

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMAL BARIYER KAPLAMALI GAZ TÜRBİN
KANATLARININ DİNAMİK ŞARTLARDA SICAKLIK
DAĞILIMININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Murat Cihan ÇALIŞKAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

HAZİRAN 2025

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TERMAL BARIYER KAPLAMALI GAZ TÜRBİN
KANATLARININ DİNAMİK ŞARTLARDA SICAKLIK
DAĞILIMININ İNCELENMESİ

DOKTORA TEZİ

Murat Cihan ÇALIŞKAN

Makina Mühendisliği Anabilim Dalı

Enerji Bilim Dalı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Ünal UYSAL

HAZİRAN 2025

Murat Cihan ÇALIŞKAN tarafından hazırlanan “TERMAL BARIYER KAPLAMALI GAZ TÜRBİN KANATLARININ DİNAMİK ŞARTLARDA SICAKLIK DAĞILIMININ İNCELENMESİ” adlı tez çalışması 30.06.2025 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği Anabilim Dalı Enerji Bilim Dalı’nda Doktora tezi olarak kabul edilmiştir.

Tez Jürisi

Jüri Başkanı :	Doç. Dr. Ünal UYSAL (Danışman) Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. İmdat TAYMAZ Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Fatih ÜSTEL Sakarya Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Prof. Dr. Cenk ÇELİK Kocaeli Üniversitesi
Jüri Üyesi :	Doç. Dr. Fikret POLAT Düzce Üniversitesi



ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ

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

30 / 06 / 2025

Murat Cihan ÇALIŞKAN





Eşime, canım kızlarıma ve çok değerli aileme



TEŞEKKÜR

Bu çalıőmamı yaparken sabır, anlayıő ve desteklerini benden hiçbir zaman esirgemeyen baőta canım eőim Fatma GÜNEŐ ÇALIŞKAN'a, kendisiyle geçirmem gereken zamanı çaldığım biricik kızım Simay ÇALIŞKAN'a, yeni doğan kızım Duru ÇALIŞKAN'a, maddi ve manevi desteklerini sunan ve deney düzeneğinin hazırlanması için var gücüyle çalışan babam Adem ÇALIŞKAN ve annem Hanife ÇALIŞKAN'a, eőimin değerli ailesi Hüseyin ve Vehibe GÜNEŐ'e en içten duygularıyla őükranlarımı sunarım.

Tezin deneysel çalıőmalarının geekleőtirilmesinde Sakarya Üniversitesi Bilimsel Araştırmalar ve Projeler Koordinatörlüğu Lisansüstü Tez Projesi Programı kapsamında 2023-19-44-39 numaralı projeye finansal destek sunan Sakarya Üniversitesi BAPK birimine ayrıca teşekkür ederim.

Tez çalışmamın baőından sonuna kadar yönlendirici ve bilgilendirici desteklerini esirgemeyen tez danıőmanım Doç. Dr. Ünal UYSAL'a, çalışmaları yürüttüğüm ve görev yaptđđım Termal Sprey Laboratuvarı (TESLAB) müdürü Prof. Dr. Fatih ÜSTEL'e, çalışmalarda yardımlarını ve görüşlerini esirgemeyen tüm TESLAB personellerine sonsuz teőekkürlerimi sunuyorum.

Deney düzeneği hazırlanması sürecinde, elektronik ekipmanların seçimi ve gerekli kodların yazımı, düzeneğin çalışır hale getirilmesinde sürekli destek olan Dr. Öğr. Üyesi Baran KAYNAK'a ve sürecin en baőından en sonuna kadar moral motivasyonumun yükselmesini sağlayıcı katkılarından dolayı Dr. Öğr. Üyesi Onur CANPOLAT'a da ayrıca teşekkür ediyorum.

Murat Cihan ÇALIŞKAN



İÇİNDEKİLER

Sayfa

ETİK İLKE VE KURALLARA UYGUNLUK BEYANNAMESİ	v
TEŞEKKÜR	ix
İÇİNDEKİLER	xi
KISALTMALAR	xiii
SİMGELER	xv
TABLO LİSTESİ	xvii
ŞEKİL LİSTESİ	xix
ÖZET	xxi
SUMMARY	xxiii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI	5
3. GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARDA KAPLAMA VE SOĞUTMA YÖNTEMLERİ	11
3.1. Gaz Türbinli Motorlar	11
3.2. Termal Bariyer Kaplamalar	18
3.2.1. Termal bariyer kaplama katmanları	20
3.2.1.1. Altlık	20
3.2.1.2. Bağ tabaka	20
3.2.1.3. Termal gelişen oksit (TGO)	20
3.2.1.4. Seramik üst tabaka	21
3.2.2. Termal bariyer kaplama yöntemleri	23
3.2.2.1. Plazma sprej kaplama yöntemi	23
3.2.2.2. EB-PVD (Elektron demeti- fiziksel buhar biriktirme) yöntemi	30
3.3. Gaz Türbinli Motorlarda Kullanılan Soğutma Teknikleri	31
3.4. Gaz Türbinli Motorlarda Kaplama Ömrü Belirleme	35
3.4.1. Fiziksel yorulma	36
3.4.2. Kimyasal korozyon yorulması	36
3.4.3. Sıcaklık farkı yorulması	37
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR	41
4.1. Deney Düzeneği Modellenmesi	41
4.2. Deney Düzeneği İmalatı	46
4.2.1. Mekanik imalat	46
4.2.2. Elektronik kontrol sistemi	50
4.3. Termal Bariyer Kaplama Çalışmaları	53
5. DENEYİN YAPILIŞI	61
5.1. Dinamik Termal Şok Deneyi	61
5.2. Statik Termal Şok Deneyi	67
6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME	71
6.1. Kaplama Sonrası Numunelerin Kesit Görünümü	71
6.2. Dinamik Termal Şok Test Sonuçları	72
6.3. Dinamik Termal Şok Sonrası Kesit Görünümü	76

6.4. Statik Termal Şok Test Sonuçları.....	77
6.5. Numune Bazlı Çevrim Karşılaştırması.....	79
6.6. Hasarların İstatistiksel Analizi	84
6.6.1. Hasar sayıları.....	84
6.6.2. İstatistiksel analiz	85
7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER	89
KAYNAKLAR.....	95
EKLER.....	103
ÖZGEÇMİŞ.....	108



KISALTMALAR

APS	: Atmosferik Plazma Sprey
ASTM	: American Society for Testing and Materials
EB-PVD	: Electron Beam-Physical Vapour Deposition
ED-FBB	: Elektron Demeti ile Fiziksel Buhar Biriktirme
FBB	: Fiziksel Buhar Biriktirme
HAD	: Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
HCF	: High Cycle Fatigue (Yüksek Çevrim Yorulması)
JETS	: Jet Engine Test System (Jet Motoru Test Sistemi)
LCF	: Low Cycle Fatigue (Düşük Çevrim Yorulması)
PCB	: Printed Circuit Board (Baskılı Devre Kartı)
PVD	: Physical Vapour Deposition
SEM	: Scanning Electron Microscope (Taramalı Elektron Mikroskobu)
SPS	: Shrouded Plasma Spray (Koruyucu Ortamda Plazma Sprey)
TBC	: Thermal Barrier Coating
TBK	: Termal Bariyer Kaplama
TGO	: Termal Olarak Gelişen Oksit Tabakası
VPS	: Vakum Ortamında Plazma Sprey
YSZ	: İtiryum Oksit Stabilize Zirkonyum Oksit



SİMGELER

$^{\circ}\text{C}$: Santigrat derece
m	: Metre
U_m	: Püskürtme jetin çarpma hızı [mm/s]
U_n	: Püskürtme jetin çıkış hızı [mm/s]
v	: Hız [mm/s]
v_m	: Meridyen Hız [mm/s]
v_r	: Radyal Hız [mm/s]
v_a	: Eksenel Hız [mm/s]
v_r	: Radyal Hız [mm/s]
v_{ω}	: Teğetsel Hız [mm/s]
ω	: Açısal Hız [rad/s]
K	: Kelvin
V	: Elektriksel gerilim [Volt]
μm	: Mikrometre
A	: Elektriksel akım [Amper]
β	: Beta
kPa	: KiloPascal
km	: Kilometre
W	: Watt
\emptyset	: Çap



TABLO LİSTESİ

Sayfa

Tablo 4.1. Elektriksel Şema Bileşenlerinin Açıklamaları.	53
Tablo 4.2. Kaplama Bilgisi.....	56
Tablo 4.3. Kaplama Parametreleri.....	58
Tablo 6.1. MC 01 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.	80
Tablo 6.2. MC 02 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.	81
Tablo 6.3. MC 03 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.	82
Tablo 6.4. MC 04 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.	83
Tablo 6.5. Numunelerdeki Hasar Sayıları.	85
Tablo 6.6. Ki-Kare Testi İçin Oluşturulan Tablo.	86
Tablo 6.7. Beklenen Değer Tablosu.	86
Tablo 7.1. Termal Şok Testleri Sonuçları.	90
Tablo 7.2. Literatürdeki Statik Termal Şok Örnekleri	91



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1. Termik Motorların Sınıflandırılması.	1
Şekil 1.2. Kanatçık Çizimi ve Termal Bariyer Kaplama Tasviri.	2
Şekil 2.1. JETS Düzeneginden Görseller.	9
Şekil 3.1. Şematik Gaz Türbinli Motor.	11
Şekil 3.2. Gaz Türbinli Motor Çeşitleri.	13
Şekil 3.3. Pistonlu ve Tepkili Motorların Çalışma Benzerliği.	15
Şekil 3.4. Kapalı Brayton Çevrimi Şeması.	16
Şekil 3.5. Gaz Türbinli Motorlarda Basınç, Sıcaklık ve Akış Hızı Grafiği.	17
Şekil 3.6. Termal Bariyer Kaplama Katmanları.	19
Şekil 3.7. Seramik Katman Malzemelerin Termal Özellikleri.	21
Şekil 3.8. Değişen Sıcaklığa Bağlı Seramik Malzemelerin Isı İletim Katsayıları.	22
Şekil 3.9. Düşük Isıl İletim Katsayılı Seramik Malzemelerin Isıl İletkenliklerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Karşılaştırılması.	22
Şekil 3.10. Şematik Olarak Termal Sprey Yöntemi İle Kaplama Oluşumu.	23
Şekil 3.11. Termal Sprey Kaplama Sistemlerinin Sınıflandırılması.	24
Şekil 3.12. Splat Oluşumu ve Biriken Splatların Kaplamaya Dönüşmesi.	24
Şekil 3.13. Plazma Sprey Sistemi İle Kaplama Oluşumunun Şematik Gösterimi.	26
Şekil 3.14. Plazma Tabancasının Kesit Görünümü ve Bileşenleri.	27
Şekil 3.15. Maddenin Halleri.	28
Şekil 3.16. Maddenin Halleri Arasındaki Sıcaklık-Basınç İlişkisi.	29
Şekil 3.17. Fiziksel Buhar Biriktirme Yönteminin Şematik Gösterimi.	30
Şekil 3.18. EB-PVD / ED-FBB Yönteminin Şematik Gösterimi.	31
Şekil 3.19. Siemens Firmasının Ürettiği Türbin Kanadındaki Soğutma Sistemleri.	32
Şekil 3.20. Film, Sızınım ve Terleme Soğutma Şematik Gösterimi.	33
Şekil 3.21. Serbest Jetin Akış Profili ve Akış Bölgeleri.	33
Şekil 3.22. Farklı Rib Şekilleri.	35
Şekil 3.23. Türbin Kanatlarında Fiziksel Yorulma Sonucu Oluşan Hasar.	36
Şekil 3.24. Kimyasal Korozyon Sonrası Kanatçık (a) ve Yönlendirici (b).	37
Şekil 3.25. Termal Yorulma Sonucu Hasar Almış Numune ve SEM Resimleri.	39
Şekil 4.1. Türbin Kanatçığı Üzerindeki Hız Vektörleri.	41
Şekil 4.2. Deney Düzenegi Tasarımında Türbin Kanadındaki Temsil Edilen Bölge.	43
Şekil 4.3. Hücum Kenarındaki Hava Akışı.	44
Şekil 4.4. Deney Düzenegi Şematik Modeli.	45
Şekil 4.5. Tasarlanan Test Düzeneginin 3 Boyutlu Görünümü.	46
Şekil 4.6. Kullanılan Alev Üfleci ve Hava Üfleci.	46
Şekil 4.7. Gaz ve Hava Üfleçleri Montajı Sonrası Düzenek Görünümü.	47
Şekil 4.8. Selenoid Vana.	47
Şekil 4.9. ESP32 Mikro İşlemci.	48
Şekil 4.10. Röle Kartı (8 Kanallı).	48
Şekil 4.11. Asenkron Elektrik Motoru ve Sürücüsü.	49
Şekil 4.12. Ateşleme Trafosu.	49

