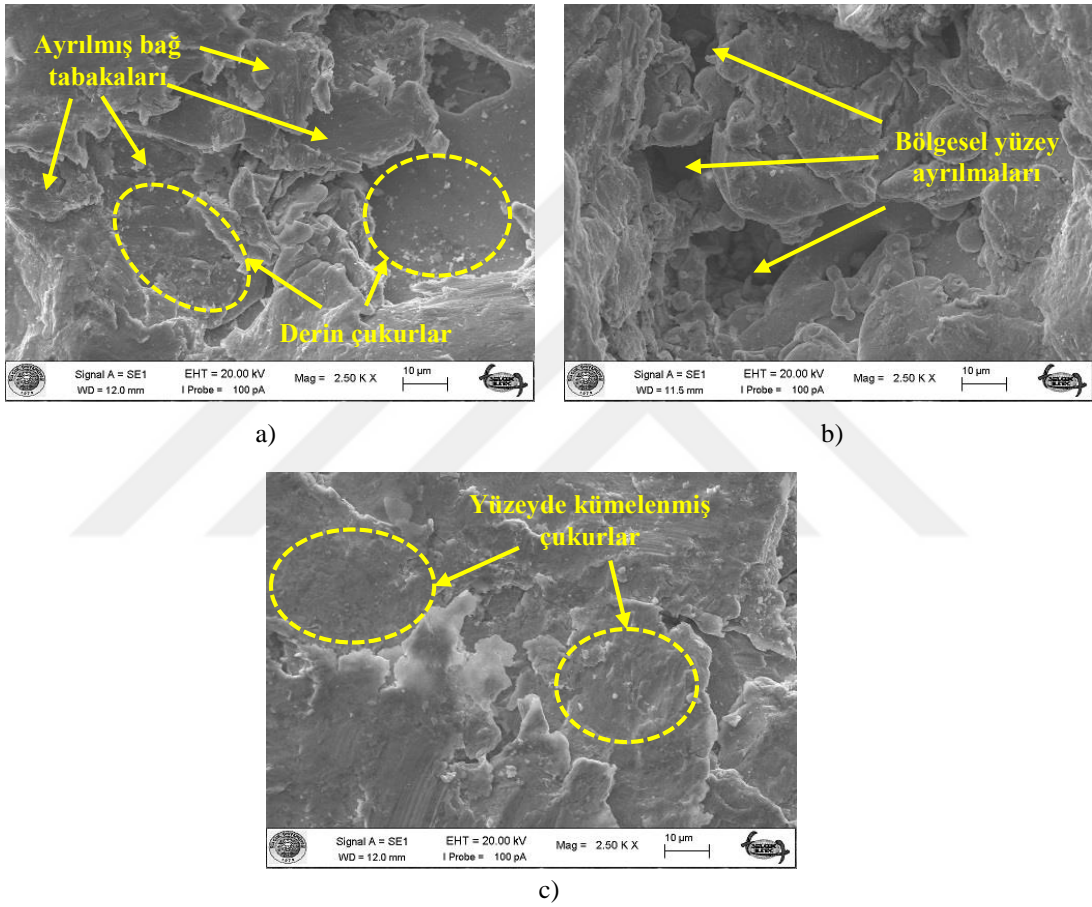
Şekil 4.13. 600°C sıcaklıkta bağ kaplamaların çarpma açısı- erozyon oranı ilişkisi.

4.1.3. Bağ Kaplamaların SEM Görüntülerinin Analizleri

Katı partikül erozyon aşınma deneylerinin yüksek sıcaklık ve hız etkinliği üzerine yapılan çalışmalarda altlık malzeme üzerine ayrı ayrı uygulanan bağ ve seramik kaplama işlemleri sonucunda bağ kaplamaya ait deney numunelerinin yüzeylerinin erozyon aşınması sonrasındaki SEM görüntüleri incelendiğinde bağ kaplama uygulamasının yapıda genel olarak literatürde sünek malzemelerde karşılaşılan çarpma açısı etkinliği gözlemlenmiş olup sıcaklık etkisine bağlı olarak yapılan deneyler incelendiğinde ise literatüre farkındalık katılarak yüzey deformasyonlarına ait görüntüler elde edilmiştir.

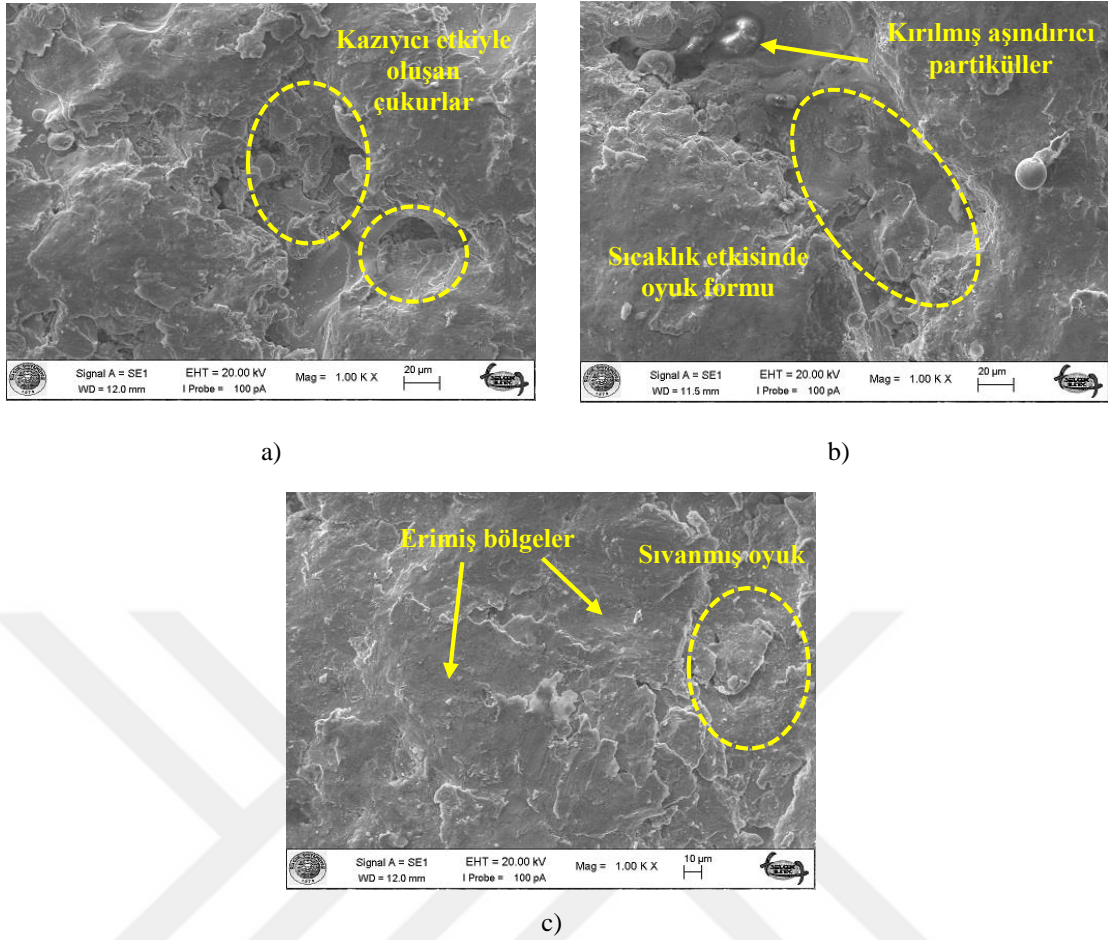
Öncelikle sıcaklık etkinliğinin göz önüne alınmadığı yani 21°C’de Inconel 718 altlık malzeme üzerine NiCrAlY elementlerini barındıran bağ kaplamalı deney numunelerinin 30°, 60° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarındaki yüzey deformasyonlarına ait SEM görüntüleri Şekil 4.14’de verilmiştir. Bu SEM görüntülerinin seçilmesindeki temel amaç yapılan deneylerde maksimum aşınmaya karşılık gelen sıcaklık değerindeki açığa bağlı yüzey değişkenliklerini göstermektir. Bağ kaplamalar sünek malzeme davranışı sergilediği için en fazla erozyon aşınması 30° çarpma açısında meydana gelmiş olup açılı olarak yüzeye çarpan aşındırıcı partiküller numune yüzeyinde altlık malzeme üzerine uygulanmış bağ kaplamaların tabakalarının ayrılmasına ve kazıyıcı etki ile yüzeyde derin çukurların oluşmasına sebep olmuştur. 60° çarpma açısında aşındırıcı partiküller yüzeye daha dik açıda çarptıkları için yüzeyde bölgesel ayrılmalara

sebepler oldukları halde bu durum 30° çarpma açısında meydana gelen erozyon aşınması kadar yüzeyden yoğun bir malzeme kopması gerçekleşmemiştir. Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerde erozyon aşınmasının en az olduğu açı olan 90° 'de ise malzemenin sünek davranış sergilemesine bağlı olarak numuneye çarpan aşındırıcı partiküller yüzeye gömülme etkisiyle birikmesinden dolayı kaplama yüzeyinden daha çok bağ yapısının ayrılması yerine yüzeyin belirli bölgelerinde kümelenmiş çukurların oluştuğu elde edilen görüntülerden anlaşılmaktadır.



Şekil 4.14. NiCrAlY bağ kaplamaların 21°C 'deki çarpma açılarına ait SEM görüntüleri; a) 30° , b) 60° ve c) 90° .

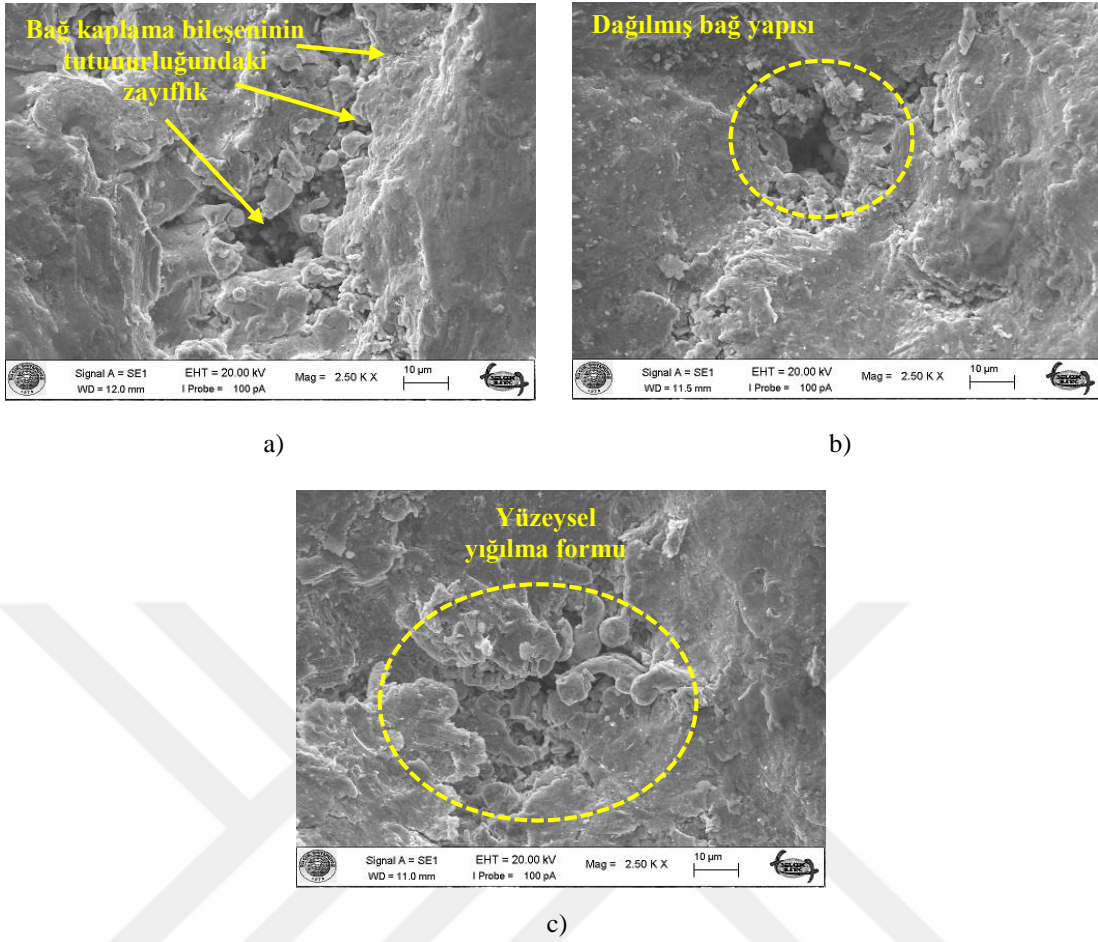
Açısal değişimin kaplama yüzeyinde meydana getirdiği deformasyonun detaylı incelenmesinden sonra en fazla erozyon aşınmasının olduğu çarpma açısında, sıcaklığın etkisini görmek amacıyla NiCrAlY bağ kaplamaların aynı açıdaki üç farklı sıcaklıkta meydana gelen aşınmasının SEM görüntüleri Şekil 4.15'de verilmiştir.



Şekil 4.15. NiCrAlY bağ kaplamaların 30° çarpma açısındaki sıcaklık değişimine ait SEM görüntüleri; a) 21°C, b) 300°C ve c) 600°C.

SEM görüntüleri incelendiğinde en fazla aşınmanın olduğu 30° çarpma açısının 21°C sıcaklıkta yapılan erozyon aşınma deneylerinde APS yönteminden kaynaklanan gözeneklilik kaynaklı kazıyıcı etkinin yüzeyde yoğun çukurlar oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Deney sıcaklığının 300°C sıcaklığa çıkarılmasına ait deneylerde ise aşındırıcı partiküllerin yüzeye çarpıp kırılmasına bağlı olarak kaplama yüzeyine gömüldüğü ve yüzeyin sıcaklık etkisiyle daha elastik bir kıvam almasından dolayı da yüzeye çarpan aşındırıcı partiküllerin yüzeyde plastik oyuk formları oluşturduğu belirlenmiştir. 600°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde ise sıcaklığın bağ kaplamada bulunan gözenekliliği azaltması sonucunda yüzeydeki katı hal dönüşümünün etkinliğinin artmasıyla partikül teması neticesinde yüzeye sıvanmış oyuklar belirgin hale gelmiştir.

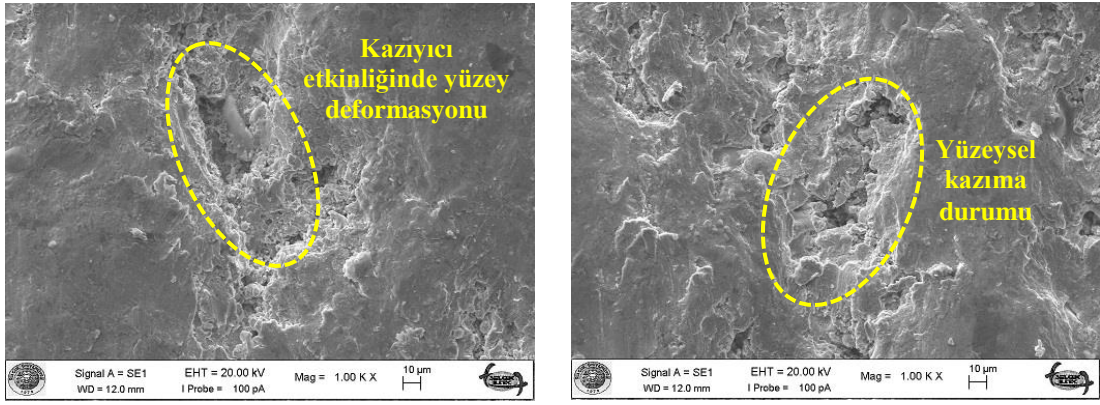
Şekil 4.16'da NiCoCrAlY bağ kaplamalarının en fazla erozyon aşınmasının olduğu 21°C sıcaklıkta açılal değişimin yüzey deformasyonuna etkisi incelenmiştir.