Şekil 4.13. Sistem Bileşenleri ve Bağlantıları.....	50
Şekil 4.14. Python İle Tasarlanan Arayüz.....	51
Şekil 4.15. Sistemin Çevrim Olarak Çalışmasının Algoritması.....	52
Şekil 4.16. Test Düzeneginin Elektriksel Şeması.	52
Şekil 4.17. Kaplamaların Uygulandığı Çoklu Kaplama Kabini.....	54
Şekil 4.18. F4-MB Plazma Sprey Tabancası.	54
Şekil 4.19. Kullanılan Kaplama Tozlarının Genel ve Mikroskopik Görüntüsü.....	55
Şekil 4.20. Numunelerin Kaplama Anında Görünümü.....	56
Şekil 4.21. Kaplama Anından Görseller.	57
Şekil 4.22. Kaplama Sonrası Numunelerin Görünümü.....	57
Şekil 4.23. Test İçin Gerekli Kaplama Alanı.	58
Şekil 5.1. Test Anında Düzenek, Termal Kamera ve Diğer Ekipmanların Yerleşimi.	61
Şekil 5.2. Termal Kamera ve Deney Esnasında Yazılımdaki Anlık Görüntü.....	62
Şekil 5.3. Termal Kameranın Numuneyi Gördüğü Açısı.	63
Şekil 5.4. Test Anı (a), Isıtma Çevrimi Sonrası Anlık Görünüm(b).....	63
Şekil 5.5. Isıtma Çevrimi Sonunda Numunenin Arkasından Termal Kamera Görünümü.....	64
Şekil 5.6. Çevrimde Isıtma Aşamasının Kontrol Bilgisayarından Görünümü.....	64
Şekil 5.7. MC 01 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.	65
Şekil 5.8. MC 02 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.	65
Şekil 5.9. MC 03 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.	66
Şekil 5.10. MC 04 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.	66
Şekil 5.11. Çevrimde Soğutma Aşamasının Kontrol Bilgisayarından Görünümü. ...	67
Şekil 5.12. Statik Test İçin Kullanılan Numuneler.	68
Şekil 5.13. Statik Termal Şok Test Düzenegi Genel Görünümü.	68
Şekil 5.14. Test Anından Görüntü.	69
Şekil 6.1. Kaplamaların SEM Altında Kesit Görünümleri.	71
Şekil 6.2. MC 04 Kodlu Kaplama Üzerindeki Detaylar.	72
Şekil 6.3. MC 01 Kodlu Numunenin 10 Çevrim Sonrası Hasarlı Görünümü.	72
Şekil 6.4. MC 02 Kodlu Numunenin Çevrim Sonlarındaki Görünümü.....	73
Şekil 6.5. MC 03 Kodlu Numunenin 10 Çevrim Sonrası Görünümü.	74
Şekil 6.6. MC 03 Kodlu Numunenin 20 Çevrim Sonrası Görünümü.	74
Şekil 6.7. MC 04 Kodlu Numunenin Termal Şok Testi Sonrası Görünümleri.....	75
Şekil 6.8. Termal Şok Testi Sonrası Kesit Görünümleri.....	76
Şekil 6.9. MC 01 Kodlu Numunenin Statik Test Sonrası Görünümleri.	77
Şekil 6.10. MC 02 Kodlu Numunenin Test Sonrası Görünümleri.....	78
Şekil 6.11. MC 03 Kodlu Numunenin Test Sonrası Görünümleri.....	78
Şekil 6.12. MC 04 Kodlu Numunenin Test Sonrası Görünümleri.....	79
Şekil 6.13. Numune Üzerindeki Hasar Bölgeleri.....	84
Şekil 6.14. Ki-Kare Dağılım Tablosu.	87
Şekil 6.15. Ki-Kare Fonksiyonu.	88
Şekil 7.1. MC02 Kodlu Numune Üzerindeki Hatalı Kaynak Detayı.....	92

TERMAL BARIYER KAPLAMALI GAZ TÜRÜN KANATLARININ DİNAMİK ŞARTLARDA SICAKLIK DAĞILIMININ İNCELENMESİ

ÖZET

Gaz türbini motorları, modern teknolojinin temel taşlarından biridir. Havacılık sektöründe ana güç kaynağı olarak kullanılırlar ve küresel enerji üretiminde kritik bir rol oynarlar. Çalışma prensibinin temelinde, basınçlı hava-yakıt karışımının yanması yatmaktadır. Bu yanma, yüksek enerjili egzoz gazları üretir. Pistonlu motorlardan farklı olarak, gaz türbinleri bu gazları, türbin olarak bilinen bir dizi fan kanadını olağanüstü yüksek hızlarda döndürmek için kullanır. Gelişmiş gaz türbini tasarımlarında daha yüksek termodinamik verimlilik ve daha yüksek güç çıkışı arayışı, türbin giriş sıcaklıklarının kaçınılmaz olarak artmasına neden olmuştur. Günümüz motorları, egzoz gazı sıcaklıkları rutin olarak 1500 °C'yi aşan koşullarda çalışmaktadır. Bu aşırı termal koşullar, genellikle nikel bazlı süper alaşımlardan imal edilen türbin kanatlarına ciddi termomekanik gerilimler uygular. Bu alaşımlar, yüksek sıcaklıklarda yüksek mukavemetli performans için tasarlanmış olsa da, sünme, yorulma ve oksidasyona karşı hassastır ve bu da kanatların felakete sonuçlanabilecek arızalarına yol açabilir. Bu riskleri azaltmak ve metal alaşımların erime noktasının ötesindeki sıcaklıklarda çalışmayı mümkün kılmak için Termal Bariyer Kaplamalar (TBK) yaygın olarak kullanılmaktadır. TBK'lar, yapışma ve oksidasyon direnci için metalik bir bağ katmanı ve düşük termal iletkenliği, yüksek sıcaklık kararlılığı ve aşınma direnci ile tanınan seramik bir üst katmandan (genellikle itriyum stabilize zirkonya (YSZ)) oluşan gelişmiş çok katmanlı malzeme sistemleridir. Bu seramik katman, termal yalıtkan görevi görerek altta yatan metalik alt tabakanın maruz kaldığı sıcaklığı önemli ölçüde düşürür. Bu kaplamaların dayanıklılığı ve ömrü son derece önemlidir. Geleneksel olarak, TBK'ların ömür değerlendirmesi, fırın döngüsü gibi statik laboratuvar koşullarında termal şok testleri ile yapılmaktadır. Ancak, bu tür testler, çalışan bir motordaki türbin kanatlarının maruz kaldığı karmaşık, çok yönlü stres durumunu tam olarak yansıtamamaktadır. Bu çalışma, gaz türbininin dönme ortamını simüle eden dinamik koşullar altında TBK'ların dayanıklılığını, ömrünü ve yüzey sıcaklık dağılımını deneysel olarak inceleyerek bu kritik boşluğu ele almaktadır.

Çalışma ortamının daha gerçekçi bir simülasyonunu elde etmek için, bu araştırma için özel olarak tasarlanmış ve üretilmiş bir dinamik test cihazı geliştirilmiştir. Bu cihaz, TBK kaplı numunelerin yüksek sıcaklıkta gaz akımı içinde yüksek hızlarda dönmesini kolaylaştırarak, statik testlerde bulunmayan merkezkaç kuvvetleri ve radyal gaz akışları oluşturmuştur. Türbin kanadı malzemelerini temsil eden alt tabakalar, farklı kalınlıklarda TBK'larla kaplanmıştır. Temel amaç, bu dinamik termomekanik yükler altında kaplama kalınlığının performans ve ömür üzerindeki etkisini sistematik olarak değerlendirmektir. Her numunenin dayanıklılık ömrü, kaplama arızasına kadar dönme sırasında döngüsel ısıtma ve soğutmaya tabi tutulmasıyla belirlendi; kaplama arızası genellikle önceden belirlenmiş bir parçalanma veya delaminasyon seviyesi ile tanımlandı. Bu dinamik deneylerden elde edilen veriler, dinamik ortamın etkisini

nicelendirmek için literatürde bildirilen statik testlerden elde edilen verilerle sistematik olarak karşılaştırıldı.

Deney sonuçları, statik test tahminlerinden önemli ölçüde sapma gösteren TBK performansına ilişkin birkaç önemli bulgu ortaya koydu. Döndürmenin doğrudan bir sonucu olan kaplama yüzeyi boyunca sıcak gazların radyal akışının, kaplamanın çalışma ömrünü önemli ölçüde azalttığı belirlendi. Bu hızlandırılmış bozulma, artan aşındırıcı aşınma ve aerodinamik yüklemeye tarafından indüklenen karmaşık gerilme alanlarının, temel termal uyumsuzluk gerilmeleriyle sinerjik olarak etki etmesinin birleşik etkilerine atfedilmektedir. Buna karşılık, çalışma, modern türbin kanatlarında standart bir tasarım özelliği olan iç soğutma kanallarının uygulanmasının TBK'nın ömrü üzerinde kanıtlanabilir bir olumlu etkiye sahip olduğunu doğruladı. Kaplama üzerinde daha dik bir termal gradyan oluşturarak, soğutma kanalları kritik bağ kaplama/üst kaplama arayüzündeki sıcaklığı etkili bir şekilde düşürür. Arayüz sıcaklığındaki bu düşüş, TBK arızasının başlıca nedeni olan termal olarak gelişen oksit (TGO) tabakasının büyümesini yavaşlatarak kaplamanın kullanım ömrünü uzatır. Ayrıca, kaplama kalınlığı ile dayanıklılık arasında açık bir korelasyon olduğu tespit edilmiştir. Sonuçlar, TBK'nın ömrünün kaplama kalınlığının artmasıyla uzadığını göstermiştir. Ancak, bu ilişki sınırsız değildir. Daha kalın bir kaplama üstün ısı yalıtımı sağlarken, aynı zamanda iç gerilmeleri ve depolanan gerinim enerjisini de artırarak mekanik arızalara daha yatkın hale getirebilir. Farklı kalınlıklarda sistematik testler yapılarak, yaklaşık 300 µm'lik ideal bir kaplama kalınlığı belirlenmiştir. Bu kalınlık, ısı korumasını en üst düzeye çıkarmak ve mekanik bütünlüğü korumak arasında optimum dengeyi sağlar. Bu bulgu, mevcut literatürde bildirilen optimum kalınlık değerleriyle büyük ölçüde uyumludur ve bu dinamik çalışmada kullanılan deneysel metodolojiyi doğrulamaktadır.

Bu araştırma, gaz türbini uygulamalarında Termal Bariyer Kaplamaların doğru ömür tahmininde statik testlerin tek başına yetersiz olduğunu vurgulamaktadır. Dinamik koşulların, özellikle de dönmeyle ilişkili merkezkaç kuvvetleri ve radyal gaz akışlarının, kaplama dayanıklılığını önemli ölçüde azaltan kritik bir faktör olduğu gösterilmiştir. Çalışma, termal bozulmayı azaltmada iç soğutmanın yararlı rolünü doğrulamakta ve yaklaşık 300 µm'lik optimal TBC kalınlığının en sağlam performansı sağladığını ortaya koymaktadır. Bu bulgular, yeni nesil gaz türbinlerinin tasarımı ve kalifikasyonu için önemli sonuçlar doğurmakta ve motor güvenilirliği ve güvenliğini sağlamak için TBK ömür modellerine dinamik etkilerin dahil edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır.

INVESTIGATION AND EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF CHARACTERISTIC BEHAVIOR OF THERMAL BARRIER COATED SURFACES IN DYNAMIC CONDITIONS

SUMMARY

Gas turbine engines represent a cornerstone of modern technology, serving as the primary power source in the aviation sector and playing a critical role in global energy production. The fundamental principle of their operation involves the combustion of a pressurized air-fuel mixture, which generates high-energy exhaust gases. Unlike reciprocating piston engines, gas turbines utilize these gases to rotate a series of fan blades, known as a turbine, at exceptionally high speeds. The pursuit of greater thermodynamic efficiency and higher power output in advanced gas turbine designs has inexorably led to an increase in turbine inlet temperatures. Contemporary engines operate with exhaust gas temperatures routinely exceeding 1500 °C. These extreme thermal conditions impose severe thermomechanical stresses on the turbine blades, which are typically fabricated from nickel-based superalloys. While these alloys are engineered for high-strength performance at elevated temperatures, they are susceptible to creep, fatigue, and oxidation, which can lead to catastrophic blade failure. To mitigate these risks and enable operation at temperatures beyond the intrinsic melting point of the metallic alloys, Thermal Barrier Coatings (TBCs) are ubiquitously applied. TBCs are advanced multi-layered material systems comprising a metallic bond coat for adhesion and oxidation resistance, and a ceramic top coat—typically yttria-stabilized zirconia (YSZ)—renowned for its low thermal conductivity, high-temperature stability, and wear resistance. This ceramic layer acts as a thermal insulator, substantially lowering the temperature experienced by the underlying metallic substrate.

The rationale for prioritizing dynamic testing, as undertaken in this study, stems directly from the inherent and critical limitations of conventional static evaluation methods. For decades, the industry has relied on static tests, such as isothermal furnace cycling and atmospheric burner rig tests, to assess TBC durability. While these methods are valuable for isolating specific failure mechanisms like thermal expansion mismatch between the ceramic and metallic layers and the oxidation kinetics of the bond coat, they provide a dangerously incomplete picture of the service environment. A static test, by its very nature, fails to incorporate the significant mechanical loads that are superimposed upon the thermal loads in an operational engine. The most prominent of these is the immense centrifugal force generated by rotation at tens of thousands of RPM, which induces a constant tensile stress throughout the coating system. Furthermore, static tests cannot replicate the complex aerodynamic forces, including high-frequency vibrations and flutter, which introduce additional mechanical fatigue pathways. They also neglect the severe erosive effects of high-velocity particulate matter within the gas stream, which physically wears away the protective ceramic layer, particularly at the leading edge of the blade. Consequently, life predictions based solely on static data are often non-conservative, meaning they

overestimate the coating's true operational lifespan. This discrepancy poses a significant risk to engine integrity and safety. Therefore, the transition to dynamic testing is not merely an academic improvement but an engineering imperative for the accurate prediction of TBC performance and the prevention of premature, in-service failures.

To achieve a more realistic simulation of the operational environment, a bespoke dynamic test rig was designed and manufactured specifically for this investigation. This apparatus facilitated the rotation of TBC-coated specimens at high speeds within a high-temperature gas stream, thereby introducing the crucial centrifugal and radial gas flow effects that are absent in static tests. The substrates, representative of turbine blade materials, were coated with TBCs of varying thicknesses. The primary objective was to systematically evaluate the influence of coating thickness on performance and longevity under these dynamic thermomechanical loads. The durability lifespan of each specimen was determined by subjecting it to cyclic heating and cooling while under rotation until coating failure, typically defined by a predetermined level of spallation or delamination. The data acquired from these dynamic experiments were then systematically compared against established data from static tests reported in the literature to quantify the impact of the dynamic environment. The experimental findings revealed several crucial insights into TBC performance that deviate significantly from static test predictions. It was determined that the radial flow of hot gases across the coating surface, a direct consequence of rotation, significantly reduces the coating's operational lifespan. This accelerated degradation is attributed to the combined effects of increased erosive wear and the complex stress fields induced by aerodynamic loading, which act synergistically with the baseline thermal mismatch stresses.

Conversely, the study affirmed that the implementation of internal cooling channels, a standard design feature in modern turbine blades, has a demonstrably positive effect on the longevity of the TBC. By creating a steeper thermal gradient across the coating, the cooling channels effectively lower the temperature at the critical bond coat/top coat interface. This reduction in interface temperature slows the growth of the thermally grown oxide (TGO) layer—a primary driver of TBC failure—thereby extending the coating's useful life. Furthermore, a clear correlation between coating thickness and durability was established. The results showed that the lifespan of the TBC increases with increasing coating thickness. However, this relationship is not without limits. While a thicker coating provides superior thermal insulation, it also increases internal stresses and stored strain energy, potentially making it more prone to mechanical failure. Through systematic testing at different thicknesses, an ideal coating thickness of approximately 300 μm was identified. This thickness provides the optimal balance between maximizing thermal protection and maintaining mechanical integrity. Notably, this finding is in strong agreement with optimal thickness values reported in the existing body of literature, which serves to validate the experimental methodology employed in this dynamic study.

This research underscores the inadequacy of static testing alone for the accurate life prediction of Thermal Barrier Coatings and highlights a critical void in the materials testing landscape: the lack of a standardized international protocol for dynamic TBC evaluation. Currently, no widely accepted ASTM, ISO, or other regulatory standard exists for conducting durability tests under combined high-temperature and rotational conditions. This absence forces different research institutions, coating developers, and engine manufacturers to rely on their own proprietary, non-standardized test rigs. The

consequence is a fragmented and often contradictory body of data, making direct, "apples-to-apples" comparisons of different TBC systems nearly impossible and hindering collaborative progress across the industry. The unique test rig and methodology developed and validated in this study present a significant step toward rectifying this issue. By providing a controlled, repeatable, and realistic simulation of the dynamic engine environment, the experimental setup described herein has the clear potential to serve as a foundational blueprint for the development of a much-needed universal standard. Establishing such a standard would unify testing procedures, enable reliable data comparison, accelerate the development and qualification of more robust coating materials, and ultimately enhance the operational safety and efficiency of future gas turbine engines worldwide.

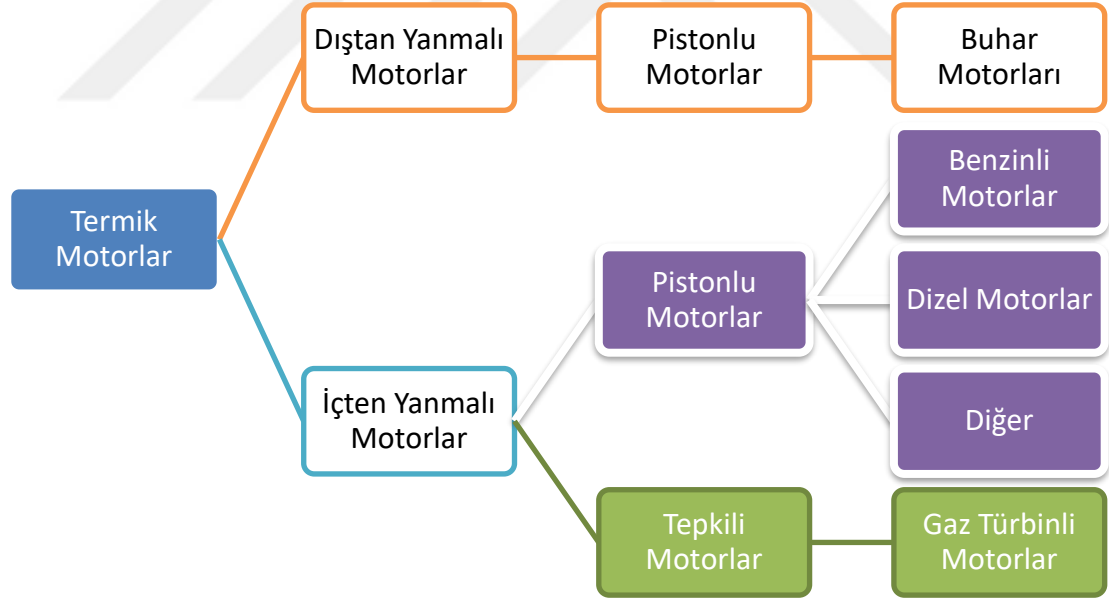




1. GİRİŞ

Motorlar, bir enerji formunu hareket enerjisine dönüştüren makinelerdir. Bahsi geçen enerji formu benzin, doğalgaz gibi kimyasal akışkan formunda olabileceği gibi, elektrik akımı formunda da olabilir. Kimyasal enerji formunu yanma tepkimesi sonucunda enerjiye dönüştüren kuvvet makinelerine “Termik Motorlar”, elektrik akımını kullanan makinelere ise “Elektrik Motoru” denmektedir (Taylor, 2020).

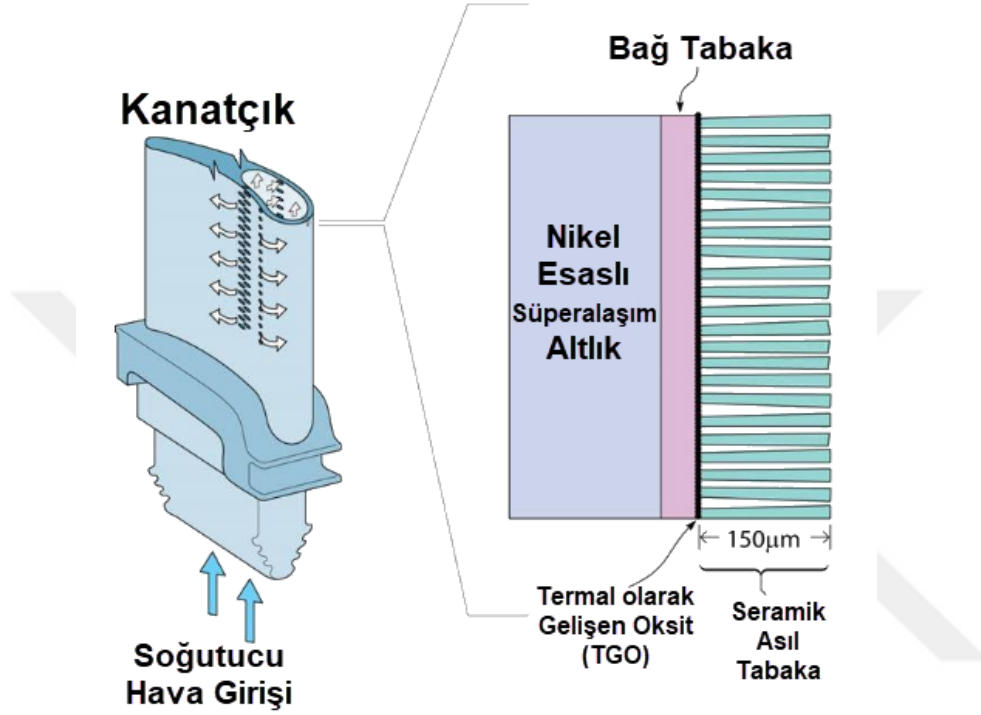
Termik motorlar, James Watt’ın buhar makinesini keşfinden itibaren çeşitli çalışmalar ile ortaya çıkmıştır. 1860 yılında Fransız bilim insanı Lenoir tarafından geliştirilen motor, kömür gazı kullanmaktadır ve ilk termik motor olarak kabul edilmektedir (Heywood, 1988). Bu keşif ile birlikte çeşitli deneyler ile sürekli geliştirilmeye çalışılan termik motorlar şu şekilde sınıflanabilir:



Şekil 1.1. Termik Motorların Sınıflandırılması.