Şekil 4.16. NiCoCrAlY bağ kaplamaların 21°C'deki çarpma açılarına ait SEM görüntüleri; a) 30°, b) 60° ve c) 90°.

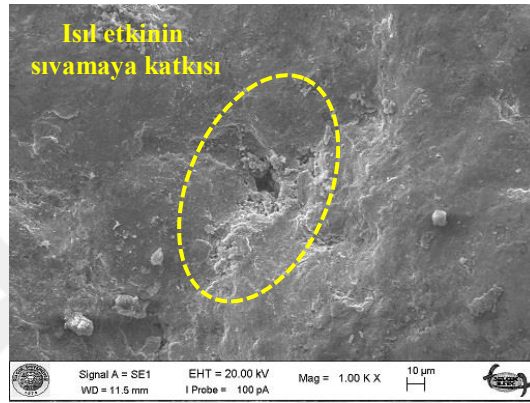
Açısal değişim sonucu en fazla aşınmanın meydana geldiği 30° aşındırıcı partikül çarpma açısı SEM görüntülerinde diğer bağ kaplama grubuna kıyasla daha az sertlik değerine sahip olmasının sonucu olarak bağ kaplama bileşeninin altlık malzeme yüzeyine tutunabilirlik yeteneğinde zayıflık görülmüştür. Bu yetenek ise çarpma açısının daha dik bir konuma geldiği 60°'de baskınlığını hafifleterek sadece belirli bölgelerde bağ yapısının dağılması şeklinde kendini göstermiştir. Bu bağ kaplama grubu da erozyon aşınma deneyleri sonucu sünek malzeme davranışı sergilediği için 90° çarpma açısında meydana gelen yüzey deformasyonuna ait SEM görüntülerinde aşındırıcı partiküllerin kaplanmış numune yüzeylerinde yığılmaya sebep olduğu anlaşılmıştır.

NiCoCrAlY bağ kaplamaların en fazla erozyon aşınmasının meydana geldiği 30° çarpma açısında sıcaklık farklılığının aşınmaya etkisini temsil eden SEM görüntüleri Şekil 4.17'de verilmiştir.



a)

b)



c)

Şekil 4.17. NiCoCrAlY bağ kaplamaların 30° çarpma açısındaki sıcaklık değişimine ait SEM görüntüleri; a) 21°C, b) 300°C ve c) 600°C.

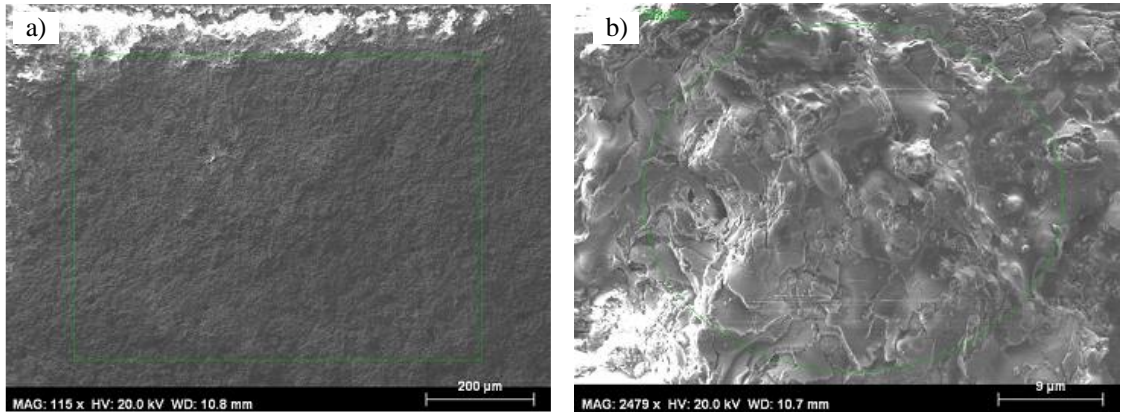
Oda sıcaklığında gerçekleştirilen deneylerin aşınma durumunu gösteren SEM görüntülerine bakıldığında yüzey deformasyonunun kazıyıcı etkiye bağlı olarak geliştiği görülmektedir. NiCoCrAlY bağ kaplamaların diğer numune grubu ile erozyon aşınma davranışı kıyasında 300°C sıcaklıkta ve 30° çarpma açısında daha fazla erozyon aşınması sergilemesi, SEM görüntüleri incelendiğinde termal genişleme katsayısının fazla olmasından kaynaklanan altlık malzeme ile kaplama ara yüzeyinde artan gerilmelerin yüzeysel kazıma durumunu daha da istenmeyen kritik seviyelere ulaştırdığı kanısına varılmıştır. Elastik davranışının sıcaklık etkisi ile daha belirgin hale geldiği 600°C’de ise açıl olarak çarpan aşındırıcı partiküller yüzeyden ayrılmak yerine sıvama şeklinde yüzeye gömülerek bu sıcaklıkta daha az erozyon oranının ortaya çıkmasını sağlamıştır.

4.2. Seramik Üst Kaplamaların Erozyon Aşınma Deneyleri Sonuçları

Termal bariyer etkisinin daha anlamlı sonuçlar ortaya koyması amacıyla numunelere bağ kaplama işleminden sonra seramik üst kaplama uygulaması yapılmış numunelerin erozyon aşınma deneylerine ait sonuçların karşılaştırılması amacıyla EDX ve EDX haritalama analizleri, erozyon oranlarının belirlenmesi ve SEM görüntüleri elde edilerek sonuçların farklılığına ait yorumlar ortaya konulmuştur.

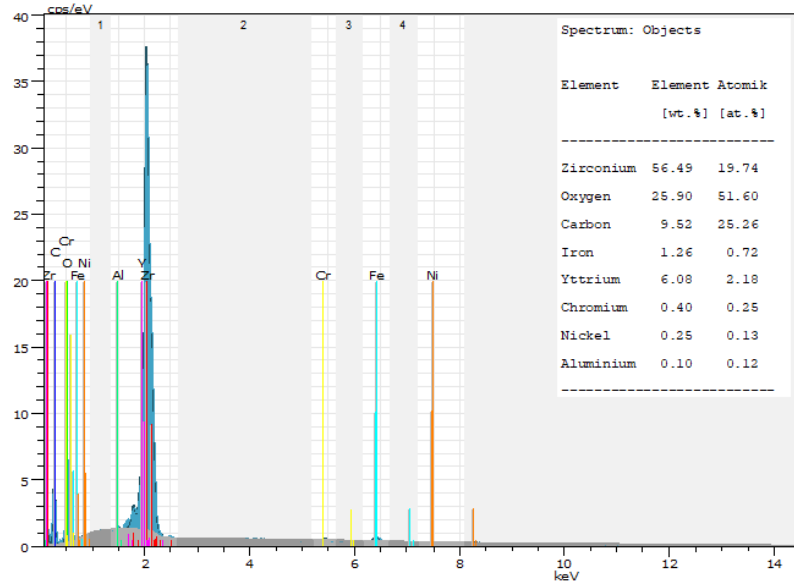
4.2.1. Seramik Üst Kaplamaların EDX ve EDX Haritalama Analizleri

Erozyon aşınma testlerinde kullanılan altlık malzeme üzerine APS metodu ile bağ kaplamasında NiCrAlY uygulanmış ve yine APS metodu ile seramik üst kaplamasında $Zr_2O-8Y_2O_3$ bileşimi kullanılmış numunelerin genel ve bölgesel bir alanı kapsayan EDX haritalama analizini yapmak amacıyla elde edilen SEM görüntüleri Şekil 4.18 (a) ve (b)'de verilmiştir. SEM görüntüleri ile varılan EDX analizi, Şekil 4.19 (a) ve (b)'de verilmiş olup yapılarda ortaya çıkan elemental farklılığı oluşturan Zr, O, C, Fe, Y, Cr, Ni ve Al elementlerinin etkisi ve yapıdaki oranlarını belirlemek amacıyla elde edilen sonuçların görsel ve grafik aktarımı yapılmıştır.

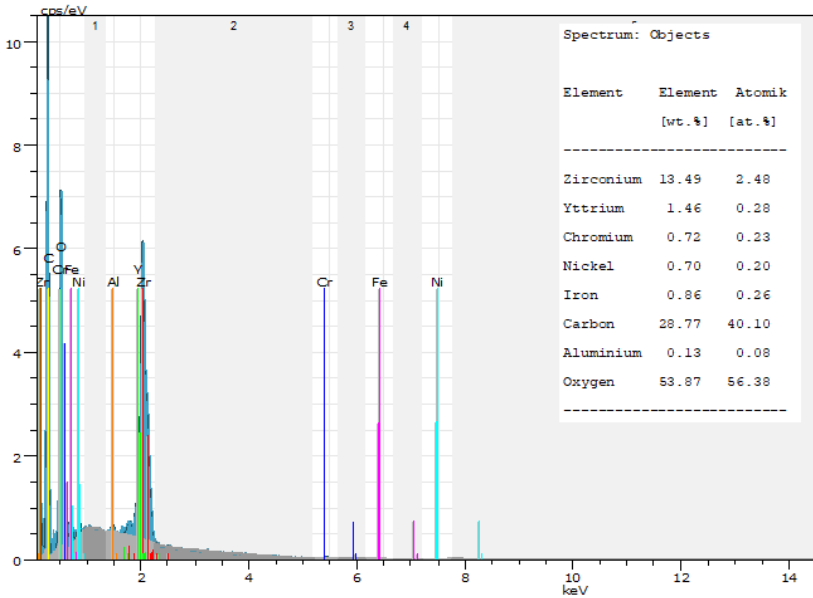


Şekil 4.18. NiCrAlY + $Zr_2O-8Y_2O_3$ seramik kaplanmış numune EDX analizi SEM görüntüsü; a) $1100\mu m*800\mu m$, b) $45\mu m*36\mu m$.

EDX analizi sonuçlarına bakıldığı zaman hem bağ kaplama hem de seramik üst kaplaması APS yöntemi ile kaplanan numunelerde seramik üst kaplama bileşenleri olan Zr, O ve Y elementlerinin yapıda bulunduğu belirlenerek ilgili elementlerin istenilen ağırlık oranında olduğu ispatlanmıştır.



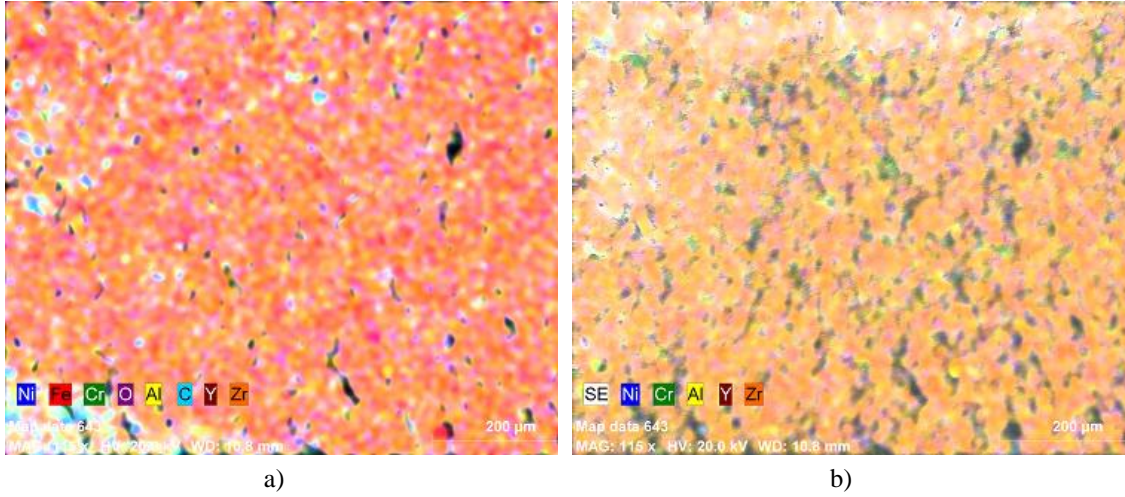
a)



b)

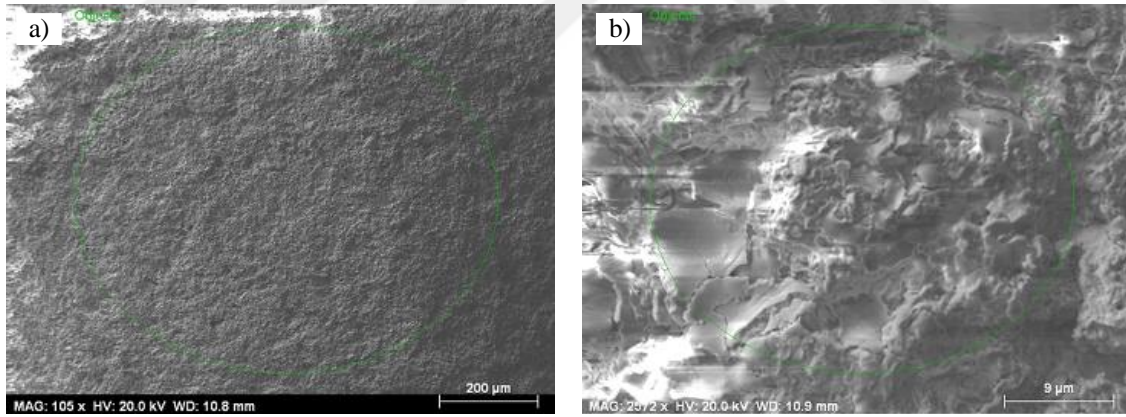
Şekil 4.19. NiCrAlY + Zr₂O-8Y₂O₃ seramik kaplanmış numune EDX element analizi; a) 1100µm*800µm, b) 45µm*36µm.

Şekil 4.20 (a) ve (b)'de seramik üst kaplama işlemi uygulanmış deney numunesi yapısında bulunan elementlerin EDX haritalama analiz sonucu altlık malzemede ve kaplamada var olan elementlerin farklı renk seçenekleri ile yapıya homojen dağılıp dağılmadığını gözlemlemek amacıyla şematik olarak verilerek sonuçların anlamlılığı gözlemlenmiştir.



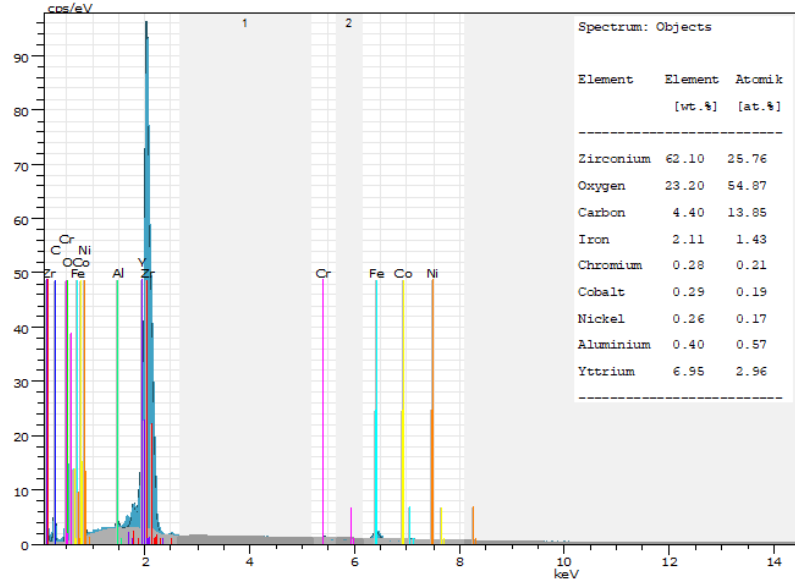
Şekil 4.20. NiCrAlY + Zr₂O-8Y₂O₃ seramik kaplama numunelerin EDX haritalama analizi; a) Altlık malzeme ve kaplamada bulunan elementler, b) Kaplama yapısında bulunan elementler.

Şekil 4.21 (a) ve (b)'de seramik üst kaplamaya ait diğer numune grubu olan NiCoCrAlY özellikli bağ kaplama üzerine Zr₂O-8Y₂O₃ bileşimine sahip seramik üst kaplama yapılmış deney numunelerine ait EDX ve EDX haritalama analizlerinin elde edildiği genel ve bölgesel SEM görüntüleri verilmiştir.

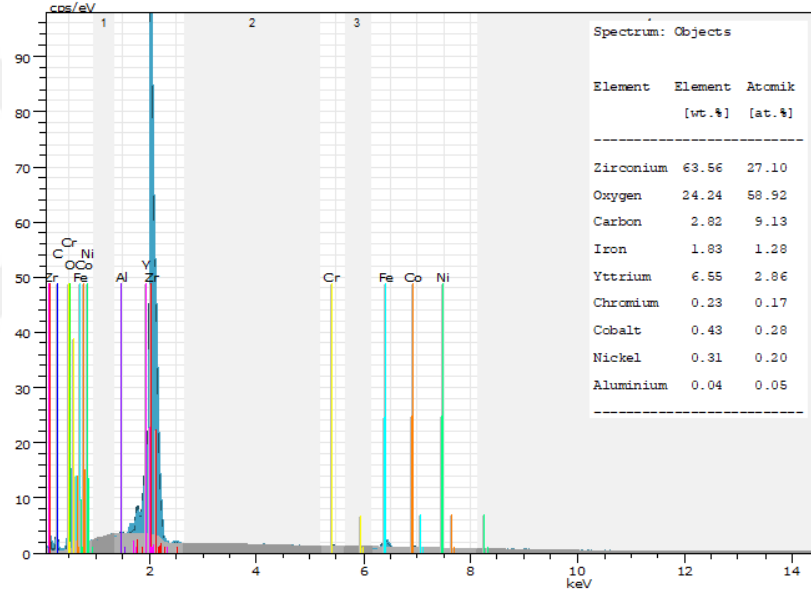


Şekil 4.21. NiCoCrAlY + Zr₂O-8Y₂O₃ seramik kaplanmış numune EDX analizi SEM görüntüsü; a) 1100µm*800µm, b) 45µm*36µm.

SEM görüntülerinden elde edilen EDX analizi sonucu seramik üst kaplama uygulanmış numuneye ait elementlerin ağırlık ve atom oranları bakımından değerlerinin belirlendiği grafik ve tablo haline getirilmiş gösterim Şekil 4.22'de verilmiştir. Zr, O, C, Fe, Cr, Co, Ni, Al ve Y elementlerinin yüzde ağırlık ve atom oranları genel ve bölgesel alanda elde edilen sonuçlar bazında tanımlanmıştır.



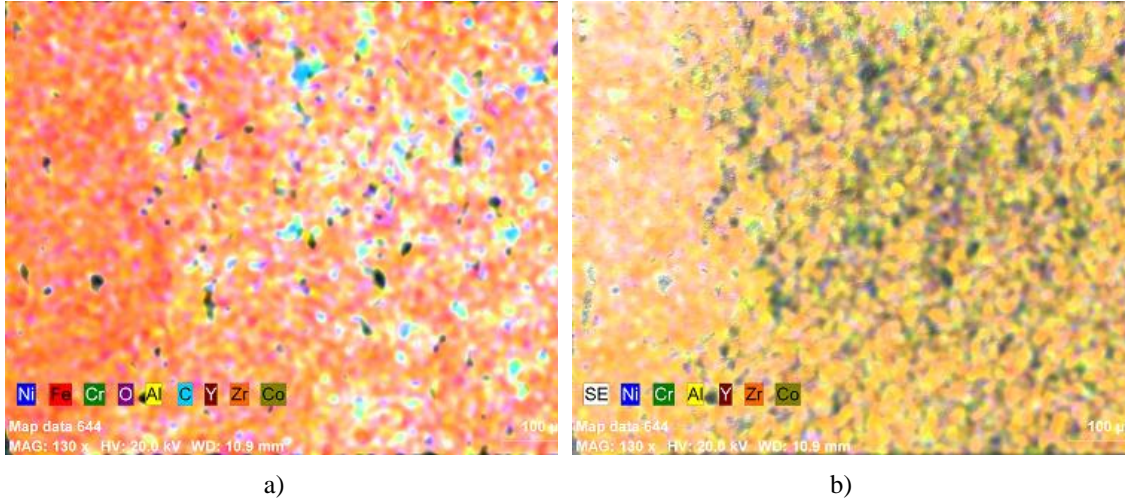
a)



b)

Şekil 4.22. NiCoCrAlY + Zr₂O-8Y₂O₃ seramik kaplanmış numune EDX element analizi; a) 1100µm*800µm, b) 45µm*36µm.

Şekil 4.23 (a) ve (b)'de EDX analizi ile verilen elementlerin yapı içinde dağılımlarının homojenliği her bir elemente farklı renk verilmesiyle görsel olarak EDX haritalama metoduyla sunulmuştur. Elde edilen analiz sonucunda diğer numune grubundan farklı olarak yapıda bulunan kobalt elementinin yapıdaki varlığı alınan analiz sonucundan net olarak anlaşılmıştır.



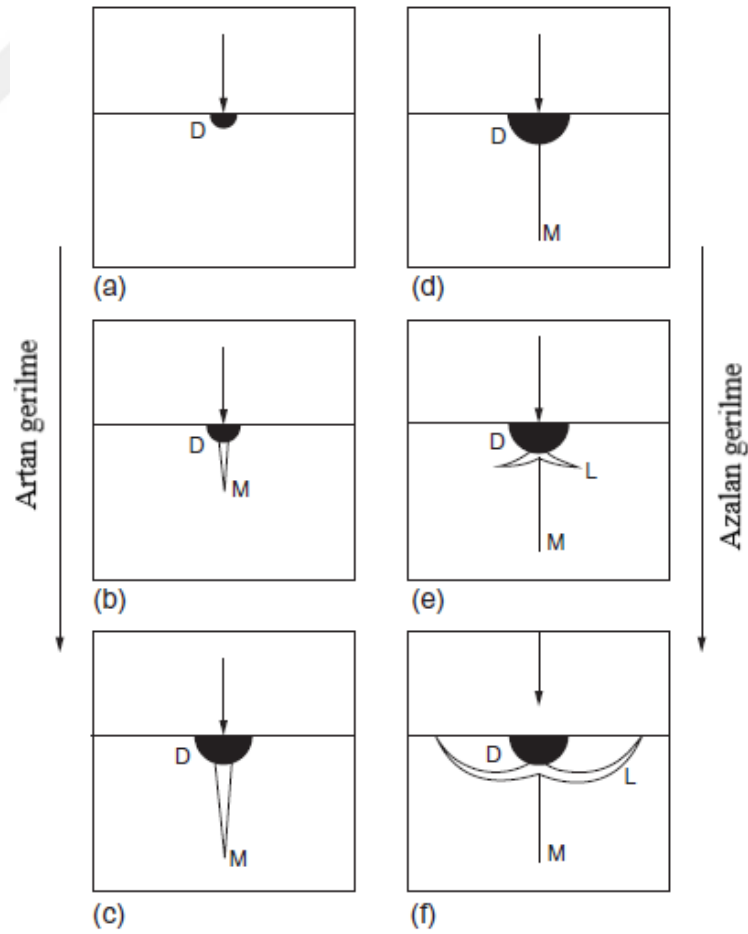
Şekil 4.23. NiCoCrAlY + Zr₂O-8Y₂O₃ seramik kaplanmış numune EDX analizi SEM görüntüsü; a) 1100µm*800µm, b) 45µm*36µm.

4.2.2. Seramik Üst Kaplamaların Erozyon Oranlarının Belirlenmesi

Farklı bağ kaplamalar (NiCrAlY ve NiCoCrAlY) üzerine APS yöntemi ile kaplanan 8YSZ seramik üst kaplama yapılmış numuneler de sadece bağ kaplama yapılmış numunelerle aynı şekilde 30°, 60° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarında ve 21°C, 300°C ve 600°C sıcaklıklarda erozyon aşınmasına maruz kalmışlardır.

Seramik üst kaplamalı numunelerin yapılan erozyon aşınma deneylerine ait sonuçlar genel olarak incelendiğinde literatürde karşılaşılan gevrek malzemeler için elde edilen erozyon oranı – çarpma açısı uyumluluğuna ait durum ortaya çıkmıştır. Bu durum göstermiştir ki literatürde gevrek malzemeleri tanımlayan ve seramik malzemelerden beklenen bir davranış şeklinde yorumlanmıştır. Bu tez çalışması kapsamında yapılan deneylerden elde edilen sonuçların literatürde seramik üst kaplamalar üzerine yapılan çalışmalar ile uyumlu olduğu belirlenmiştir (Cernuschi ve ark., 2011; Wang ve ark., 2012; Cernuschi ve ark., 2016). Gevrek malzemelerde en fazla erozyon aşınması, dik açılarda (80°–90°) yani aşındırıcı partikülün dik açıda yüzeye kümülatif çarpmaları sonrasında çatlakların ilerlemesi ile meydana geldiği bilinmektedir. Bu çatlaklar alümina gibi sert aşındırıcı partiküllerin malzeme yüzeyine peşi sıra çarpmasıyla yüzeyde elastik-plastik bir gerilme alanı meydana getirmesi sonucunda yüzey formunu deforme ederek girinti oluşmasına sebep olur. Şekil 4.24.'de verilen genel morfoloji yorumlandığında hedef malzeme, homojen ve gevrek olduğunda ve aşındırıcı partikül, yeteri kadar sert ve dik açılarda etki ettiği durumlarda ortaya çıkan çatlak ilerlemesini göstermektedir.

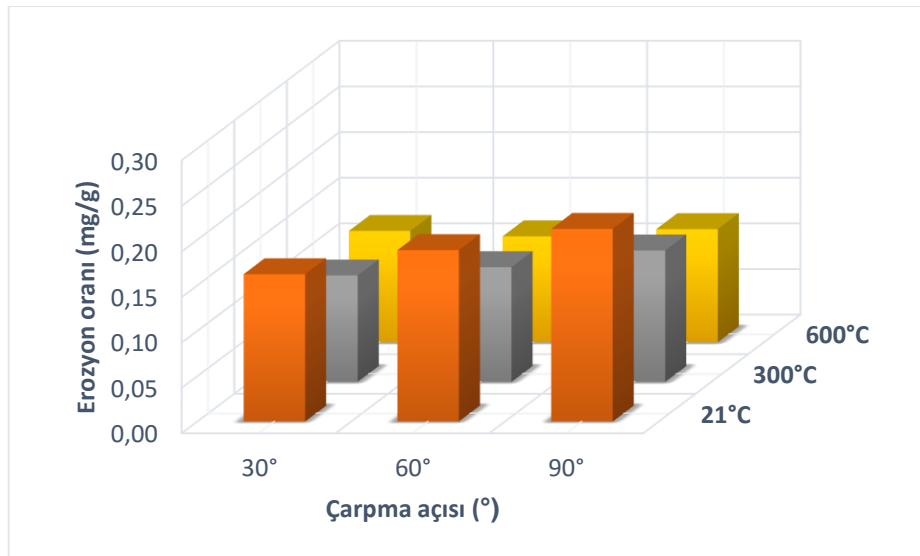
Numune yüzeyine çarpan yeterince sert ve keskin aşındırıcı partiküllerin yüzeye çarptığı noktada başlangıç aşamasında geri dönüşü olmayan bir deformasyonun oluşumu Şekil 4.24 (a)'da verilmiştir. Bu deformasyon alanı aşındırıcı partikülün hızının artması ile artar. (b) şeklinde yüzeye hızlı bir şekilde çarpan aşındırıcı partiküller ise temas noktası altında yüzey gerilmelerinin yoğunlaşmasına bağlı olarak çatlak oluşumuna sebep olur. Bu çatlak ortanca çatlak olarak adlandırılır ve aşındırıcı partikülün şekline ve kristal yapısının anizotropiklik durumuna göre değişiklik göstermektedir. (c)'de ise yüzeye etki eden darbenin artmasıyla ortanca çatlak kararlı bir şekilde büyümeye başlar. (d) durumunda ortanca çatlak küçülmeye başlar fakat tamamen kapanamaz. (e) aşamasında ise temas alanı içindeki deforme olmuş malzeme yüzeyine aşındırıcı partikülün çarpıp yüzeyden ayrılması öncesi ortaya gerilme gevşemesi, yoğun artık gerilmeleri üst üste getirerek deforme olmuş bölgede bulunan çatlakların yanlara doğru açılmasına sebep olur. Nihai olarak (f) aşamasında, çatlakların yana doğru ilerlemesi daha sonra yüzeyde çentik etkisi yaparak oyukların oluşmasını meydana getirir (Lawn ve Swain, 1975).



Şekil 4.24. Aşındırıcı partikülün noktasal teması ile gevrek malzemede çatlak oluşumu. Ortanca çatlak a'dan c'ye doğru artar, daha sonra d'den f'ye doğru kademeli olarak azalır (Lawn ve Swain, 1975).