Gaz türbinli motorlar, içten yanmalı motorlar sınıfında yer alan, ancak yanma sonrası güç üretimini dönel türbinler ile elde eden motor çeşididir. Otomotiv sektöründe kullanılan pistonlu motorlardan farklı bir çalışma sistemi vardır.

Tepkili içten yanmalı motor olan gaz türbinli motorlarda kullanılan kanatçık, motordaki gücü üretmeye yarayan önemli bir bileşendir. Bu bileşen, yüksek sıcaklık ortamında çalışmaktadır ve sıcaklıktan korunması için Termal Bariyer Kaplama (TBK) ismi verilen özel bir teknik ile kaplanır. Bu kaplama kanatçık ömrünün artmasını ve dolayısıyla motorun daha uzun süre çalışmasını sağlamaktadır.



Şekil 1.2. Kanatçık Çizimi ve Termal Bariyer Kaplama Tasviri.

Şekil 1.2’de gaz türbinlerinde kullanılan kanatçık çizimi görülmektedir. Yüzeyinden küçük bir bölgenin büyütülmüş halde gösterilen tasvirinde ise nikel esaslı süperalaşımdan imal edilmiş kanatçık üzerinde yer alan TBK görülmektedir.

Termal bariyer kaplamaların dayanım ömrü belirlenmesi, kanatçık performansı ve dolayısıyla motor performansı açısından çok önemlidir. Sıcaklık, korozyon, aşınma gibi birçok başlıkta ömür testleri yapılmaktadır. Özellikle sıcaklık konusunda geçmişte yapılmış akademik ve ticari yöntemler genellikle durağan numune kullanılarak yapılmıştır. Söz konusu statik testler, hareketli ortamda çalışan türbin kanadı ve üzerindeki TBK için yanlış sonuçlar ortaya çıkarmaktadır.

Bu çalışmadaki temel motivasyon; statik olarak yapılmakta olan sıcaklık farkına bağlı TBK dayanım testlerinin dinamik şartlarda yapılmasını sağlayan düzenek imal etmektir. Sonrasında bu düzenek ile dinamik şartlar altında testler yaparak literatüre

yeni bir bakış açısı kazandırmaktır. Ardından statik testler ile dinamik testlerin birbiri ile kıyaslanmasını yaparak avantaj ve dezavantajların belirlenmesidir.

Bu çalışma, yedi ana bölümden oluşmaktadır. Bölüm 2’de dinamik dayanım konusuna doğrudan örnek teşkil etmese de, çeşitli Termal Bariyer Kaplama (TBK) sistemlerinin ömür testlerine ilişkin literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve bu doğrultuda ilgili araştırma sonuçlarına yer verilmiştir.

Bölüm 3’te Termal Bariyer Kaplamaların yapısı, ömür testlerine ilişkin yöntemler ve uygulanan soğutma teknikleri kapsamlı bir biçimde tanımlanarak teorik altyapı sunulmuştur.

Bölüm 4’te deneysel çalışmalara ayrılmış olup, deney düzeneğinin tasarımı, bileşenlerin imalatı ve sistemin kurulumu ayrıntılı şekilde açıklanmıştır.

Bölüm 5’te gerçekleştirilen deneysel uygulamalar ve elde edilen bulgular sistematik bir biçimde ele alınmıştır

Bölüm 6’da deneysel uygulamaların sonuçları analiz edilerek bulgular ışığında değerlendirmeler yapılmıştır.

Bölüm 7’de Tartışma ve Öneriler başlığı altında elde edilen sonuçlar genel bir çerçevede tartışılmış ve gelecekte yapılabilecek çalışmalara yönelik öneriler sunulmuştur.



2. LİTERATÜR ARAŞTIRMASI

Akademik yayınlarda termal şok davranışlarının dinamik ortamlarda test edilmesi üzerine pek sonuç bulunmamaktadır. Bulunan yayınlar statik şartlarda testleri barındırsa da TBK dayanımı konusunda çeşitli noktaları ele almıştır.

Krivina ve arkadaşları, türbin kanatlarını korozyondan korumak için Soğuk Sprey yöntemi ile Ni-Al kaplama yapmayı amaçlamışlardır. Nikel ve alüminyum bazlı tozlar kullanarak deneyler yapmışlar ve en uygun fazın Ni-Al intermetalik faz olduğunu belirlemişlerdir. Bu fazı elde etmek için %50-%50 oranında nikel ve alüminyum toz karışımını 750°C'de 4 saat ısıl işleme tabi tutmuşlardır. Kaplama sonrası sertlik 250 kg/mm²'den 415 kg/mm²'ye yükselmiş. β fazı %30, Al₂O₃ %10 ve kalanı Ni olarak belirlenmiştir. Daha sonra ortası boşluklu türbin kanatlarına Al-Ni kaplaması ve ardından zirkonyum dioksit kaplaması yapılmıştır. Bu sayede altlık malzemenin çok ısınmadan bağ tabakasıyla kaplanması sağlanmış ve elde edilen sertlik ve yapışma mukavemeti değerleri beklentileri karşılamıştır. Bu yöntem türbin kanatlarını korozyondan korumak için kullanılabilceği belirtilmiştir (Krivina ve ark., 2020).

2018 yılında Aabid ve Khan tarafından yazılan bir yayında, Inconel 718 altlık üzerine bağ tabakası ve seramik asıl tabaka kaplaması yapılmıştır. Bu çalışmada farklı altlık ve asıl tabaka kaplamaları denenmiştir. Oluşturulan modellerde termal gerilme ve farklı termal bariyer kaplamalarının etkileri incelenmiştir. Deneylerde farklı oranlarda yitria (Y₂O₃) içeren YSZ bileşikleri kullanılmıştır. Kaplamalar, fırında 990°C - 280°C arasında 1'er saat bekletilerek 1500 kez, ardından 1095°C - 280°C arasında 1'er saat bekletilerek 100'den fazla kez çevrim yapılmıştır. Ansys yazılımı üzerinden yapılan analizler sonucunda en uygun termal bariyer kaplama (TBK) kombinasyonu belirlenmiştir. Toplamda 4 farklı durumda kaplamalar için analizler yapılmış ve en iyi sonuç, Inconel 718 altlık üzerine La₂Ce₂O₇ kaplama kombinasyonunda elde edilmiştir (Aabid ve Khan, 2018).

2017 yılında Zhu ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bir çalışmada, üç boyutlu sonlu eleman yöntemi kullanılarak türbin kanadında ısı transferi ve termal gerilmeler incelenmiştir. Bu analizde 3 farklı türbülans modeli (RNG k-ε, realizable k-ε ve SST

k- ω) kullanılmıştır. Realizable k- ϵ modeli ile elde edilen sıcaklık ve basınç dağılımları, deneysel olarak yapılan çalışmalara daha yakın sonuçlar vermiştir. Çalışmada 1350 K sıcaklık ve 14,22 atm basınç giriş şartları altında 3 farklı türbülans modeli ile inceleme yapılmıştır. Bu analizler sonucunda 1334 K'den 925 K'e düşen bir sıcaklık tespit edilmiştir. Benzer şekilde, yüksek farkların olduğu durum basınç dağılımında da gözlenmiştir. Türbin kanadı üzerinde sıcaklık dağılımı incelendiğinde, hücum kenarı ve kaçış kenarının diğer bölgelere göre daha sıcak olduğu görülmüştür. Hücum kenarın sıcaklığı 1296 K iken kaçış kenarına yakın yan bölgede 1089 K değeri ölçülmüştür. Sonuç olarak, türbin boyunca en yüksek ve en düşük sıcaklık değeri arasında 210 K fark olduğu belirlenmiştir. Termal bariyer kaplama (TBK) ise altlık sıcaklığının 72 K azalmasını sağlamaktadır (W. Zhu ve ark., 2017).

Begum ve arkadaşları, Gaz türbin kanatlarında soğutma işlemi ve verim artışı için kullanılan türbin kanadı boyunca açılan dairesel delikler ile ilgili deliksiz ve 5, 9 ve 13 delikli olmak üzere farklı modeller üzerinde FLUENT yardımıyla termal analiz yapılmıştır. Paslanmaz çelik ve N155 olmak üzere iki farklı altlık analiz edilmiştir. N155, paslanmaz çeliğe göre daha iyi termal özellikler ve daha az gerilme değerleri ile öne çıkmıştır.

Yapılan analiz sonuçlarına göre 13 delikli türbin kanadı, uygulama için en idealidir. Paslanmaz çelik yerine de N155 kullanıldığında performansın artacağı görülmüştür. Ancak N155'in yoğunluğu daha yüksek olduğundan kanat ağırlığı nispeten daha yüksek olacaktır (Begum ve ark., 2017).

Kini ve arkadaşları tarafından 2016 yılında yazılan yayında, spiral formdaki kanat içi kanallar için HAD analizi yapılmıştır. Dairesel ve eliptik kesitte delik geometrileri kullanılarak ve kanatçık 3600 d/dk ile döndürülürken analizler yapılmıştır. Türbülantörlü ve daha geniş boşluklu dairesel spiral kanallar ile türbin kanadının soğutulması, şekil değişiminin en az olduğu ve soğutma veriminin en yüksek olduğu seçim olduğu belirtilmiştir (Kini ve ark., 2016).

Ziaei-Asl ve Ramezanlou tarafından 2019 yılında yapılan yayında türbin kanatları üzerinde uygulanan kaplama kalınlığının uygulama sırasındaki sıcaklık ve basınç dağılımına etkisi incelenmiştir. Yayında 100 ila 500 μm aralığında 5 farklı kaplama kalınlığı, dakikada 3000 devir dönen türbin kanadına uygulanarak simüle edilmiştir. 500 μm kaplama kalınlığı olan numunenin 100 μm kaplama kalınlığı olan numuneye

göre yüzey sıcaklığının %6,5 düşmesi ve Von-Mises gerilimlerinin %3 oranında azalması sonuç olarak ifade edilmiştir (Ziaei-Asl ve Ramezanlou, 2019).

Sarikaya ve ark. 2005 yılında farklı seramik katmanların bağ tabakası kullanılarak değişik korelasyonlardaki kaplamalarını simüle ederek en düşük kalıntı gerilme ve en iyi termal yalıtım içeren kaplama çeşidini bulmayı amaçlamışlardır. Yayında MgO–ZrO₂, Y₂O₃–ZrO₂, B₄C ve Al₂O₃ seramikleri asıl tabaka olarak kullanılmıştır. Bağ tabaka olarak NiCoCrAlY alaşımı kullanılan yayında her bir seramik kaplamanın bağ tabakası ile ve bağ tabakası-seramik karışımı ile birlikte kaplamalarının analizleri yapılmıştır. Söz konusu analizler neticesinde MgO–ZrO₂ kaplaması 227 °C farkla en iyi olarak görülmektedir (Sarıkaya ve ark., 2005).

1997 yılında Miller tarafından yazılan makalede hava araçlarında kullanılan seramik kaplamaların dayanımı üzerine çalışmalar yapmıştır. ZrO₂ içerisine farklı oranlarda Y₂O₃ katarak elde ettiği kaplamaları 0,3 Mach sayısına sahip bir alev püskürteci önüne yerleştirdiği döner çubuk şeklindeki numuneler üzerinde termal yorulma davranışlarını incelemiştir. Zirkonya içerisine katılan hiç bir seramik %8 oranında katılan Y₂O₃ kadar kaplama performansını artırmamıştır (Miller, 1997).

Kromer ve arkadaşları tarafından 2019 yılında bağ tabakasız TBK sistemleri geliştirilmiştir. Bu sistemlerde, termal mekanik yorulma testleri sırasında, kaplama hasar mekanizmaları yüzey işlemi ve termal yaşlanmaya bağlı olarak değiştiği belirtilmiştir. Kumlanmış yüzeylerde kaplamalar kolayca yüzeyden ayrılırken, lazer işlemlili yüzeylerde çatlak dallanması gözlemlenmiştir (Kromer ve ark., 2019).

2020 yılında Feng ve arkadaşları tarafından çift katmanlı TBK'lerin termal şok dayanımını ortaya koymak için, atmosferik plazma püskürtme yöntemiyle Gd₂Zr²O₇/YSZ (GZ/YSZ) ve La₂Zr₂O₇ (LZ)/YSZ olmak üzere 2 farklı karışım ile TBK hazırlanmıştır. 1100 °C'de yapılan termal çevrim testleri sonucunda, GZ/YSZ kullanılarak üretilen TBK, daha uzun termal çevrim ömrüne sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, GZ tabakasının daha düşük elastik modülü, daha yüksek kırılma tokluğu ve daha düşük termal gerilmeler gibi mekanik özelliklerine bağlanmıştır (Feng, Dong, Fu, ve ark., 2020).

2020 yılındaki çalışmada 8YSZ/CoCrAlYTaSi ile TBK üretilmiş ve termal şok davranışı, 1100°C'de incelenmiştir. 86 termal şok çevrimi sonrasında, 8YSZ kaplamasında geniş alanlı soyulma gözlemlenmiştir. TGO (Termal Gelişen Oksit)

büyümesi ve 8YSZ kaplamasına difüzyon, seramik kaplamada deformasyon ve gerilmelere neden olmuştur (Cao ve ark., 2020).

Ashofteh ve arkadaşları 2018 yılında atmosferik plazma püskürtme (APS) yöntemiyle üretilen çok katmanlı ve fonksiyonel TBK numunelerinin termal şok koşullarındaki performansını incelemiştir. YSZ-N tek katmanlı kaplama ve CSZ üst katmanlı üç katmanlı kaplama, termal şok koşullarında en iyi performansı göstermiştir (Ashofteh ve ark., 2018).

2012 yılında yapılan Jamali ve arkadaşları tarafından imzalanan çalışmaya göre nanoyapılı ve konvansiyonel YSZ TBK termal şok davranışları karşılaştırılmıştır. Nanoyapılı TBK'lar, benzersiz bimodal mikro yapıları sayesinde, konvansiyonel TBK'lara göre yaklaşık 1,5 kat daha uzun termal çevrim ömrüne sahip olduğu belirtilmiştir (Jamali ve ark., 2012).

Farklı MCrAlY pürüzlülüğüne sahip TBC'lerin termal çevrim davranışlarını inceleyen Yuan ve arkadaşları; artan bağ katmanı pürüzlülüğünün, TBK'ların termal çevrim direncini artırdığını tespit etmiştir (Yuan ve ark., 2017).

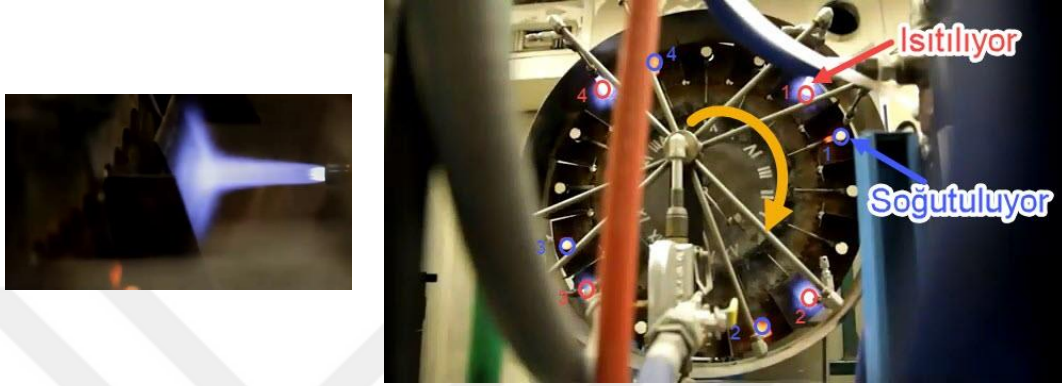
Plazma püskürtme yöntemiyle üretilen Al₂O₃/YSZ çok katmanlı TBK'ların termal şok davranışları, lazer yüzey işlemi sonrası incelenmiştir. Ahmadi ve arkadaşlarının 2019 yılında yaptığı bu çalışmada lazerle işlenmiş kaplamalar, termal şok direncinde %40'lık bir iyileşme göstermiştir (Ahmadi ve ark., 2019).

Kim ve diğerleri 2021 yılında bir türbin kanadı içerisindeki soğutma havasının özelliklerinin türbin kanadı sıcaklığı değişiminin etkisi üzerine bir rüzgar tüneli içerisinde çalışma yapmıştır. Bu çalışmada 100 °C sıcaklıkta 20 m/s hızda buhara maruz bırakılan bir türbin kanadı bulunmaktadır. Bu türbin kanadı içerisinde yer alan soğutma kanallarından farklı debilerde hava gönderilmiştir. Sadece iç soğutma, iç soğutma ile birlikte kılcal soğutma ve iç soğutma ile birlikte terleme soğutma sistemine sahip 3 çeşit türbin kanadı üzerinde deneyler yapılmıştır. Sonuç olarak soğutma havasının debisi arttığında ve terleme soğutma ile desteklendiğinde en az ısınan türbin kanadı görülmektedir (Kim ve ark., 2021).

Chen ve arkadaşları 2020 yılında çatlaklı TBK üzerine çalışma yapmışlardır. Bu çalışmada yoğun dikey çatlaklı (DVC) TBK ve poroz dikey çatlaklı (PVC) olmak üzere 2 çeşit kaplama üretilmiştir. Bu 2 kaplama, poroz TBK kaplama ile birlikte termal şok testine tabi tutulmuştur. Yapılan ölçümler ve testler sonucunda poroz dikey

çatlağa sahip TBK numunenin poroz numuneye göre 2 kat iyi performans verdiği görülmüştür (Chen ve ark., 2020).

Literatür araştırmalarında termal Şok testlerinin statik ortamda yapıldığı görülmektedir. Bununla birlikte JETS ismiyle oluşturulan sistem hareketli sistemlere örnek olarak gösterilmektedir.



Şekil 2.1. JETS Düzeneginden Görseller

1990'lı yıllarda Amerika Birleşik Devletleri'nde Praxair Surface Technologies firması tarafından üniversite ortak çalışması kapsamında JETS kısaltması altında termal Şok test düzenegi yapılmıştır (Bolcavage ve ark., 2004). Őöz konusu sistemde özel imal edilmiş 1 inç çapındaki kupon numunelere termal bariyer kaplama yapılmış, bu numuneler adım adım dönen düzenek üzerinde monte edilmiştir. Birden fazla numuneyi aynı anda test yapabilmek adına geliştirilmiş bu sistem hareketli gibi gözükmemektedir, ancak bu hareket numunelerin alev ile hava arasında yer değiştirmesini sağlamaktadır. Ardından sabit kalan numune üzerine test yapıldığından sistem statiktir.

Gaz türbin motorlarında kullanılan kanatçıklar, 1:50 ila 1:200 arasında tasarıma bağlı değişen oranlarda hava-yakıt oranı ile yanma tepkimesi sonucunda dönme hareketine maruz kalan parçalardır (Kislov ve ark., 2021; Wang ve ark., 2020). Yanma odasında yanan hava-yakıt karışımı türbine yönlendirilir. Burada kanatçık tasarımının verdiği özellik sayesinde türbinin dönmesi sağlanır. Dönen türbin Şaft mili, kompresör, egzoz ve diğer bileşenlere bağlıdır. Gaz türbinli motorlardaki çıkış gücü mil dönmesinden elde edildiği gibi atık gazın egzoz hüzmelerinden çıkışında oluşturduğu itki kuvvetinden de elde edilir. Bölüm 3'te bu konuda daha detaylı bilgi verilmektedir.

Bununla birlikte kanatçıkların içerisinde soğutma havası dolaşımına imkan veren iç soğutma kanalları yer almaktadır. Yanma odasında 1500 °C sıcaklıklara ulaşan egzoz gazına maruz kalan kanatçıkların soğutulması önem arz etmektedir. Kanatçığın kök kısmından temin edilen hava, kanatçık içerisinde yer alan kanallardan geçerek sıcaklığın belli seviyenin üstüne çıkmamasını sağlar. Aynı zamanda kanatçık üzerinde açılı biçimde delinmiş delikler sayesinde yüzeye gönderilen hava sayesinde film soğutma denilen bir katman oluşturulur. Bu durum da kanatçık sıcaklığını kontrol etmede önemli bir unsurdur. Bölüm 3.3'te soğutma teknikleri ile ilgili detaylı bilgiler yer almaktadır.

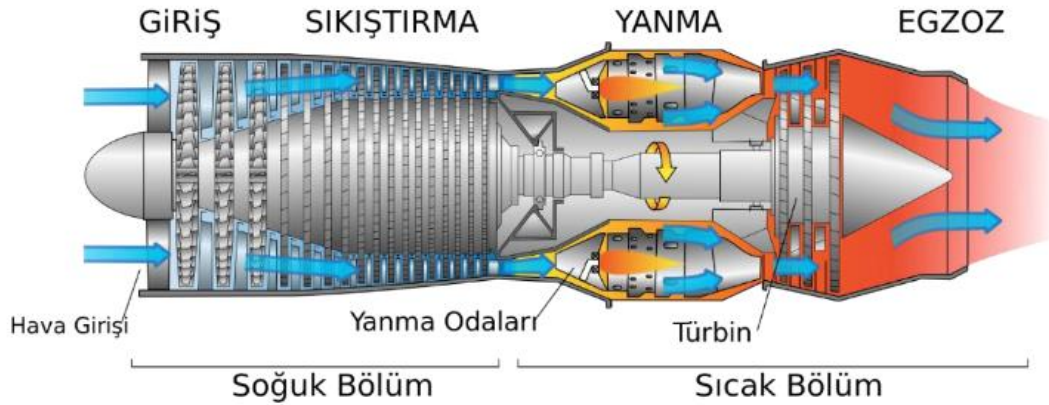
Literatürde karşılaşılan statik testlerde numune hareketi olmadığı ve aynı zamanda iç soğutma etkisinin göz ardı edildiği görülmüştür. Türbin kanatlarının hareketli parçalardan meydana gelmesi, söz konusu statik testlerin radyal etkileri ve dönme hareketi ile oluşan diğer etkileri simüle edemediği tespit edilmiştir. Bu nedenle; bu çalışma kapsamında, gaz türbini kanatlarında uygulanan Termal Bariyer Kaplamaların (TBK) dinamik yüklemeler altındaki performansı deneysel olarak araştırılmış; özellikle kaplama ömrü ve yüzey sıcaklık dağılımı üzerindeki etkiler nicel verilerle analiz edilmiştir. Deneysel çalışmanın gerçekleştirilmesi için dinamik şartların simüle edildiği deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir. Kaplama kalınlığının etkisinin araştırılması için farklı kalınlıklarda TBK uygulanmıştır.

3. GAZ TÜRİNİLİ MOTORLARDA KAPLAMA VE SOĞUTMA YÖNTEMLERİ

Türbin kanatları ve üzerindeki termal bariyer kaplamalar, gaz türbinli motor diye isimlendirilen bir içten yanmalı motor bünyesinde yer almaktadır. Türbin kanadı, bağlı olduğu çark şeklindeki türbinin dönmesini sağlayarak motorun gerekli gücü üretmesini sağlayan bir bileşendir.

3.1. Gaz Türbinli Motorlar

Bir kompresör yardımıyla sıkıştırılan havanın yanma odasında yakıt ile birlikte yandıktan sonra kanatçıklara bağlı türbini hareket edecek şekilde yönlendirilen, hareket eden türbin ile birlikte güç üreten makinelere “Gaz Türbinli Motorlar” denmektedir. Gaz türbinli motorlarda yer alan kompresör, yanma odası ve türbin aynı shaft üzerinde dönmektedir.