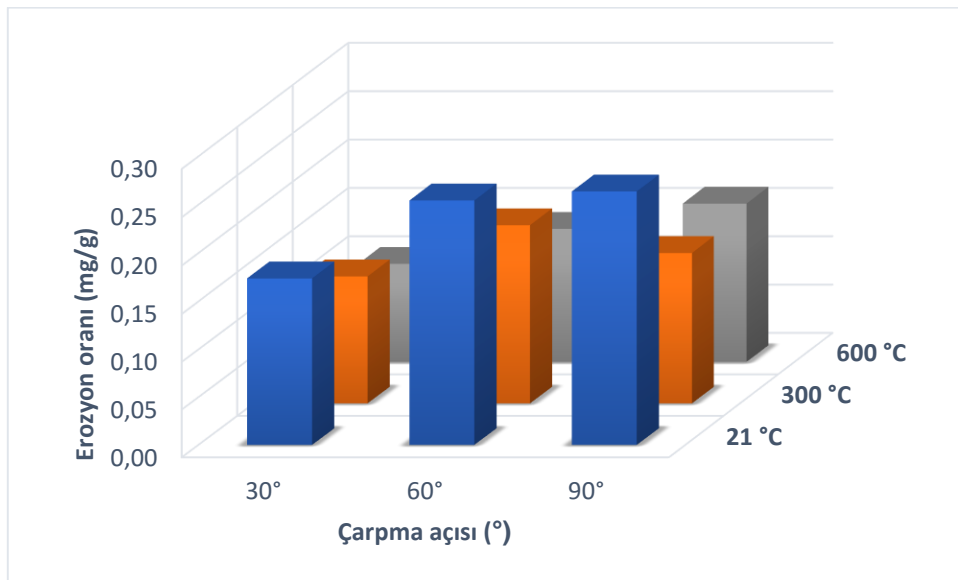
Literatürde gevrek malzemeler için karşılaşılan sonuçların yorumlanmasına ait yukarıda belirtilen teorik bilgiler ışığında NiCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamasına ait deney numunelerinin erozyon aşınma deneyleri sonrası oluşan çarpma açısına ve sıcaklığa bağlı değişimin üç eksenli erozyon oranı sütun grafiği Şekil 4.25’de verilmiştir. Grafikte en fazla erozyon oranının, sıcaklık değişimi etkinliğinde incelendiğinde oda sıcaklığında ve açı değişkenliği noktasında incelendiğinde 90° çarpma açısında meydana geldiği belirlenmiştir. En fazla erozyon oranının olduğu aşındırıcı partikül çarpma açısı olan 90° referans alınarak farklı sıcaklıklardaki erozyon aşınma durumlarında en fazla erozyon oranının 21°C’de, en az erozyon oranının da 600°C’de gerçekleştiği belirlenmiş olup aralarında 1,7 kat farklılık ortaya çıkmıştır. Seramik üst kaplamaların erozyon oranlarının sıcaklık değişimi incelendiğinde bağ kaplama numunelerine benzer şekilde artan sıcaklık ile erozyon oranlarının düştüğü gözlemlenmiştir. Bu durum gözeneklilik yoğunluğunun azaltılarak daha tok bir numune etkinliğinin sağlandığı, bunun yanında sıcaklık ve basınç varlığıyla açıklanabilir.

Üç farklı sıcaklıkta çarpma açılarındaki değişim ile erozyon oranları irdelendiğinde; 21°C sıcaklıkta yapılan deneylerde 90° çarpma açısında meydana gelen erozyon oranı, 30° çarpma açısındaki erozyon oranının 1,3 katında, 300°C’de bu oran 1,2 katında ve 600°C’de 1,01 katında gerçekleşmiştir. Artan sıcaklık ile çarpma açılarından kaynaklanan erozyon oranları arasındaki fark azalmıştır. Ayrıca 600°C’de yapılan deneylerde kaplamanın gevrek malzeme karakteristiğinden yarı sünek malzeme karakteristiğine geçtiği sonucuna varılmış olup 30° ve 90° çarpma açılarında meydana gelen erozyon oranları arasındaki farkın en az olduğu sıcaklık değeri 600°C’dir.



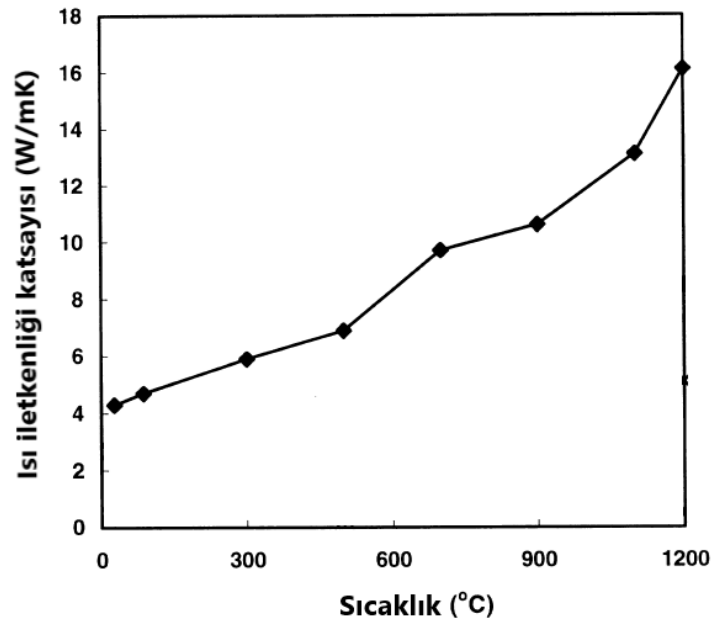
Şekil 4.25. NiCrAlY Bağ kaplamalı 8YSZ TBK kaplamaların sıcaklığa bağlı olarak değişen çarpma açısı-erozyon oranı grafiği.

NiCoCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamasına ait deney numunelerinin erozyon oranı grafiği (Şekil 4.26) incelendiğinde diğer karşılaştırma deney grubu ile benzer şekilde çarpma açısı arttıkça erozyon direncinin azaldığı yani gevrek malzeme davranışı sergilediği görülmüştür. En fazla erozyon aşınması 21°C’de ve 90° çarpma açısında meydana gelmiştir. 21°C sıcaklıkta yapılan deneylere bakıldığı zaman en fazla erozyon aşınma oranının olduğu açıda (90°), en az erozyon aşınma oranının olduğu çarpma açısına (30°) göre 1,5 katı daha fazla aşınma ile karşılaşmıştır. 300°C sıcaklıktaki erozyon aşınma değerleri incelendiği zaman en fazla erozyon aşınması 60° çarpma açısında meydana gelmiştir ve bu değer aynı sıcaklıkta meydana gelen minimum erozyon aşınmasının 1,4 katına karşılık gelmektedir. 600°C sıcaklıkta meydana gelen maksimum ve minimum erozyon aşınma oranı değerleri ise 300°C’deki erozyon aşınma durumundan farklı olarak 21°C’dekine benzer şekilde gerçekleşmiş ve maksimum erozyon oranı 90° çarpma açısında meydana gelerek aynı sıcaklıktaki minimum erozyon oranına göre 1,6 kat daha fazla olduğu bulunmuştur. Wang ve ark. (2010) yaptıkları çalışmada buhar türbinlerinde kullanılan kaplamalarda oluşan katı partikül erozyonuna sıcaklığın etkisini incelemişler ve sonuç olarak sıcaklığın etkisinin altlık malzeme ve üst kaplama arasındaki bağ kaplamaya bağlı olarak değiştiğini belirlemişlerdir. Gerçekleştirilen deneylerde de farklı bağ kaplamaya sahip aynı seramik üst kaplamaların sıcaklık ile erozyon oranı değişim seyirlerinin birbirinden farklı olması bu durum ile açıklanabilir.



Şekil 4.26. NiCoCrAlY Bağ kaplamalı 8YSZ TBK kaplamaların sıcaklığa bağlı olarak değişen çarpma açısı- erozyon oranı grafiği.

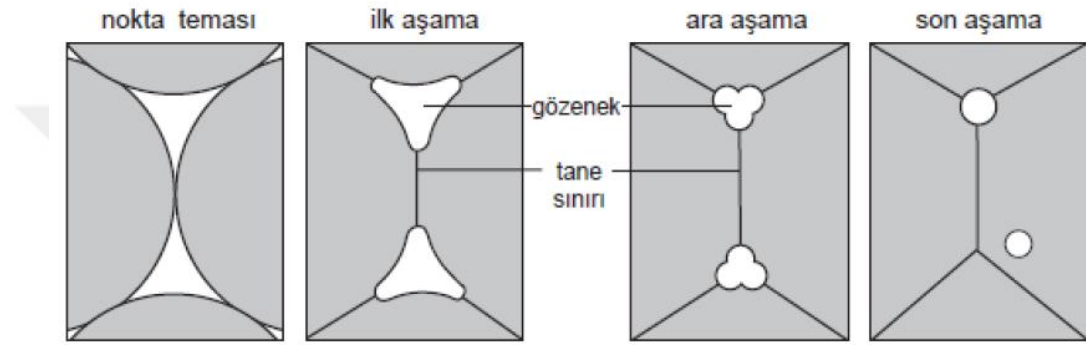
Yapılan deneyler sonucunda her iki seramik üst kaplama uygulanmış numunelerde en az erozyon oranının 600°C 'de meydana geldiği görülmüştür. Termal bariyer kaplamalar erozyon aşınmasıyla karşılaşılan çalışma şartlarında devamlı yüksek sıcaklığa maruz kaldıkları için zamanla kaplama tabakasında sıcaklık ve basınç etkisi ortaya çıkabilir. Deneysel çalışmanın sıcaklık etkisine bağlı olarak malzemenin ısı iletkenlik katsayısı artar ve bu durum yüzey enerjilerini minimize etmek için gözeneklerin ve çatlakların küreselleşmesi yanında kaplama yoğunluğunu artırıcı bir etkiye sebep olur (Zhu ve Miller, 2000). Şekil 4.27'de literatürde de kabul gören bir yorum olan sıcaklık ile NiCoCrAlY bağ kaplama malzemesinin ısı iletkenlik katsayısının değişimi verilmiştir (Khor ve Gu, 2000).



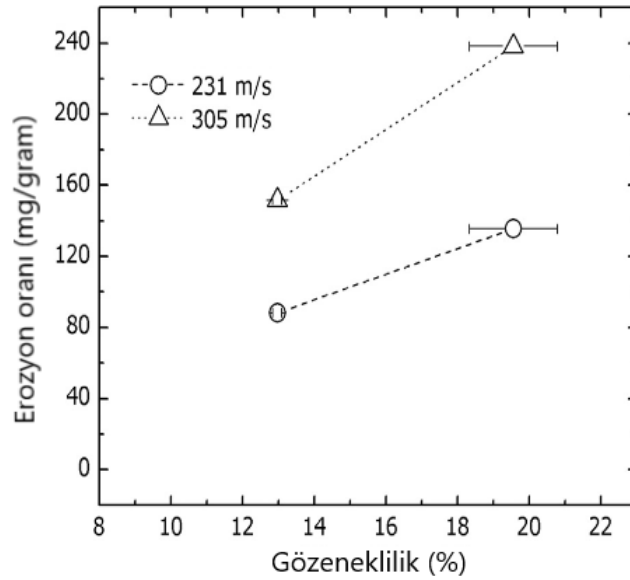
Şekil 4.27. Sıcaklık ile ısı iletkenliği katsayısı değişimi.

Sıcaklık değişiminin etkinliğinin incelendiği bu olayda tanelerin yoğunluğunun artmasıyla taneler büyümeye başlar ve yapıdaki gözeneklerin yuvarlak bir hal almasıyla olayın oluşumu Şekil 4.28'de şematik olarak gösterildiği gibi gözenekler küçülmeye başlar. Bu durum detaylandırıldığında; toz partikülleri arasındaki nokta teması sıcaklık etkisinin başlangıç aşamalarında boyun vermeye yönelir ve tane sınırını oluşturur. Zamanla, taneler arasındaki gözenekler küçülür ve gözenekler şekil bakımından daha küresel hale gelmesiyle açıklanabilir. Tez çalışması kapsamında APS yöntemi uygulanarak üretimi yapılan TBK etkisine sahip deney numunelerinin de seramik üst kaplamalarında boşluklar ve mikro çatlaklar halinde gözeneklilik içermesi durumu

düşünülerek benzer etkiyi ortaya çıkardığı şeklinde yorumlanmıştır. 600°C sıcaklıkta daha az erozyon aşınmasının görülmesi, bu sıcaklık etkisinde gözenek boyutunun ve yoğunluğunun azalması sonucu kaplanmış yüzey yoğunluğunun artmasına bağlı olarak kaplama yüzeyine çarpan katı partiküllere karşı daha dirençli bir yapı oluşmasından kaynaklanmaktadır (Zhu ve ark., 2010; Limarga ve ark., 2012). Shin ve Hamed (2018), APS yöntemi ile üretilen 7YSZ TBK'ların erozyon oranına mikro yapının etkisini inceledikleri çalışmada Şekil 4.29'da gösterildiği gibi gözeneklilik yüzdesinin artmasıyla erozyon oranının arttığını belirlemişlerdir.



Şekil 4.28. Sıcaklık etkisi ile tanelerin nokta teması sonrası gözenek yapı gelişimi (Sakarya, 2015)

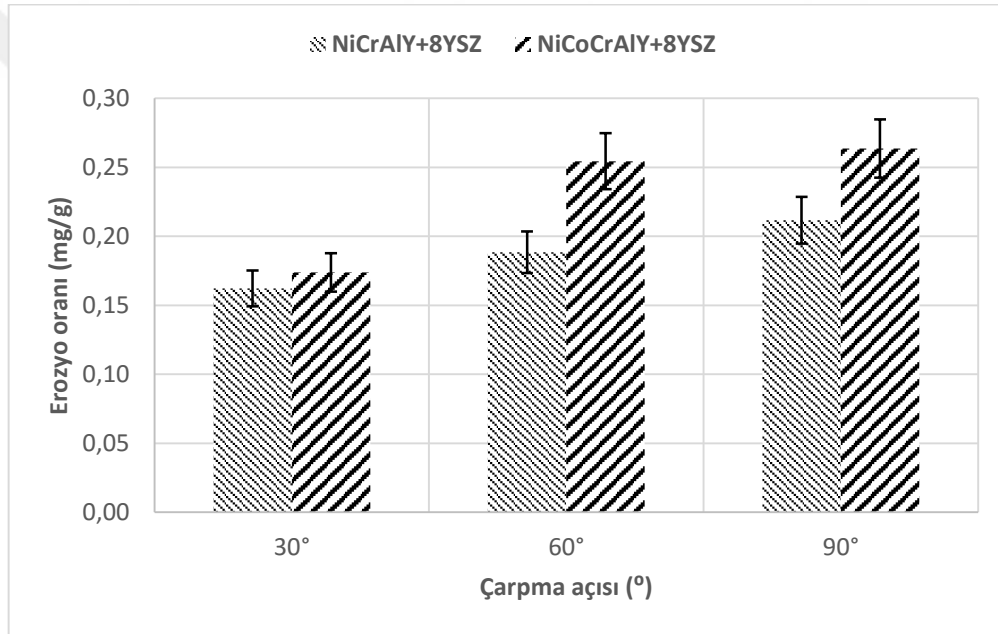


Şekil 4.29. Gözeneklilik yüzdesinin erozyon oranına etkisi.

Seramik üst kaplama uygulanmış deney numune gruplarının kendilerine ait sıcaklık-çarpma açısı ve erozyon oranı üç eksenli grafiklerinde tanımlandığı üzere bu

deney gruplarının her bir deney sıcaklığındaki birbirleri ile karşılaştırmalı iki eksenli erozyon oranı-çarpma açısı grafiklerine dönüştürülerek sonuçlar detaylandırılmıştır.