Şekil 3.1. Şematik Gaz Türbinli Motor.

Gaz türbinli motorlar günümüzde enerji üretim santrallerinde, hava, kara ve deniz araçlarında kullanılabilir. Uzay ve havacılık sektörü ise gaz türbinli motorların en yaygın kullanıldığı alandır.

Tüm içten yanmalı motorlar için geçerli olan enerji üretim akışı gaz türbin motorları için de geçerlidir ve şu 4 temel adımdan oluşur:

- Hava (ve yakıt) alımı

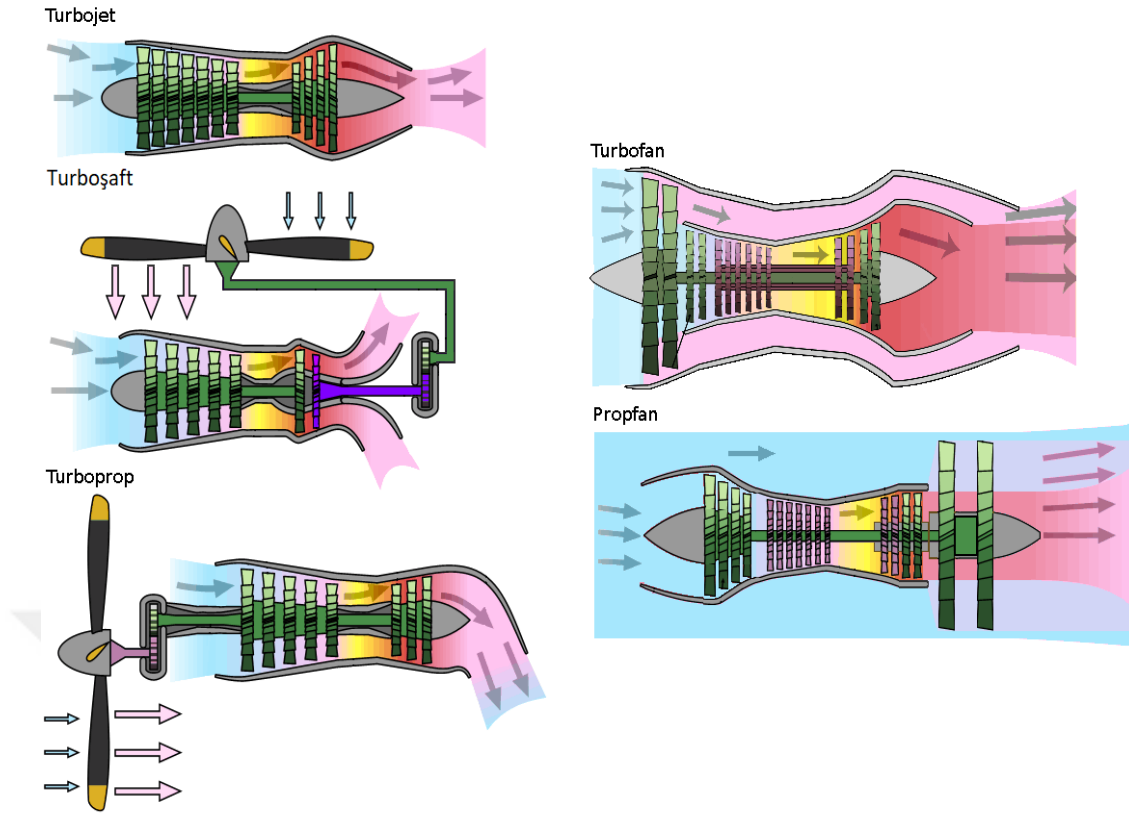
- Havanın (ve yakıtın) sıkıştırılması
- Yakıtın enjekte edildiği (giriş havası ile emilmemişse) ve depolanan enerjiyi dönüştürmek için yakıtın hava ile yakılması
- Dönüştürülen enerjinin kullanıldığı genişleme ve egzoz

4 zaman olarak da adlandırılan bu dört adım, pistonlu motorlarda aynı yerde sırayla gerçekleşirken, gaz türbin motorlarında motorun farklı yerlerinde aynı anda gerçekleşir (Savrun, 2023).

Gaz türbinli motorların bölümleri aşağıdaki gibidir:

- Giriş bölümü (Motora hava girişinin olduğu bölüm)
- Kompresör bölümü (Havanın sıkıştırılıp sıcaklığı ve basıncı yüksek şekilde yanma odasına gönderildiği bölüm)
- Yanma bölümü (Kompresörden gelen havanın yakıt püskürtülerek yandığı ve türbinlere aktarıldığı bölüm)
- Türbin bölümü (Yanma sonucu yüksek enerjili akışın, kanatçıklara yönlenmesi ile hareket ederek mekanik enerji üreten bölüm)
- Egzoz bölümü (Motor dışına atılan sıcak havanın yönlendirildiği bölüm)
- Aksesuar bölümü

Havanın motora girişi ve sonrasında geçtiği yol, gücün nasıl üretildiği, kullanılan motoru tanımlamada kullanılır. Günümüzde hava araçlarının uçmasını sağlayan beş tip gaz türbini motoru kullanılır. Bunlar turbojet, turbofan, turboprop, propfan ve turboşafttır (Koçak, 2019).



Şekil 3.2. Gaz Türbinli Motor Çeşitleri.

Turbojet motorları, kompresör, yanma odası, türbin bölümü ve egzoz olmak üzere dört bölümden oluşur. Kompresör bölümü, giriş havasını yüksek hızda yanma odasına ileten bir işleve sahiptir. Yanma odası, yanma işlemi için yakıt girişi ile birlikte ateşleyiciden meydana gelir. Yanma sonrası genişleyen hava türbin kanatlarına yönlendirilir. Harekete başlayan kanatçıklar, bir şaft aracılığıyla kompresöre bağlı olan türbini döndürerek motorun çalışmasını sağlar. Motorun çıkışından hızla çıkan egzoz gazları itme gücünü oluşturur.

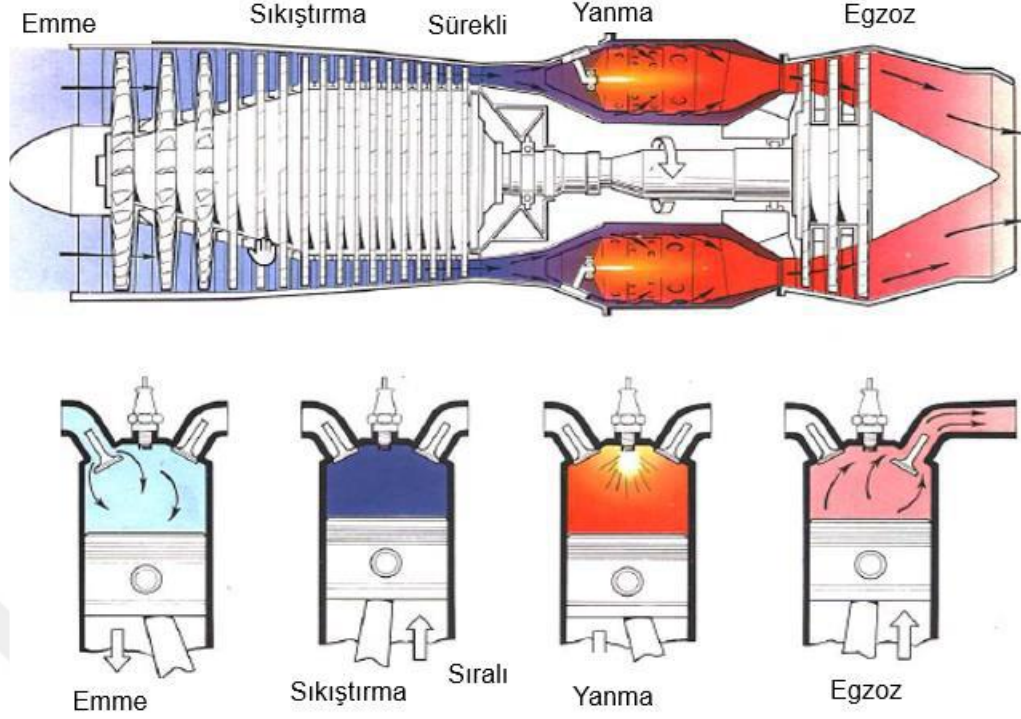
Turboprop motorları, bir gaz türbini motoru, dişli kutusu ve bir pervane birleşimidir. Temel olarak, turboprop motorlar, herhangi bir gaz türbini motoru gibi bir kompresör, yanma odası, türbin ve bir egzoz içerir. Bir turboprop motorunda egzoz gazları, daha düşük irtifalarda yakıt tasarrufu için türbin miline bağlı bir pervaneyi döndürmek için kullanılır. Arkadaki türbin, sıcak gazlarla çevrilir. Türbine bağlı mile, kompresör ile birlikte hava girişindeki pervane bağlıdır. Küçük uçaklarda ve kargo uçaklarında kullanılmaktadır. Nispeten düşük irtifada seyreden hava araçlarında yüksek verimlilik sağlar.

Turbofanlar, turbojet ve turboprop motorlarının en iyi özelliklerini birleştirmek amacıyla geliştirilmiştir. Turbofan motorları, yanma odasının etrafına ikincil bir hava akışını yönlendirerek ek itme kuvveti üretmek için tasarlanmıştır. Daha sessizdir, düşük hızda daha fazla itme gücü üretir. Yakıt tüketimi de turbojetlere göre daha azdır. Günümüzdeki uçakların çoğunda turbofan jet motorları kullanılmaktadır.

Dördüncü yaygın jet motoru türü **turboşafttır**. Bu tür motorlar turboprop motorlara benzer biçimde bir shaftta güç sağlayarak güç üretir. Ancak hava girişindeki pervanesi bulunmamaktadır. Egzos çıkışından itme gücü yerine shaft gücü elde edilir ve bu güç ile başka bir ekseninde yer alan pervaneye iletilir. Turboşaft motorları ile turbojet motorları arasındaki temel fark, turboşaft motorlarında genişleyen gazların çoğunun itme kuvveti üretmek yerine ek bir türbini çalıştırmak için kullanılmasıdır. Birçok helikopter turboşaft motorları kullanır. Ayrıca, turboşaft motorları, büyük uçaklarda yardımcı güç üniteleri olarak da yaygın olarak kullanılmaktadır.

Bir diğer motor çeşidi ise **propfan** olarak adlandırılır. Bu motor tipi turboprop ve turbojet motorlarının birleşmesinden meydana gelmektedir. Motorun egzos kısmında yer alan ve motor gövdesinden dışarıda konumlanmış pervaneler daha fazla hava akışı sağlayarak motorun verimini artırmaktadır. Gürültülü çalışması dezavantajına karşılık sağladığı yakıt ekonomisi ve daha küçük boyutlarda olmasından kaynaklı hafif olması avantajları olarak görülmektedir(Walsh ve Fletcher, 2004).

Gaz türbinli motorlar, içten yanmalı motorlar sınıfındadır ve 4 zamanlı pistonlu motorlarla benzer bir çalışma prensibine sahiptir. Tek fark, bu 4 zamanın sıralı olarak değil, aynı anda ve sürekli gerçekleşmesidir. Şekil 3.3'te görüldüğü gibi, emme, sıkıştırma, yanma ve egzos aşamaları; motorun kompresör, yanma odası ve türbin-egzos bölümlerinde eş zamanlı olarak gerçekleşmektedir (Royce, 1996).

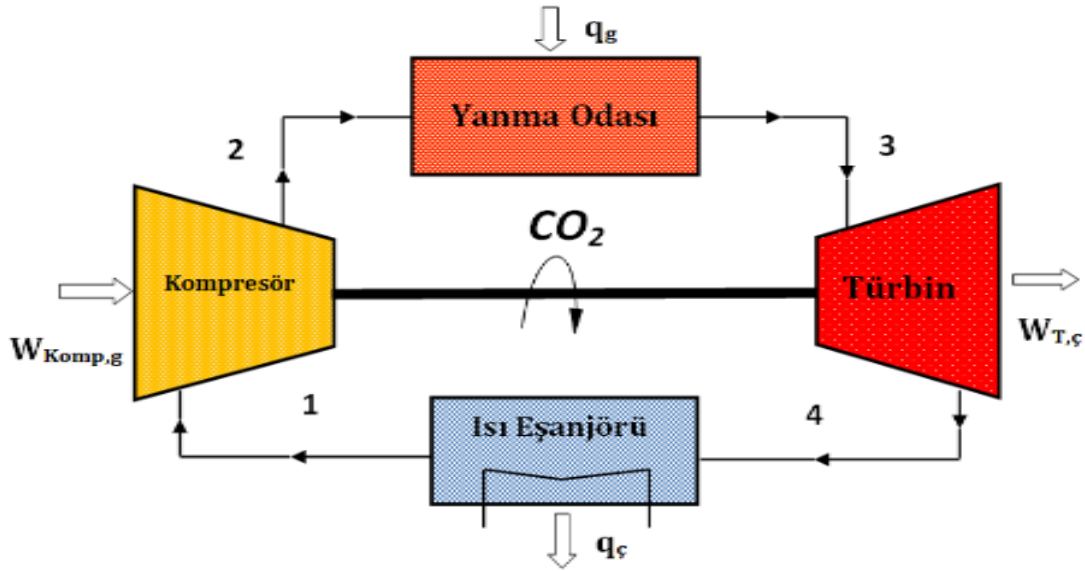


Şekil 3.3. Pistonlu ve Tepkili Motorların Çalışma Benzerliği.

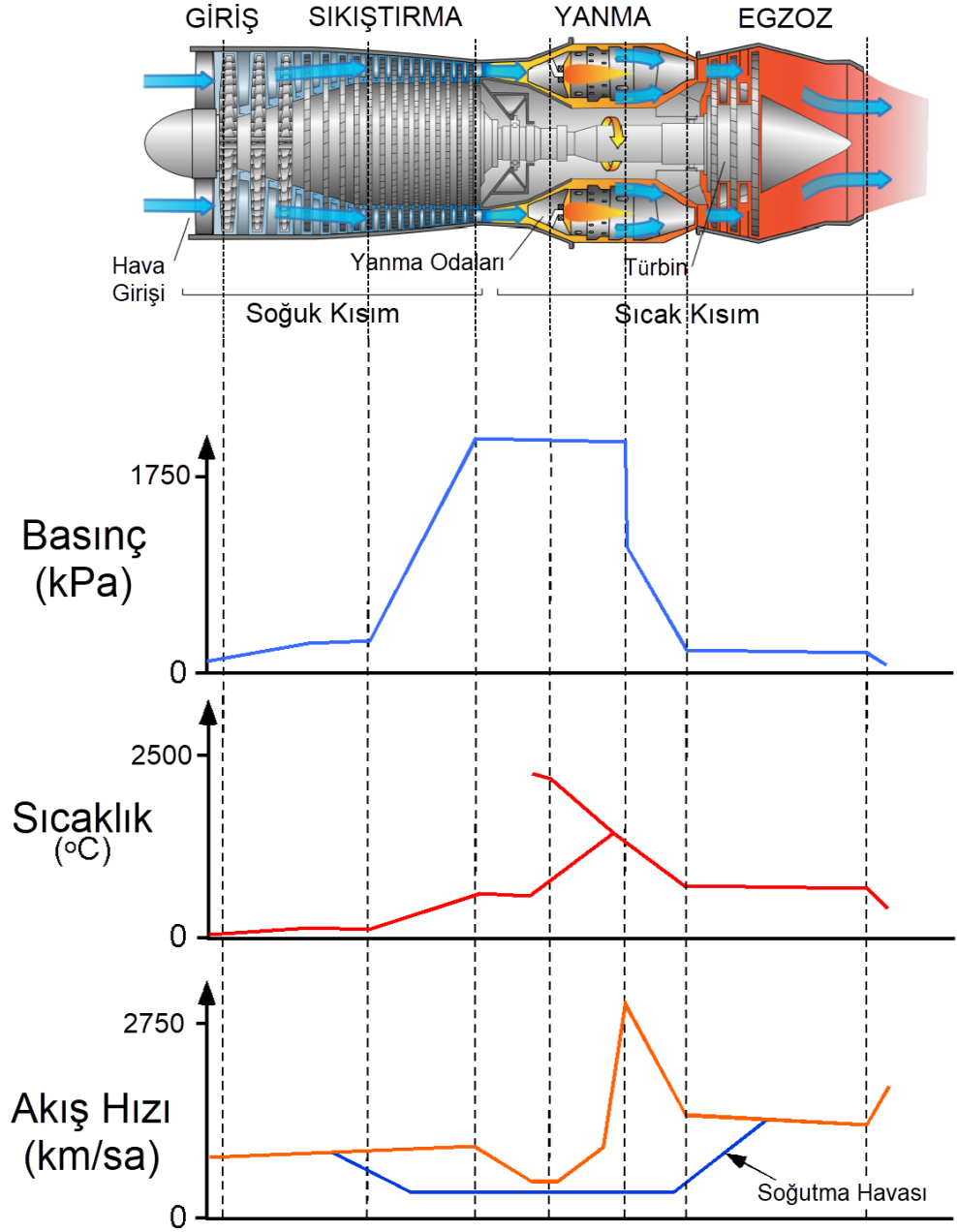
Gaz türbini motorunun türbin bölümü, sadece hava girişi bölümündeki pervaneyi döndürmekle kalmaz, aynı zamanda çıkış mili gücü üretme görevini de üstlenir. Ayrıca, motorun kompresörünü ve tüm aksesuarlarını çalıştırmak için gerekli olan enerjiyi sağlamalıdır. Bu görevleri yerine getirirken, yüksek sıcaklık, yüksek basınç ve hızla hareket eden gazı genişleterek, yanmış gazın enerjisini mekanik enerjiye dönüştürür. Gerekli enerjiyi üretebilmek için türbine büyük bir hava kütlesi sağlanmalıdır. Bu hava kütlesi, havayı motora çeken ve sıkıştırarak türbine yüksek basınçlı hava sağlayan kompresör tarafından temin edilir. Kompresör, türbinden gelen mekanik enerjiyi gaz enerjisi olarak basınç ve sıcaklık biçimine dönüştürerek bu işlemi gerçekleştirir. Yani türbin, yanmış gaz enerjisi ile ürettiği mekanik enerjinin bir kısmını, prosesin devam edebilmesi için, diğer motor parçalarına aktarır.

Gaz türbinli motorların çalışma prensibi, termodinamik açıdan Brayton çevrimi ile açıklanabilir. Brayton çevrimi, genellikle gaz türbinlerinde kullanılan, periyodik bir işlemi tanımlar. Günümüzde geçerli olan gaz akışkanlı güç çevrimleri içinde önemli bir yere sahiptir. Diğer içten yanmalı güç çevrimleri gibi açık bir sistem olmasına rağmen, termodinamik analiz için egzoz gazlarının ikinci bir ısı değiştiricisinden geçtikten sonra içeri alınarak tekrar kullanıldığı varsayılır ve bu sayede kapalı bir sistem gibi analize uygun hale gelir. Bu çevrim, adını mucidi George Brayton'dan

almıştır. Brayton çevrimi günümüzde en yaygın olarak gaz türbinli makinelerde kullanılmaktadır. Bu çevrimde kompresör, yanma odası ve türbin olmak üzere üç temel bileşen bulunur. Çevre koşullarından kompresör vasıtasıyla çekilen hava sıkıştırılarak sıcaklığı ve basıncı artırılır. Yüksek basınçlı bu hava ise yakıtların sabit bir basınç altında yakıldığı yanma odasına girer. Yanma odasında yüksek sıcaklığa ulaşan gazlar, enerjisini türbin üzerine aktararak yararlı iş üretmiş olur. Daha sonra ise atık gazlar ise atmosfere atılarak açık çevrim tamamlanmış olur. Kapalı çevrimde sıkıştırma ve genişleme işlemleri aynı kalmaktadır. Ancak yanma işlemi sisteme sabit basınçta ısı verilmesi, egzoz işlemi de çevreye sabit basınçta ısı verilmesi olarak değişmektedir (Ceylan ve ark., 2021).



Şekil 3.4. Kapalı Brayton Çevrimi Şeması.



Şekil 3.5. Gaz Türbinli Motorlarda Basınç, Sıcaklık ve Akış Hızı Grafiği.

Sıkıştırılarak 1750 kPa üzerindeki basınçlara ve 1000 °C üzeri sıcaklıklara ulaşan hava, yanma odasında yakılarak türbinlere gönderilir. Yanma sonrası akışkanın hızı saatte 2750 km ve sıcaklığı yaklaşık 2500 °C olacak şekildedir. Türbinlere gönderilen yüksek hız ve yüksek sıcaklığa sahip karışım, türbinlere ulaştığında 1500 °C seviyelerine kadar soğumaktadır. Yüksek hızdaki akışkan türbin kanatlarının formunu da kullanarak kanatları harekete zorlar. Türbinlerin hareket etmesi ile shaft döndürülür. Shaft kuvveti ile kompresör ve diğer bileşenler hareketlendirilir. Kalan güç ise itki kuvveti olarak egzozdan dışarıya atılır (Leishman, 2023).

Termal verim, ideal koşullarda yakılan yakıttan elde edilen ısı enerjisinin işe dönüştürülme oranını ifade eder. Bu dönüşümü dolayısıyla verimi artırmak için, türbine iletilen akışkanın daha yüksek bir sıcaklığa sahip olması gereklidir. Ancak bu durumda, akışkanın ulaşacağı sıcaklıklar yanma odası ve türbin gibi motorda kullanılan malzemelerinin sıcak dayanıklılık sınırlarına ulaşabilir veya üzerine çıkabilir. Bu nedenle, yüksek sıcaklığa maruz kalan parçalarının korunması ve motorun sürekli olarak çalışabilmesi son derece önemlidir. Bu amaçla geliştirilen teknolojilerden bazıları, genellikle soğuk ve yeterli basınca sahip olan havayı kompresörden çekerek yanma odası ve türbin materyallerinin soğutulması amacıyla kullanılmasını içerir.

Yanma odası duvarları ve türbin kanatları gibi bileşenlerin soğutma performansının artırılması için sürekli olarak çalışmalar yapılmaktadır. Bu sayede yüksek yanma odası sıcaklıklarında çalışarak termal verimi artırmak hedeflenmektedir. Daha iyi duvar soğutma sistemleri ve gelecekte kullanılacak seramikten imal edilmiş türbin kanatları, daha yüksek yanma odası sıcaklık seviyelerinde çalışmaya imkan tanıyacak ve böylece termal verimi artıracaktır. Ayrıca, metal parçaların korunması için termal bariyer kaplama teknolojisi de geliştirilmektedir (El-jummah, 2014).