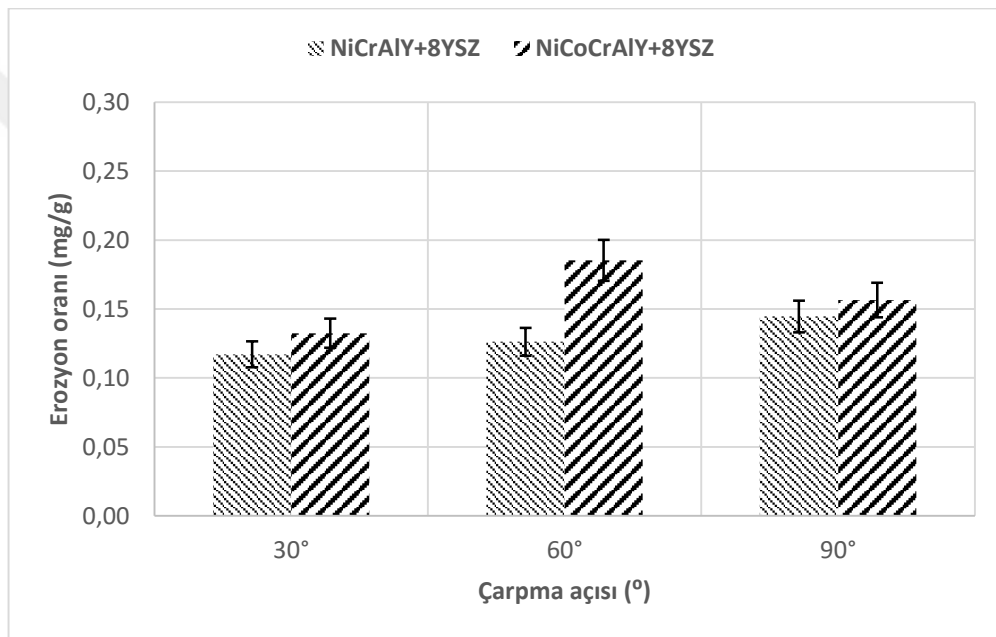
Oda sıcaklığında yapılan erozyon testlerinin her iki seramik üst kaplama numunelerinin Şekil 4.30'da verilen karşılaştırmalı erozyon oranı-çarpma açısı grafikleri incelendiğinde kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamaların bütün çarpma açılarında diğer deney grubuna göre daha fazla erozyon oranı sergilediği görülmektedir. Halbuki kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamalar, diğer numune grubuna göre sertlik ölçümlerinde daha yüksek değere sahip olmuştur. Bu durum, seramik üst kaplama ile kobalt katkılı bağ kaplama yapılmış numuneler arasında olan zayıf bağ etkisi ve gözeneklilik değerinin daha fazla olması ile açıklanabilir.



Şekil 4.30. 21°C sıcaklıkta 8YSZ TBK kaplamaların çarpma açısı- erozyon oranı ilişkisi.

Şekil 4.31'de 300°C sıcaklıkta gerçekleştirilen çarpma açısı-erozyon oranı değerlerinin her iki deney grubu için karşılaştırmalı grafiği verilmiştir. Grafikte elde edilen sonuçlar detaylandırıldığında oda sıcaklığında gerçekleştirilen deney sonuçlarına benzer şekilde kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamalar 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında daha fazla erozyon oranı sergilemiştir. Sıcaklık etkisi arttığı gibi gözenekler arası boşlukta azalmaktadır. Fakat bu durum diğer numune grubunda da benzer şekilde geliştiği için bütün açılarda en fazla erozyon oranı NiCoCrAlY+8YSZ numune grubunda gerçekleşmiştir. Sonuç verilerine göre kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamalar artan çarpma açısı ile erozyon oranı değişiminde parabolik

bir seyir göstermesine rağmen diğer numune grubu liner bir seyir göstermiştir. NiCoCrAlY+8YSZ deney numunesinde en fazla erozyon aşınması 60° aşındırıcı partikül çarpma açısında meydana gelmesi diğer numune grubunda ise en fazla erozyon oranı 90° aşındırıcı partikül çarpma açısında oluşması, iki deney numune grubunun bu sıcaklıkta ayrılan noktaları olarak göze çarpmaktadır. 300°C sıcaklıkta en fazla erozyon aşınmasının 60° çarpma açısında gerçekleşmesi ayrıca kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamaların bu sıcaklıkta gevrek malzeme davranışından çıktığını ve yarı sünek malzeme davranışı sergilediğini göstermektedir. Bu durum bağ kaplama ile seramik üst kaplama arasında termal genleşme katsayısı uyumsuzluğu ile açıklanabilir.

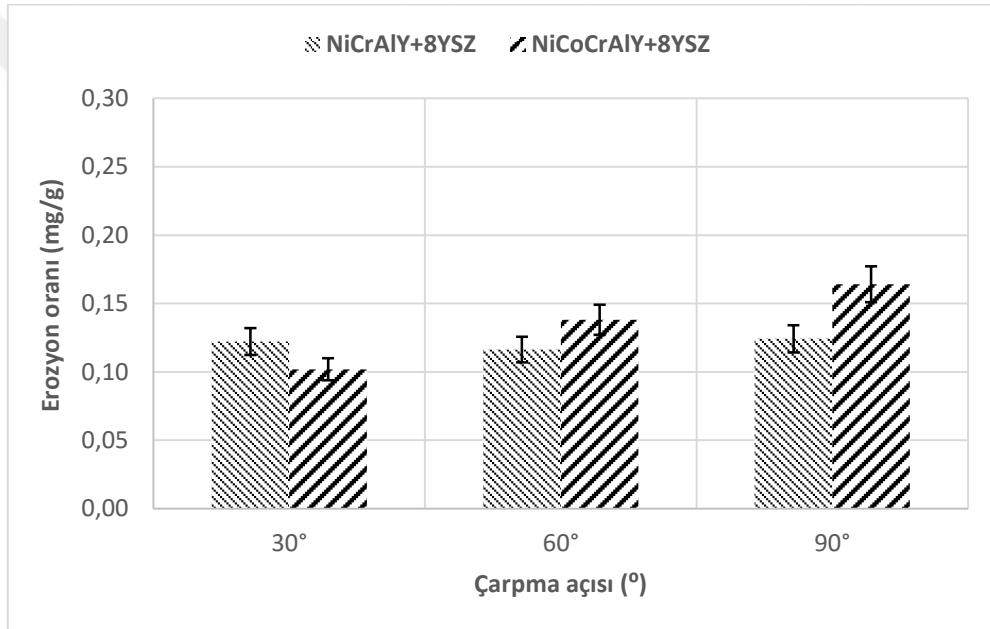


Şekil 4.31. 300°C sıcaklıkta 8YSZ TBK kaplamaların çarpma açısı- erozyon oranı ilişkisi.

600°C sıcaklıkta seramik üst kaplamaların çarpma açısı-erozyon oranı karşılaştırmalı grafiğinin verildiği Şekil 4.32'e bakıldığında kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamalar diğer sıcaklıklardaki duruma benzer şekilde kobalt katkısı olmayan bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamalardan daha fazla erozyon aşınması sergilemiştir. Sadece 30° aşındırıcı partikül çarpma açısında bu durumun tersi olmuştur. Erozyon grafiklerinin artan aşındırıcı partikül çarpma açısı ile erozyon oranı değişim seyri incelendiği zaman 300° sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerden farklı olarak bu durumda kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip seramik üst kaplamalar daha liner bir seyir izlerken diğer numune grubunda ise grafikteki eğilim biraz daha yatay bir seyir haline dönüşmüştür. Farklı sıcaklıklarda kaplama uygulanmış malzemelerin erozyon aşınma

davranışının değişen aşındırıcı partikül çarpma açısı ile değişebildiğini ve özellikle yüksek sıcaklık erozyonuna maruz kalan kaplamaların YSKPE aşınma davranışlarının farklı sıcaklıklarda daha detaylı incelenebilmesinin gerekliliğini göstermektedir.

Deneysel sonuçlar göstermiştir ki her iki seramik üst kaplama işlemi uygulanmış deney numunesi grubunda da en az erozyon direncinin 21°C oda sıcaklığında olduğu belirlenerek sıcaklığın artmasıyla yapılarında bulunan bağ kaplama malzemesine göre erozyon dirençlerinde 90° çarpma açısında NiCrAlY + 8YSZ etkisindeki seramik üst kaplamada 300°C sıcaklıkta %32, 600°C'de %42 artışa ilave olarak NiCoCrAlY + 8YSZ etkisindeki seramik üst kaplamalarda ise 300°C sıcaklıkta %41, 600°C'de %38 artış olduğu belirlenmiştir.



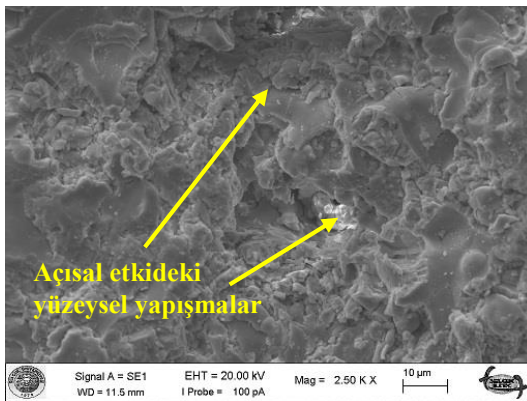
Şekil 4.32. 600°C sıcaklıkta 8YSZ TBK kaplamaların çarpma açısı- erozyon oranı ilişkisi.

Ayrıca yapılan deneylerden elde edilen grafikler irdelendiğinde kobalt elementi katkısındaki seramik üst kaplamalı deney numunelerinde bu elementin katkısı olmayan deney numunelerine göre sıcaklık değişkenliğine ait karşılaştırmalar maksimum erozyon aşınmasının gerçekleştiği 90° çarpma açısında birbirlerine göre oranlandığında 600°C sıcaklık değerinde erozyon direncinde en fazla azalma gözlemlenerek erozyon oranınının 1,32 kat artış sağladığı hesaplanmıştır. Elde edilen bu sonuç göstermiştir ki farklı bağ kaplama formuna, bununla birlikte aynı seramik üst kaplama bileşimine sahip TBK'ların sıcaklık ile erozyon oranı değişim seyirlerinin birbirinden farklı olması bağ kaplamaların TBK malzemelerindeki önemini ortaya koymuştur.

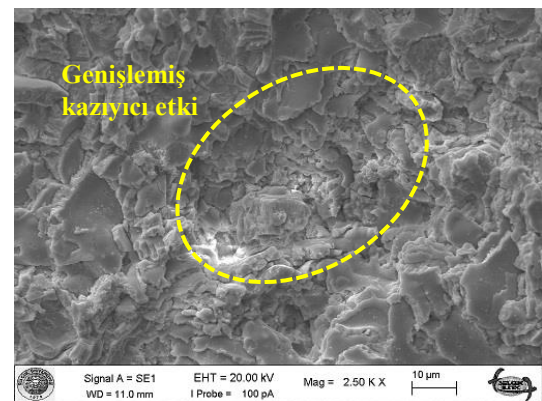
4.2.3. Seramik Üst Kaplamaların SEM Görüntülerinin Analizleri

Katı partikül erozyon aşınma deneylerinin yüksek sıcaklık ve hız etkinliği üzerine yapılan bu çalışmada seramik üst kaplamaların aşınma sonrasındaki SEM görüntüleri incelenerek çarpma açısı ve test sıcaklığının kaplanmış malzeme yüzeyi üzerinde oluşturduğu deformasyonlara ait görüntüler elde edilmiştir.

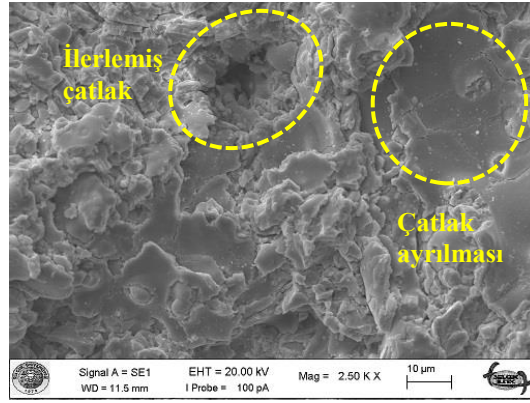
Bağ kaplanmış numunelerde olduğu gibi seramik üst kaplamaların SEM görüntülerinde de öncelikli olarak sıcaklık etkinliğinin göz önüne alınmadığı yani 21°C’de Inconel 718 altlık malzeme üzerine bağ kaplama olarak NiCrAlY ve seramik üst kaplama olarak $Zr_2O-8Y_2O_3$ elementlerini barındıran kaplamalı deney numunelerinin 30°, 60° ve 90° aşındırıcı partikül çarpma açılarındaki yüzey deformasyonlarına ait SEM görüntüleri Şekil 4.33’de verilmiştir. Bu SEM görüntüsünde en fazla erozyon aşınmasının olduğu sıcaklıkta açı değişkenliğinin aşınan yüzey üzerindeki etkisi incelenmiştir. Eğik açıda (30° çarpma açısında) çarpmanın yüzey üzerinde etkisinin verildiği SEM görüntüsü incelendiğinde açısal olarak yüzeye çarpan aşındırıcı partiküllerin yüzeyden malzeme kaldırmak yerine kırılarak yüzeye yapıştıkları görülmüştür. Yüzeye daha dik açıda yani 60° çarpma açısında çarpan aşındırıcı partiküller ise 30° çarpma açısına göre yüzeyde daha fazla kazıyıcı etki göstererek daha fazla aşınmanın olmasına neden olmuşlardır. En fazla aşınmanın görüldüğü 90° çarpma açısında ise malzemenin gevrek davranış sergilemesine bağlı olarak aşındırıcı partikül ile temas noktalarında ortanca çatlaklar oluşarak daha sonra bu çatlakların yerini geniş oyukların aldığı görülmüştür.



a)



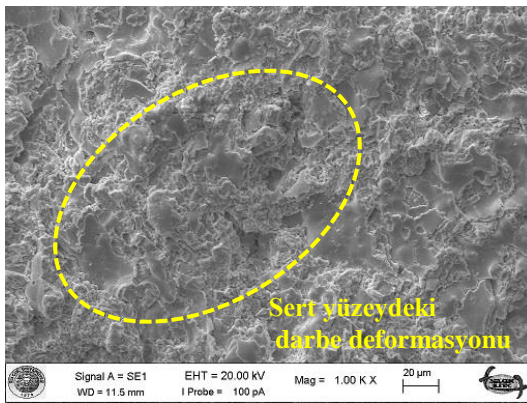
b)



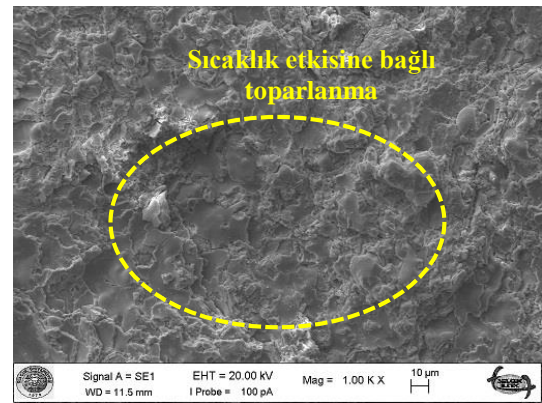
c)

Şekil 4.33. NiCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamaların 21°C'deki çarpma açılarına ait SEM görüntüleri; a) 30°, b) 60° ve c) 90°.

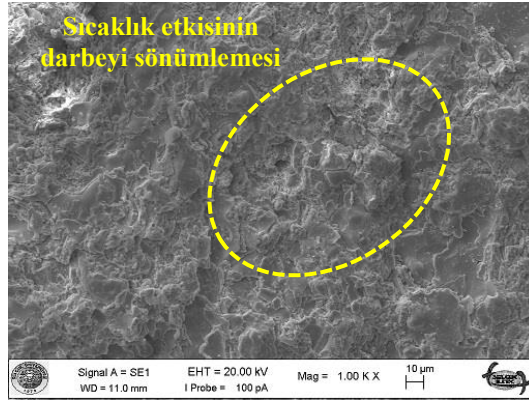
En fazla aşınmanın meydana geldiği sıcaklıktaki açısal değişimin yüzey deformasyonuna etkisi incelendikten sonra en fazla erozyon aşınmasının olduğu 90° çarpma açısında, sıcaklığın etkisini görmek amacıyla NiCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamaların üç farklı sıcaklıkta meydana gelen aşınma yüzeyi SEM görüntüleri Şekil 4.34'de verilmiştir. Erozyon aşınma deneyleri sonrası en fazla aşınmanın meydana geldiği sıcaklık olan 21°C'de numune yüzeylerindeki gözenekliliğin etkisi de göz önüne alınarak incelendiğinde daha geniş alanda darbe deformasyonu sonucunda ortaya çıkan aşınma izleri belirgin bir şekilde görülmüştür. Oda sıcaklığından 300°C sıcaklığa çıkılarak gerçekleştirilen deneylerde sıcaklığın etkisiyle aşınan numune yüzeylerinde 21°C'ye nispeten daha az erozyon aşınması olmasında ısıl etkiye bağlı toparlanmanın etkisi görülmüştür. En az erozyon aşınmasının olduğu seramik malzemenin ergime sıcaklığının yaklaşık dörtte bir değerine karşılık gelen 600°C'de ise sıcaklık etkisinde meydana gelen deformasyon pekleşmesi ve sıcaklık etkisinin bir sonucu olarak gözeneklerin de küçülmesiyle yüzeyin darbeyi sönmlediği belirlenmiştir.



a)



b)



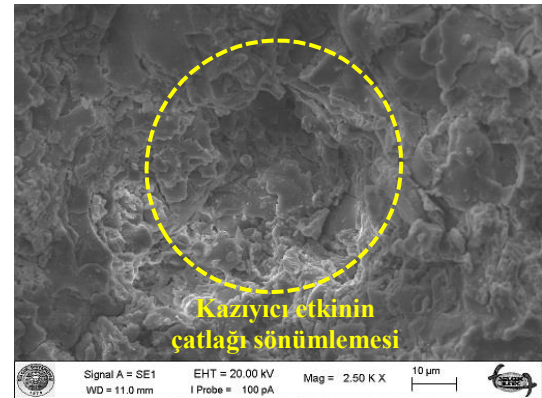
c)

Şekil 4.34. NiCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamaların 30° çarpma açısındaki sıcaklık değişimine ait SEM görüntüleri; a) 21°C, b) 300°C ve c) 600°C.

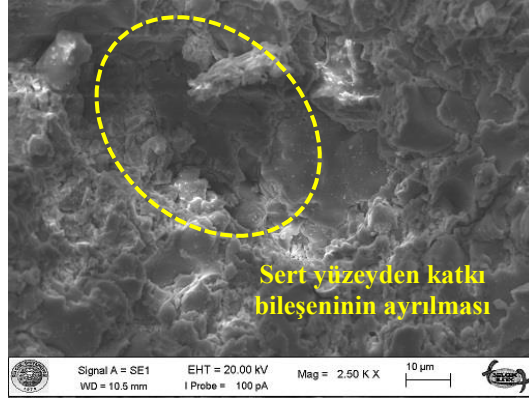
NiCoCrAlY + 8YSZ numunelerine ait en fazla aşınmanın gerçekleştiği sıcaklıkta açı değişkenliği ile yüzey deformasyonlarının incelendiği SEM görüntüsü Şekil 4.35'de verilmiştir. En az aşınmanın yaşandığı 30° çarpma açısı SEM görüntüsüne bakıldığında aşındırıcı partiküllerin sert seramik yüzeyine çarpmasıyla kazıyıcı etki değil kayma etkisiyle yüzeyden ayrıldığı, bu durumun da aşınmayı azaltıcı etki yaptığı belirlenmiştir. 60° çarpma açısında yüzeye etki eden aşındırıcı partiküller, temas noktası altında oluşan ortanca çatlakların ilerlemesini kazıyıcı etki ile önlediği yorumu yapılmıştır. En fazla erozyon aşınmasının gerçekleştiği 90° çarpma açısında aşındırıcı partiküller temas noktası altında ortanca çatlakların oluşmasına ve çatlakların yatay olarak ilerlemesine bağlı olarak kaplama etkisiyle seramik malzeme yüzeyindeki katkı maddelerinin ayrılmasıyla süreç sonuçlanmıştır.



a)



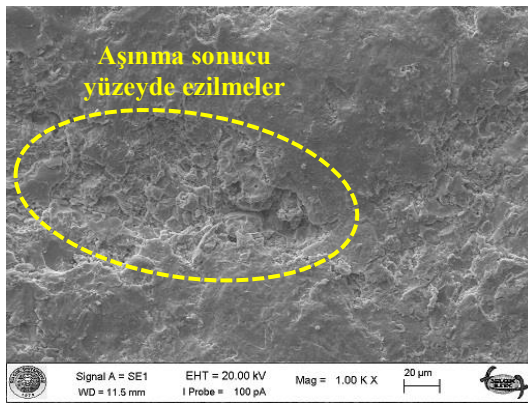
b)



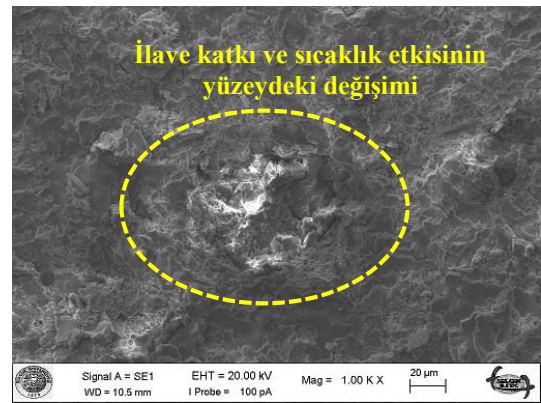
c)

Şekil 4.35. NiCoCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamaların 21°C'deki çarpma açılarında ait SEM görüntüleri; a) 30°, b) 60° ve c) 90°.

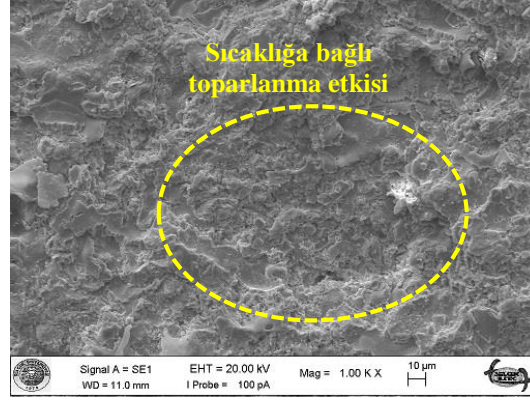
Şekil 4.36'da NiCoCrAlY + 8YSZ numune grubunun 90° çarpma açısında farklı sıcaklıklarda maruz kaldıkları YSKPE aşınma durumlarına ait deney numunelerinin yüzeylerinden alınan SEM görüntüleri verilmiştir. Oda sıcaklığında meydana gelen deneyler sonrasında numune yüzeylerinde aşındırıcı partiküllerin gevrek yüzeye çarpması sonrasında yüzeyde oluşan ezilmeler görülmüştür. 300°C sıcaklıkta gerçekleştirilen deneylerde malzeme yüzeyi toparlanma göstererek aşınmaya karşı belirli bir direnç göstermiştir. Toparlanma etkisi en fazla 600°C sıcaklıkta yapılan deneylerde sıcaklık etkisinin ve tane sınırı kaymalarının artmasıyla kendini göstermiştir. Bu durumda 600°C'de diğer sıcaklıklara göre daha fazla erozyon direncinin ortaya çıkmasına neden olmuştur.



a)



b)



c)

Şekil 4.36. NiCoCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamaların 30° çarpma açısındaki sıcaklık değişimine ait SEM görüntüleri; a) 21°C, b) 300°C ve c) 600°C.

5. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

5.1 Sonuçlar

Bu doktora tez çalışması kapsamında yüksek sıcaklık şartlarında katı partikül erozyon aşınma deneylerinin laboratuvar koşullarında gerçekleştirilebileceği ve ASTM G211-14 uluslararası kabul görmüş standardı ile uyumlu bir deney seti tasarımı ve üretimi yapılmıştır. Yüksek Sıcaklık Katı Partikül Erozyon aşınma test cihazının ülkemizde ilk kez kullanılabilirliğini sağlamak amacıyla bu test cihazının tasarımı ve üretimi aşaması önceliklendirilerek ASTM G211-14 standardı temel parametreleri çerçevesinde YSKPE aşınma test cihazı 5 farklı tasarımda nihai şeklini almış olup numune tutucunun belirlenmesi ve partikül besleme ünitesinin oluşturulmasında da birkaç farklı tasarım revizyonu gerçekleştirilmiştir. Üretimi tamamlanan bu deney seti ile gaz türbinlerinde temel bileşen olarak kullanılan türbin motor bileşenleri ve enerji çevriminde yaygın olarak kullanılan oldukça yüksek teknolojiye sahip yüksek sıcaklık şartlarında çalışan termo mekanik yüklemelere maruz kalan malzemelerin erozyon aşınma testlerinin yapılabilmesi sağlanmıştır.

Enerji dönüşüm santralleri ile gaz türbinlerinde yaygın olarak kullanılan ve iki katmandan oluşan termal bariyer kaplama sistemleri NiCrAlY ve NiCoCrAlY'dan oluşan bağ kaplama uygulamaları ve $ZrO_2 + 8Y_2O_3$ bileşenlerinden oluşan seramik üst kaplama alternatiflerinin ekonomik ve TBK'lara düşük termal iletkenlik özelliği sağlamasından dolayı yaygın kullanımı olan APS yöntemi ile tek katmandan iki grup, çift katmandan da iki grup olacak şekilde dört grup halinde üretimi yaptırılmış ve erozyon aşınma deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu deney grupları, üretimi gerçekleştirilen YSKPE aşınma test cihazı ile farklı sıcaklık ve aşındırıcı partikül çarpma açıları ile sabit partikül çarpma hızı ve partikül büyüklüğündeki erozyon aşınma testlerine tabi tutularak aşağıda verilen sonuçlar elde edilmiştir.

- NiCrAlY ve NiCoCrAlY bağ kaplama uygulanmış numuneler erozyon aşınmasının sünek malzeme uyumluluğu davranışı gösterirken bu bağ kaplamalar üzerine 8YSZ seramik üst kaplama uygulanmış numuneler ise erozyon aşınmasının gevrek malzeme uyumluluğu davranışı göstermişlerdir.
- NiCrAlY bağ kaplamalar en fazla erozyon aşınmasını $21^{\circ}C$ 'de gösterirken NiCoCrAlY bağ kaplamalar ise en fazla erozyon aşınmasını termal genleşme katsayısının fazla olmasından dolayı $300^{\circ}C$ 'de olduğu belirlenmiştir.

- Kobalt katkılı bağ kaplamalar 300°C hariç diğer iki sıcaklık (21°C ve 600°C) değerlerinde kobalt katkısı olmayan bağ kaplama numunelerine göre gözeneklilik etkisinden dolayı daha az erozyon oranı sergilemişlerdir.
- Her iki seramik üst kaplama işlemi uygulanmış deney numunesi grubunda da en az erozyon direncinin 21°C oda sıcaklığında ortaya çıktığı sonucuna varılarak sıcaklığın artmasıyla erozyon dirençlerinde artış gözlemlenmiştir.
- Farklı bağ kaplama formuna, bununla birlikte aynı seramik üst kaplama bileşimine sahip TBK'lar farklı sıcaklık değerlerinde ve aynı erozyon test şartlarında farklı erozyon oranı değişimi göstermişlerdir. Bu durum bağ kaplamaların TBK malzemelerindeki önemini ortaya koymuştur.
- Kobalt katkılı bağ kaplamaya sahip TBK'lar daha fazla erozyon oranı sergileyerek, seramik üst kaplama ile kobalt katkılı bağ kaplamalar ara yüzeyinde daha düşük tutunabilirliğe sahip olduğu sonucuna varılmıştır.
- Erozyon oranlarının belirlenerek farklı kaplama işlem uygulamalarına sahip deney numunelerinin birbirleri arasındaki sonuçlarının farklılıklarında baskın role sahip olduğu düşünülen sertlik, yüzey pürüzlülüğü ve gözeneklilik değerlerindeki farklılıklar göz önüne alınarak numuneler arasındaki termal bariyer kaplama etkinliklerinin önemli oranda değiştiği sonucuna varılmıştır.

5.2 Öneriler

Bu tez çalışması kapsamında farklı elemental içeriğe sahip APS yöntemi ile üretilen kaplamaların YSKPE aşınma davranışlarının karşılaştırmalı incelenmesi yapılsa da kaplama malzemesi bilimi ve üretim yöntemlerinin devamlı gelişmesinden dolayı farklı kaplama yöntemleri (HVOF, VPS, CGDS ve EB-PVD) kullanılarak YSKPE aşınma deneylerine ait yöntem farklılıkları belirlenebilir.

Kaplamaların mikroyapısal ve mekanik özelliklerini daha da iyileştirmek amacıyla kaplama parametrelerine ait optimizasyon çalışmaları yürütülebilir.

Seramik ve bağ kaplama arayüzeylerinin mekanik özelliklerini belirlemek için nano indentasyon testleri yapılabilir ve böylece seramik kaplamada bulunan splatların şekil ve büyüklüklerinin seramik kaplama tokluk değeri üzerindeki etkisi incelenebilir.

Termal bariyer kaplamaların çalışma koşullarında erozyon aşınmasına maruz kalmakla birlikte termal yorulmaya da maruz kalabilmektedirler. Bu nedenle TBK'ların termomekanik yorulma (TMF) testlerinin yapılması ile TBK'ların ömür tayininin belirlenmesi üzerine çalışmalar yürütülebilir.

KAYNAKLAR

- Ahrens, M., Vaßen, R., Stöver, D. ve Lampenscherf, S., 2004, Sintering and creep processes in plasma-sprayed thermal barrier coatings, *Journal of thermal spray technology*, 13 (3), 432-442.
- Altuncu, E., 2011, YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması, Doktora Tezi, *Sakarya Üniversitesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, 281.
- ASTM-G76, 2013, Standard Test Method for Conducting Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. ASTM G76-13. West Conshohocken, PA.
- ASTM_G211-14, 2014, Standard Test Method for Conducting Elevated Temperature Erosion Tests by Solid Particle Impingement Using Gas Jets. West Conshohocken, PA
- Avcu, E., Fidan, S., Bora, M. Ö., Çoban, O., Taşkıran, İ. ve Sinmazçelik, T., 2013, Solid particle erosive wear behavior of glass mat reinforced PPS composites: influence of erodent particle size, pressure, particle impingement angle, and velocity, *Advances in Polymer Technology*, 32 (S1), E386-E398.
- Bagci, M., Imrek, H. ve Khalfan, O. M., 2015, Optimization of test parameters that influence erosive wear behaviors of glass fiber-reinforced epoxy composites by using the Taguchi method, *Journal of Tribology*, 137 (1), 011602.
- Bakan, E., 2015, Yttria-Stabilized Zirconia/Gadolinium Zirconate Double-Layer Plasma-Sprayed Thermal Barrier Coating Systems (TBCs), FZJ-2015-07788, *Werkstoffsynthese und Herstellungsverfahren*, p.
- Birks, N., Meier, G. H. ve Pettit, F. S., 2006, Introduction to the high temperature oxidation of metals, Cambridge University Press, p.
- Bons, J. P., Taylor, R. P., McClain, S. T. ve Rivir, R. B., 2001, The many faces of turbine surface roughness, *ASME turbo expo 2001: Power for land, sea, and air*, V003T001A042-V003T001A042.
- Bose, S. ve DeMasi-Marcin, J., 1997, Thermal barrier coating experience in gas turbine engines at Pratt & Whitney, *Journal of thermal spray technology*, 6 (1), 99-104.
- Branco, J. R. T., Gansert, R., Sampath, S., Berndt, C. C. ve Herman, H., 2004, Solid particle erosion of plasma sprayed ceramic coatings, *Materials Research*, 7 (1), 147-153.
- Brendel, T., Heutling, F., Eichmann, W., Ücker, M. ve Uihlein, T., 2008, MTU Solutions Against Erosive Attack and Loss of EGT Margin in Turbo Engines—ERCoatnt, *The Engine Yearbook 2008*.
- Cao, X., Vassen, R. ve Stoever, D., 2004, Ceramic materials for thermal barrier coatings, *Journal of the European Ceramic Society*, 24 (1), 1-10.
- Cernuschi, F., Lorenzoni, L., Capelli, S., Guardamagna, C., Karger, M., Vaßen, R., Von Niessen, K., Markocsan, N., Menuey, J. ve Giolli, C., 2011, Solid particle erosion of thermal spray and physical vapour deposition thermal barrier coatings, *Wear*, 271 (11-12), 2909-2918.
- Cernuschi, F., Guardamagna, C., Capelli, S., Lorenzoni, L., Mack, D. ve Moscatelli, A., 2016, Solid particle erosion of standard and advanced thermal barrier coatings, *Wear*, 348, 43-51.
- Cernuschi, F., Rothleitner, C., Clausen, S., Neuschaefer-Rube, U., Illeemann, J., Lorenzoni, L., Guardamagna, C. ve Larsen, H. E., 2017, Accurate particle speed prediction by improved particle speed measurement and 3-dimensional particle size and shape characterization technique, *Powder technology*, 318, 95-109.

- Chen, W., Wu, X., Marple, B., Nagy, D. ve Patnaik, P., 2008, TGO growth behaviour in TBCs with APS and HVOF bond coats, *Surface and Coatings Technology*, 202 (12), 2677-2683.
- Clarke, D. R., Oechsner, M. ve Padture, N. P., 2012, Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines, *MRS bulletin*, 37 (10), 891-898.
- Conti, J., Holtberg, P., Diefenderfer, J., LaRose, A., Turnure, J. T. ve Westfall, L., 2016, International energy outlook 2016 with projections to 2040, *USDOE Energy Information Administration (EIA), Washington, DC (United States*
- Council, N. R., 1977, Erosion Control in Energy Systems: Report of Committee on Conservation of Materials in Energy Systems Through the Reduction of Erosion, National Materials Advisory Board, Commission on Sociotechnical Systems, National Research Council, National Academy of Sciences, p.
- Crook, P. ve Farmer, H., 1992, ASM Handbook Vol 18: Friction, *Lubrication and Wear Technology*, ASM, 759.
- Çoban, O., Özgür Bora, M., Fidan, S., Kutluk, T. ve Sinmazçelik, T., 2018, Heat treatment effect on solid particle erosion properties of polyphenylene sulfide composites reinforced with silane coupled volcanic ash particles, *Polymer Composites*, 39 (5), 1638-1646.
- Davis, J. R., 2004, Handbook of thermal spray technology, ASM international, p.
- Dechamps, P., 2006, The EU research strategy towards zero emission fossil fuel power plants, *Materials for power engineering 2006*, 25-36.
- Dhar, S., Krajac, T., Ciampini, D. ve Papini, M., 2005, Erosion mechanisms due to impact of single angular particles, *Wear*, 258 (1-4), 567-579.
- Diamond, S., 2000, Mercury porosimetry: an inappropriate method for the measurement of pore size distributions in cement-based materials, *Cement and concrete research*, 30 (10), 1517-1525.
- Dunn, M. G., Baran, A. J. ve Miatch, J., 1996, Operation of gas turbine engines in volcanic ash clouds, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 118 (4), 724-731.
- Feuerstein, A. ve Kleyman, A., 2009, Ti–N multilayer systems for compressor airfoil sand erosion protection, *Surface and Coatings Technology*, 204 (6), 1092-1096.
- Finnie, I., 1960, Erosion of surfaces by solid particles, *Wear*, 3 (2), 87-103.
- Forecast_International, 2018a, Industrial & Marine Turbine Forecast (Gas & Steam), https://www.forecastinternational.com/fistore/prod.cfm?FISSYS_RECNO=4&title=Industrial-and-Marine-Turbine-Forecast-Gas-and-Steam: [05.07.2018].
- Forecast_International, 2018b, Aviation Gas Turbine Forecast, https://www.forecastinternational.com/fistore/prod.cfm?FISSYS_RECNO=10&title=Aviation-Gas-Turbine-Forecast: [05.07.2018].
- Fry, A., Lovelock, P., Smith, N., Gee, M. ve Gant, A., 2017, An innovative high temperature solid particulate erosion testing system, *Wear*, 376, 458-467.
- Gil, A., Shemet, V., Vassen, R., Subanovic, M., Toscano, J., Naumenko, D., Singheiser, L. ve Quadackers, W., 2006, Effect of surface condition on the oxidation behaviour of MCrAlY coatings, *Surface and Coatings Technology*, 201 (7), 3824-3828.
- Gohardani, O., 2011, Impact of erosion testing aspects on current and future flight conditions, *Progress in Aerospace Sciences*, 47 (4), 280-303.
- Gudmundsson, B. ve Jacobson, B., 1989, Yttrium oxides in vacuum-plasma-sprayed CoNiCrAlY coatings, *Thin Solid Films*, 173 (1), 99-107.
- Gundogdu, M. Y., 2004, Design improvements on rotary valve particle feeders used for obtaining suspended airflows, *Powder technology*, 139 (1), 76-80.

- Hamed, A., Tabakoff, W. ve Singh, D., 1998, Modeling of compressor performance deterioration due to erosion, *International Journal of Rotating Machinery*, 4 (4), 243-248.
- Hamed, A., Tabakoff, W. ve Wenglarz, R., 2006, Erosion and deposition in turbomachinery, *Journal of propulsion and power*, 22 (2), 350-360.
- Hamed, A. A., Tabakoff, W., Rivir, R. B., Das, K. ve Arora, P., 2005, Turbine blade surface deterioration by erosion, *Journal of turbomachinery*, 127 (3), 445-452.
- Hasselman, D., Johnson, L. F., Bentsen, L. D., Syed, R., Lee, H. L. ve Swain, M. V., 1987, Thermal Diffusivity and Conductivity of Dense Polycrystalline ZrO, *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 66 (5), 799-806.
- Heberlein, J. V., Fauchais, P. ve Boulos, M. I., 2014, *Thermal spray fundamentals: From powder to part*, Springer, p.
- Hutchings, I., 1979, Mechanisms of the erosion of metals by solid particles, In: *Erosion: prevention and useful applications*, Eds: ASTM International, p.
- Hutchings, I. ve Shipway, P., 2017, *Tribology: friction and wear of engineering materials*, Butterworth-Heinemann, p.
- Hutchings, M., 1983, Introduction to the microscopy of erosion, *Journal of microscopy*, 130 (3), 331-338.
- Imrek, H., Bagci, M. ve Khalfan, O. M., 2011, Solid particle erosion as influenced by tensile axial loads, *Tribology Transactions*, 54 (5), 779-783.
- Janos, B., Lugscheider, E. ve Remer, P., 1999, Effect of thermal aging on the erosion resistance of air plasma sprayed zirconia thermal barrier coating, *Surface and Coatings Technology*, 113 (3), 278-285.
- Jena, A. ve Chaturvedi, M., 1984, The role of alloying elements in the design of nickel-base superalloys, *Journal of Materials Science*, 19 (10), 3121-3139.
- Khor, K. ve Gu, Y., 2000, Thermal properties of plasma-sprayed functionally graded thermal barrier coatings, *Thin Solid Films*, 372 (1-2), 104-113.
- Kuroda, S. ve Clyne, T., 1991, The quenching stress in thermally sprayed coatings, *Thin Solid Films*, 200 (1), 49-66.
- Kutz, M., 2018, *Handbook of environmental degradation of materials*, William Andrew, p.
- Lawn, B. ve Swain, M., 1975, Microfracture beneath point indentations in brittle solids, *Journal of Materials Science*, 10 (1), 113-122.
- Lee, K. N., 2006, Protective coatings for gas turbines, *The gas turbine handbook*, 4 (2).
- Levy, A. V., 1995, *Solid particle erosion and erosion-corrosion of materials*, Asm International, p.
- Limarga, A. M., Shian, S., Baram, M. ve Clarke, D. R., 2012, Effect of high-temperature aging on the thermal conductivity of nanocrystalline tetragonal yttria-stabilized zirconia, *Acta Materialia*, 60 (15), 5417-5424.
- Luo, J., Stevens, R. ve Taylor, R., 1997, Thermal diffusivity/conductivity of magnesium oxide/silicon carbide composites, *Journal of the American Ceramic Society*, 80 (3), 699-704.
- Maricocchi, A., Bartz, A. ve Wortman, D., 1997, PVD TBC experience on GE aircraft engines, *Journal of thermal spray technology*, 6 (2), 193-198.
- Meier, G. ve Pettit, F., 1992, The oxidation behavior of intermetallic compounds, In: *High Temperature Aluminides and Intermetallics*, Eds: Elsevier, p. 548-560.
- Metals, H. T., 2019, Inconel 718 Technical Data, <http://www.hightempmetals.com/techdata/hitempInconel718data.php>: [18.04.2019].

- Metco, O., 2016, An Introduction to Thermal Spray. BRO-0005.6_Thermal_Spray_Brochure_EN. metco, O.
- Mikijelj, B. ve Varela, J., 1991, Equivalence of surface areas determined by nitrogen adsorption and by mercury porosimetry, *American Ceramic Society Bulletin*, 70 (5), 829-831.
- Miller, R. A., 1997, Thermal barrier coatings for aircraft engines: history and directions, *Journal of thermal spray technology*, 6 (1), 35.
- Mishra, S. B., Prakash, S. ve Chandra, K., 2006, Studies on erosion behaviour of plasma sprayed coatings on a Ni-based superalloy, *Wear*, 260 (4), 422-432.
- Mitchell, H. ve Gilmore, F., 1982, Dust-cloud effects on aircraft engines: emerging issues and new damage mechanisms, *Paper No. RDA-TR-120012-001*.
- Newcomb, S., Dunin-Borkowski, R., Boothroyd, C., Czyska-Filemonowicz, A., Clemens, D. ve Quadackers, W., 1996, A grain boundary study of the aluminium oxide formed on MA 956 of different yttria contents, *Microscopy of Oxidation--3*, 166-176.
- Nicholls, J. R., Jaslier, Y. ve Rickerby, D., 1997, Erosion and foreign object damage of thermal barrier coatings, *Materials science forum*, 935-948.
- Nijdam, T. ve Sloof, W., 2007, Effect of reactive element oxide inclusions on the growth kinetics of protective oxide scales, *Acta Materialia*, 55 (17), 5980-5987.
- Nithin, H., Desai, V. ve Ramesh, M., 2017, Elevated Temperature Solid Particle Erosion Performance of Plasma-Sprayed Co-based Composite Coatings with Additions of Al₂O₃ and CeO₂, *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26 (11), 5251-5261.
- Novak, R., 1994, Coating development and use: case studies, *Presentation to the Committee on Coatings for High-Temperature Structural Materials, National Materials Advisory Board, National Research Council, Irvine, California, April*, 18-19.
- Nozahic, F., Monceau, D. ve Estournès, C., 2016, Thermal cycling and reactivity of a MoSi₂/ZrO₂ composite designed for self-healing thermal barrier coatings, *Materials & Design*, 94, 444-448.
- Oka, Y., Mihara, S. ve Yoshida, T., 2009, Impact-angle dependence and estimation of erosion damage to ceramic materials caused by solid particle impact, *Wear*, 267 (1-4), 129-135.
- Padture, N. P., Gell, M. ve Jordan, E. H., 2002, Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications, *Science*, 296 (5566), 280-284.
- Pawlowski, L., Lombard, D. ve Fauchais, P., 1985, Structure- thermal properties—relationship in plasma sprayed zirconia coatings, *Journal of Vacuum Science & Technology A: Vacuum, Surfaces, and Films*, 3 (6), 2494-2500.
- Rajendran, R., 2012, Gas turbine coatings—An overview, *Engineering Failure Analysis*, 26, 355-369.
- Rezanka, S., Mack, D. E., Mauer, G., Sebold, D., Guillon, O. ve Vaßen, R., 2017, Investigation of the resistance of open-column-structured PS-PVD TBCs to erosive and high-temperature corrosive attack, *Surface and Coatings Technology*, 324, 222-235.
- Rodert, L. A. ve Garrett, F. B., 1955, Ingestion of foreign objects into turbine engines by vortices.
- Ruff, A. ve Ives, L., 1975, Measurement of solid particle velocity in erosive wear, *Wear*, 35 (1), 195-199.

- Sakarya, 2015, Toz Malzeme Teknolojisi Sinterleme, http://content.lms.sabis.sakarya.edu.tr/Uploads/48939/37455/sinterleme_2015.pdf : [08.08.2019].
- Schell, J., Thorn, W., Lasconde, M., Hein, G., Klein, M. ve Mendez, M., 2004, Erosion Durability Improvement of the T64 Engine for Military Helicopters, *AHS 60th Annual Forum, Baltimore, MD June*, 7-10.
- Schmitt, M. P., Rai, A. K., Zhu, D., Dorfman, M. R. ve Wolfe, D. E., 2015, Thermal conductivity and erosion durability of composite two-phase air plasma sprayed thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, 279, 44-52.
- Schmitt, M. P., Harder, B. J. ve Wolfe, D. E., 2016, Process-structure-property relations for the erosion durability of plasma spray-physical vapor deposition (PS-PVD) thermal barrier coatings, *Surface and Coatings Technology*, 297, 11-18.
- Schulz, U., Leyens, C., Fritscher, K., Peters, M., Saruhan-Brings, B., Lavigne, O., Dorvaux, J.-M., Poulain, M., Mévrel, R. ve Caliez, M., 2003, Some recent trends in research and technology of advanced thermal barrier coatings, *Aerospace Science and technology*, 7 (1), 73-80.
- Shillington, E. ve Clarke, D., 1999, Spalling failure of a thermal barrier coating associated with aluminum depletion in the bond-coat, *Acta Materialia*, 47 (4), 1297-1305.
- Shin, D. ve Hamed, A., 2018, Influence of micro-structure on erosion resistance of plasma sprayed 7YSZ thermal barrier coating under gas turbine operating conditions, *Wear*, 396, 34-47.
- Sims, C. T., Stoloff, N. S. ve Hagel, W. C., 1987, superalloys II, Wiley New York, p.
- Sınmazçelik, T. ve Taşkıran, İ., 2007, Erosive wear behaviour of polyphenylenesulphide (PPS) composites, *Materials & Design*, 28 (9), 2471-2477.
- Sınmazçelik, T., Fidan, S. ve Günay, V., 2008, Residual mechanical properties of carbon/polyphenylenesulphide composites after solid particle erosion, *Materials & Design*, 29 (7), 1419-1426.
- Sirs, R., 1994, The operation of gas turbine engines in hot & sandy conditions-royal air force experiences in the gulf war, *AGARD Conference Proceedings*, 2-1.
- Smialek, J., Jayne, D., Schaeffer, J. ve Murphy, W., 1994, Effects of hydrogen annealing, sulfur segregation and diffusion on the cyclic oxidation resistance of superalloys: a review, *Thin Solid Films*, 253 (1-2), 285-292.
- Song, P., 2012, Influence of material and testing parameters on the lifetime of TBC systems with MCrAlY and NiPtAl bondcoats, Forschungszentrum Jülich, p.
- Standard, A., 2012, E18-12: Standard test methods for Rockwell hardness of metallic materials, *ASTM International, West Conshohocken, PA*.
- Stecura, S., 1978, Effects of compositional changes on the performance of a thermal barrier coating system.[yttria-stabilized zirconia coatings on gas turbine engine blades].
- Steenbakker, R., Wellman, R. ve Nicholls, J., 2006, Erosion of gadolinia doped EB-PVD TBCs, *Surface and Coatings Technology*, 201 (6), 2140-2146.
- Stein, K. J., Schorr, B. S. ve Marder, A. R., 1999, Erosion of thermal spray MCr-Cr 3 C 2 cermet coatings, *Wear*, 224 (1), 153-159.
- Swar, R., Hamed, A., Shin, D., Woggon, N. ve Miller, R., 2012, Deterioration of thermal barrier coated turbine blades by erosion, *International Journal of Rotating Machinery*, 2012.
- Tabakoff, C. B. a. W., 1984, Axial flow compressor performance deterioration, *CINCINNATI UNIV OH*.
- Tabakoff, W., 1986, Review of Material Erosion Exposed to Aerodynamic Conditions, *US Dept. of Engineering, Rept. on Program Review, Oak Ridge*.

- Tabakoff, W., 1987, Compressor erosion and performance deterioration, *Journal of fluids engineering*, 109 (3), 297-306.
- Tabakoff, W., 1989, Investigation of coatings at high temperature for use in turbomachinery, *Surface and Coatings Technology*, 39, 97-115.
- Tabakoff, W. ve Shanov, V., 1995, Erosion rate testing at high temperature for turbomachinery use, *Surface and Coatings Technology*, 76, 75-80.
- Tarada, F. ve Suzuki, M., 1993, External Heat Transfer Enhancement to Turbine Blading due to Surface Roughness, (78897), V002T008A006.
- Taylor, R. P., 1989, Surface Roughness Measurements on Gas Turbine Blades, (79139), V001T001A101.
- Taylor, T. A. ve Walsh, P. N., 2004, Thermal expansion of MCrAlY alloys, *Surface and Coatings Technology*, 177-178, 24-31.
- Tilly, G., 1969, Erosion caused by airborne particles, *Wear*, 14 (1), 63-79.
- Tilly, G., 1973, A two stage mechanism of ductile erosion, *Wear*, 23 (1), 87-96.
- Tsai, P.-C., Lee, J.-H. ve Chang, C.-L., 2007, Improving the erosion resistance of plasma-sprayed zirconia thermal barrier coatings by laser glazing, *Surface and Coatings Technology*, 202 (4-7), 719-724.
- Von Niessen, K. ve Gindrat, M., 2011, Plasma spray-PVD: a new thermal spray process to deposit out of the vapor phase, *Journal of thermal spray technology*, 20 (4), 736-743.
- Vuoristo, P., 2014, Thermal spray coating processes.
- Wang, D., Tian, Z., Shen, L., Liu, Z. ve Huang, Y., 2014, Effects of laser remelting on microstructure and solid particle erosion characteristics of ZrO₂-7wt% Y₂O₃ thermal barrier coating prepared by plasma spraying, *Ceramics International*, 40 (6), 8791-8799.
- Wang, D. S., Tian, Z. J., Yang, B. ve Shen, L. D., 2012, Preparation and Solid Particle Erosion Behaviors of Plasma-Sprayed and Laser-Remelted ZrO₂-7wt.% Y₂O₃ Thermal Barrier Coatings, *Applied Mechanics and Materials*, 191-197.
- Wang, S.-s., Liu, G.-w., Mao, J.-r., He, Q.-g. ve Feng, Z.-p., 2010, Effects of coating thickness, test temperature, and coating hardness on the erosion resistance of steam turbine blades, *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, 132 (2), 022102.
- Wellman, R. G., Deakin, M. ve Nicholls, J., 2005, The effect of TBC morphology on the erosion rate of EB PVD TBCs, *Wear*, 258 (1-4), 349-356.
- Wilcox, M., Kurz, R. ve Brun, K., 2012, Technology review of modern gas turbine inlet filtration systems, *International Journal of Rotating Machinery*, 2012.
- Wlodek, S., 1985, Development and testing plasma sprayed coatings for solid particle erosion resistance, *Solid-Particle Erosion of Utility Steam Turbines: 1985 Workshop, held November*, 13-15.
- Yıldızlı, K., Karamış, M. ve Nair, F., 2006, Erosion mechanisms of nodular and gray cast irons at different impact angles, *Wear*, 261 (5-6), 622-633.
- Zhu, D. ve Miller, R. A., 2000, Thermal conductivity and elastic modulus evolution of thermal barrier coatings under high heat flux conditions, *Journal of thermal spray technology*, 9 (2), 175-180.
- Zhu, D., Miller, R. A. ve Kuczumarski, M. A., 2010, Development and life prediction of erosion resistant turbine low conductivity thermal barrier coatings.

EKLER

EK-1 NiCrAlY bağ kaplamaların gözeneklilik ölçümleri ve tablo detayları.



Micromeritics Instrument Corporation

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 1209

Port: 2/1

Page 1

Sample ID: 000-984-1/25
 Operator: H.S.
 Submitter: NiCrAlY
 File: C:\9500\DATA\000-984.SMP

LP Analysis Time: 5/30/2019 3:03:23PM
 HP Analysis Time: 5/30/2019 5:23:59PM
 Report Time: 5/31/2019 3:13:43PM

Sample Weight: 5.0828 g
 Correction Type: None
 Show Neg. Int: No

Summary Report

Penetrometer parameters

Penetrometer:	15cc pow 1,716sv 06-0850		
Pen. Constant:	28.098 $\mu\text{L}/\text{pF}$	Pen. Weight:	80.5462 g
Stem Volume:	1.7160 mL	Max. Head Pressure:	4.4500 psia
Pen. Volume:	15.6832 mL	Assembly Weight:	289.2500 g
Hg Parameters			
Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

Low Pressure:

Evacuation Pressure:	100 μmHg
Evacuation Time:	10 mins
Mercury Filling Pressure:	0.52 psia
Equilibration Time:	10 secs

High Pressure:

Equilibration Time:	10 secs
---------------------	---------

No Blank Correction

Intrusion Data Summary

Total Intrusion Volume =	0.0029 mL/g
Total Pore Area =	0.002 m^2/g
Median Pore Diameter (Volume) =	102.3769 μm
Median Pore Diameter (Area) =	0.4515 μm
Average Pore Diameter (4V/A) =	4.7655 μm
Bulk Density at 0.52 psia =	7.9730 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	8.1638 g/mL
Porosity =	2.3367 %
Stem Volume Used =	2 % ****

EK-2 NiCoCrAlY bağ kaplamaların gözeneklilik ölçümleri ve tablo detayları.



Micromeritics Instrument Corporation

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 1209

Port: 2/1

Page 1

Sample ID: 000-985-3/31
 Operator: H.S.
 Submitter: NiCoCrAlY
 File: C:\9500\DATA\000-985.SMP

LP Analysis Time: 5/31/2019 9:57:13AM
 HP Analysis Time: 5/31/2019 10:54:07AM
 Report Time: 5/31/2019 3:14:36PM

Sample Weight: 4.9488 g
 Correction Type: None
 Show Neg. Int: No

Summary Report
Penetrometer parameters

Penetrometer:	15cc pow 1,716sv 06-0850		
Pen. Constant:	28.098 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	80.5462 g
Stem Volume:	1.7160 mL	Max. Head Pressure:	4.4500 psia
Pen. Volume:	15.6832 mL	Assembly Weight:	289.2500 g
Hg Parameters			
Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

Low Pressure:

Evacuation Pressure:	100 μmHg
Evacuation Time:	10 mins
Mercury Filling Pressure:	0.52 psia
Equilibration Time:	10 secs

High Pressure:

Equilibration Time:	10 secs
---------------------	---------

No Blank Correction

Intrusion Data Summary

Total Intrusion Volume =	0.0035 mL/g
Total Pore Area =	0.015 m^2/g
Median Pore Diameter (Volume) =	18.0323 μm
Median Pore Diameter (Area) =	0.1811 μm
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.9642 μm
Bulk Density at 0.52 psia =	7.8853 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	8.1104 g/mL
Porosity =	2.7747 %
Stem Volume Used =	2 % ****

EK-3 NiCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamasına ait gözeneklilik ölçümleri ve tablo detayları.



Micromeritics Instrument Corporation

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 1209

Port: 2/1

Page 1

Sample ID: 000-980-5/26
 Operator: H.S.
 Submitter: NiCrAlY + 8YSZ
 File: C:\9500\DATA\000-980.SMP

LP Analysis Time: 5/30/2019 10:27:54AM
 HP Analysis Time: 5/30/2019 12:05:00PM
 Report Time: 5/31/2019 3:10:38PM

Sample Weight: 5.7571 g
 Correction Type: None
 Show Neg. Int: No

Summary Report

Penetrometer parameters

Penetrometer:	15cc pow 1,716sv 06-0850	Pen. Weight:	80.5462 g
Pen. Constant:	28.098 $\mu\text{L/pF}$	Max. Head Pressure:	4.4500 psia
Stem Volume:	1.7160 mL	Assembly Weight:	287.5850 g
Pen. Volume:	15.6832 mL		
Hg Parameters			
Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

Low Pressure:

Evacuation Pressure:	100 μmHg
Evacuation Time:	10 mins
Mercury Filling Pressure:	0.52 psia
Equilibration Time:	10 secs

High Pressure:

Equilibration Time:	10 secs
---------------------	---------

No Blank Correction

Intrusion Data Summary

Total Intrusion Volume =	0.0049 mL/g
Total Pore Area =	0.044 m^2/g
Median Pore Diameter (Volume) =	0.5076 μm
Median Pore Diameter (Area) =	0.2701 μm
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.4431 μm
Bulk Density at 0.52 psia =	7.1045 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	7.3594 g/mL
Porosity =	3.4643 %
Stem Volume Used =	2 % *****

EK-4 NiCoCrAlY + 8YSZ seramik üst kaplamasına ait gözeneklilik ölçümleri ve tablo detayları.



Micromeritics Instrument Corporation

AutoPore IV 9500 V1.09

Serial: 1209

Port: 2/1

Page 1

Sample ID: 000-987-6/31
 Operator: H.S.
 Submitter: NiCoCrAlY + 8 YSZ
 File: C:\9500\DATA\000-987.SMP

LP Analysis Time: 5/31/2019 2:19:40PM
 HP Analysis Time: 5/31/2019 3:09:37PM
 Report Time: 5/31/2019 3:16:11PM

Sample Weight: 5.9680 g
 Correction Type: None
 Show Neg. Int: No

Summary Report

Penetrometer parameters

Penetrometer:	15cc pow 1.716sv 06-0850		
Pen. Constant:	28.098 $\mu\text{L/pF}$	Pen. Weight:	80.5462 g
Stem Volume:	1.7160 mL	Max. Head Pressure:	4.4500 psia
Pen. Volume:	15.6832 mL	Assembly Weight:	287.5750 g
Hg Parameters			
Adv. Contact Angle:	130.000 degrees	Rec. Contact Angle:	130.000 degrees
Hg Surface Tension:	485.000 dynes/cm	Hg Density:	13.5335 g/mL

Low Pressure:

Evacuation Pressure:	100 μmHg
Evacuation Time:	10 mins
Mercury Filling Pressure:	0.52 psia
Equilibration Time:	10 secs

High Pressure:

Equilibration Time:	10 secs
---------------------	---------

No Blank Correction

Intrusion Data Summary

Total Intrusion Volume =	0.0053 mL/g
Total Pore Area =	0.052 m^2/g
Median Pore Diameter (Volume) =	0.4836 μm
Median Pore Diameter (Area) =	0.2307 μm
Average Pore Diameter (4V/A) =	0.4087 μm
Bulk Density at 0.52 psia =	7.2193 g/mL
Apparent (skeletal) Density =	7.5069 g/mL
Porosity =	3.8314 %
Stem Volume Used =	2 % ****

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Musa Demirci
Uyruğu : Türkiye Cumhuriyeti
Doğum Yeri ve Tarihi : Konya, 1982
Telefon : 0505 4039830
Faks :
E-Posta : musa.demirci@karatay.edu.tr

EĞİTİM

Derece	Adı	İl	Bitirme Yılı
Lise	: Meram Anadolu Lisesi	Konya	2003
Üniversite	: İstanbul Teknik Üniversitesi	İstanbul	2008
Yüksek Lisans	: Selçuk Üniversitesi	Konya	2015
Doktora	: Konya Teknik Üniversitesi	Konya	2020

İŞ DENEYİMLERİ

Yıl	Kurum	Görevi
2009-2010	Simya Hidrolik Pnömatik Ltd. Şti.	Proje Mühendisi
2011- Halen	KTO Karatay Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

UZMANLIK ALANI

Modal analiz, Katı Partikül Erozyon aşınması, Termal Bariyer Kaplamalar, Teknik Resim.

YABANCI DİLLER

İngilizce

YAYINLAR

A. Uluslararası hakemli dergilerde yayınlanan makaleler (SCI & SSCI & Arts and Humanities)

A.1. Uluslararası diğer hakemli dergilerde yayınlanan makaleler

Bagci, M., Demirci, M., Sukur, E. F., Kaybal, H. B., The effect of nanoclay particles on the incubation period in solid particle erosion of glass fibre/epoxy nanocomposites. *Wear*, 2019, 203159, <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.203159>.

Demirci, M., Bağcı, M., Investigation of automotive primer and basecoat paint surface's adhesion by solid particle erosion. In: AIP Conference Proceedings. AIP Publishing, 2018, <https://doi.org/10.1063/1.5034542>, p. 020011.

A.2. Uluslararası bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında (Proceedings) basılan bildiriler

Demirci, M., Bağcı, M., Investigation of automotive primer and basecoat paint surface's adhesion by solid particle erosion. ICOSEM, 2017, Kuala Lumpur, Malezya.

Demirci, M., Bağcı, M., Investigation of Thermal Barrier Coatings Bond and Top Coat High Temperature Solid Particle Erosion Resistance. TRIBOMASH, 2018, Moskova, Rusya.

B. Ulusal hakemli dergilerde yayımlanan makaleler

B.1. Ulusal bilimsel toplantılarda sunulan ve bildiri kitabında basılan bildiriler

Demirci, M., elik, M., "Bir Otomatik Taşıma Sisteminin Eniyilenmesi alışması", UMTS 2015 – Uluslararası katılımlı 17. Makina Teorisi Sempozyumu / TrC-IFTToMM Symposium on Theory of Machines and Mechanisms, 14-17 June 2015, İzmir, Turkey (Yüksek lisans tezinden yapılmıştır).