3.2. Termal Bariyer Kaplamalar

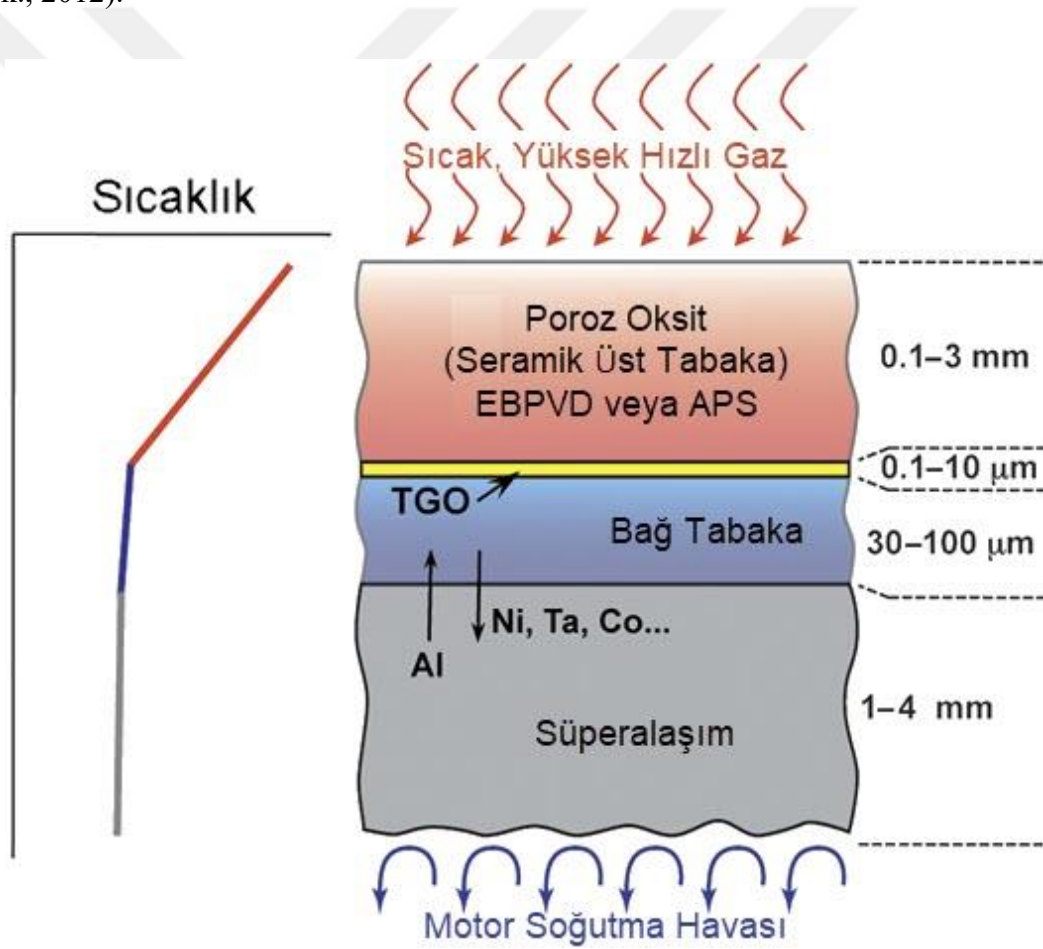
Termal bariyer kaplama, genel tanım olarak, çalışma ortamının yüksek sıcaklıklara sahip olduğu gaz türbini ve motor parçalarının termal özelliklerinin artırılması amacıyla kullanılan yüzey modifikasyon işlemidir. Bu kaplamaların kullanımı ile altlık metalin dayanabileceği sıcaklıklardan daha yüksek sıcaklıklara ulaşabilmekte ve bu yüksek sıcaklıklarda çalışma sağlanabilmektedir. Bu sayede çalışma verimi artmaktadır.

Termal bariyer kaplamalarda olması gereken özellikler aşağıdaki gibidir;

- Yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı yaratabilmeleri için yüksek erime noktaları ve çalışma sıcaklıklarının olması gerekmektedir.
- Çalışma sırasında çatlama veya dağılması istenmediğinden oda sıcaklığı ile çalışma sıcaklıkları arasında hacimsel değişiklikleri engellemek için faz kararlılığı yüksek olmalıdır. Böylece kaplamada sıcaklık sebebiyle oluşan faz değişikliklerinin neden olduğu önemli boyutsal değişimler önlenmiş olacaktır.
- Oksidasyon direnci için kimyasal inertlik göstermelidir.

- Kaplanacak metal yüzey ile termal genişleme katsayıları arasında uyum sağlanmalıdır.
- Mekanik gerilmelere karşı dirençli ve elastisite modülünün düşük olması gerekmektedir.
- Düşük termal iletkenlik göstermelidir.

Termal bariyer kaplamalar tipik olarak; bir süperalaşım altlıktan, kaplama işlemi esnasında oluşup çalışma esnasında bağ kaplamasının oksitlenmesiyle ortaya çıkan termal gelişen oksitten , seramik üst kaplamasının metalik altlığa daha iyi yapışmasını sağlayan ve altlığı oksitlenmeye karşı koruyan bir bağ kaplamadan ve asıl sıcaklık yalıtımını sağlayan seramikten oluşan bir üst kaplamadan oluşmaktadır (Clarke ve ark., 2012).



Şekil 3.6. Termal Bariyer Kaplama Katmanları.

3.2.1. Termal bariyer kaplama katmanları

3.2.1.1. Altlık

Gaz türbinli motorlarda altlık(taban) malzemesi olarak son dönemde genellikle Nikel, İndiyum ya da Krom esaslı süperalaşımalar kullanılmaktadır. Bu süperalaşımaların erime sıcaklığı 1100-1200 °C aralığındadır. Yüksek sıcaklık ve basınçlarda korozyon ve oksidasyon direnci gösteren bu süperalaşımalar için çalışma sınırı, erime noktalarının %90'ı kadardır. Motor sistemindeki mekanik yükü süperalaşım altlık taşımaktadır.

3.2.1.2. Bağ tabaka

Metalik bağ tabakanın kullanılmasının asıl sebebi, seramik üst tabakanın metal altlığa daha iyi tutunmasını sağlamak ve yüksek sıcaklık ile oluşacak termal genişmeyi sönmüleyerek seramik kaplamanın ömrünü uzatmaktır. Bağ tabakası aynı zamanda gözenekli seramik tabakadan sızan oksijen moleküllerinin atlığa ulaşip oksit oluşmasını da önler.

Günümüzde yaygın olarak kullanılan bağ tabaka MCrAlY olarak ifade edilen süperalaşım esaslı bir kaplamadır. Bu ifadede M; nikel, kobalt, demir veya bu elementlerin birleşiminden oluşan alaşımı temsil etmektedir. Bağ tabaka içinde bulunan Al elementi oksidasyon ömrünü arttırırken sünekliği önemli miktarda azaltmakta ve Cr elementi ise bağ tabaka yüzeyinde zamanla oluşan krom oksit (Cr_2O_3) sayesinde oksidasyon ve korozyon direnci sağlamaktadır. Y(itriyum) elementi ise seramik tabakada da yer aldığından yapışmanın iyi olmasını sağlamaktadır.

3.2.1.3. Termal gelişen oksit (TGO)

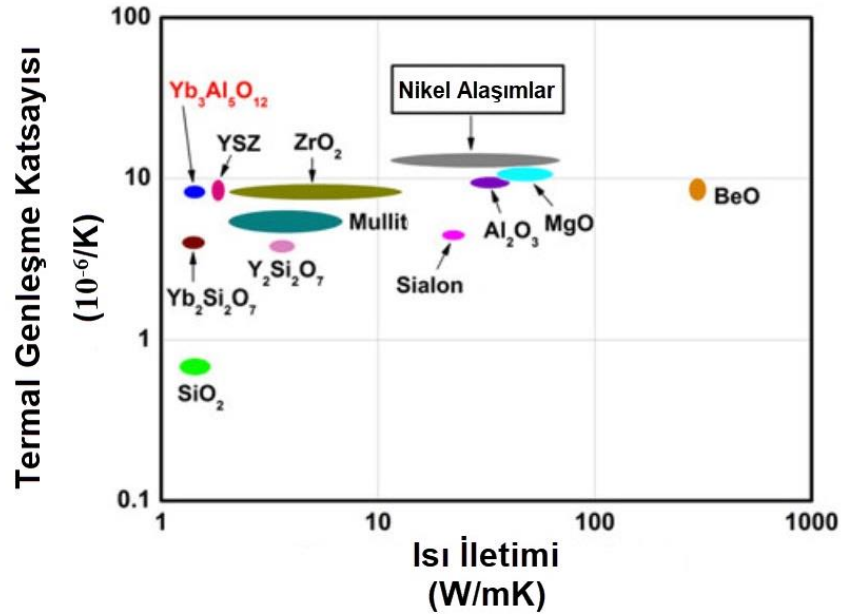
Termal gelişen oksit (TGO), seramik tabakanın gözenekli yapısından geçen hava moleküllerinin metal yüzeye ulaşmasının ardından, yüksek sıcaklığın etkisiyle, metal yüzeyden özellikle Al gibi aktif elementler ile oksijenin reaksiyona girmesi sonucu oluşan oksit tabakasına verilen isimdir. TGO varlığı, seramik üst tabaka ile bağ tabaka arasındaki yapışmayı artırır. Bu oksit tabakası, genelde, seramik üst katman kaplaması başladığı zaman oluşmaya başlamaktadır. Kaplama ve kullanım sırasında bağ tabaka ile seramik üst tabaka arasında büyümeye başlayan Al_2O_3 esaslı TGO katmanı, diğer katmanlara oranla çok daha ince olsa da, bağ tabaka ile gösterdiği yüksek termal genişme katsayısı uyumsuzluğundan dolayı kaplama içerisinde gerilme oluşumunu tetiklemektedir. Bu uyumsuzluğun sebebi ise yüksek yoğunluklu metalden düşük

yoğunluklu oksit forma (seramik) geçiş yaparken oluşan hacim farklılığıdır. Termal bariyer kaplama katmanları içerisindeki bu gerilmeler özellikle oksitleme özelliği fazla olan yüksek sıcaklıklardaki kullanım koşullarında ortaya çıkmaktadır. Bu koşullarda TGO katmanın giderek kalınlaşması (6- 8 μm) gerilmelerin artmasına neden olur ve bunun sonucunda termal bariyer kaplama sisteminde kırılmalar, ayrılmalar gibi hasarlar gözlemlenmektedir.

3.2.1.4. Seramik üst tabaka

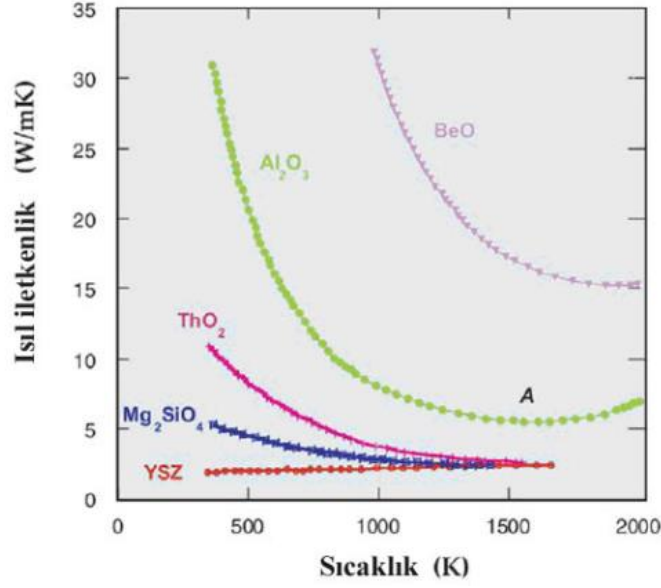
Termal bariyer kaplama sisteminin en üstünde bulunan, gaz türbinlerinde sıcak gazlara direk maruz kalan tabakadır. En önemli görevi; ısıl yalıtım yaparak altlık malzemesini sıcaklıktan korumaktır. 1950'li yıllardan beri termal bariyer kaplamalar konusunda çeşitli malzeme çalışmaları yapılmıştır.

Düşük termal iletkenlik, faz kararlılığı, yüksek erozyon direnci gibi özellikleri bakımından Al_2O_3 , TiO_2 , Müllit($3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2$), $\text{Y}_3\text{Al}_x\text{Fe}_{5-x}\text{O}_{12}$, CeO_2+YSZ ve $\text{La}_2\text{Zr}_2\text{O}_7$ gibi çeşitli malzemeler seramik tabaka olarak kullanılmıştır.



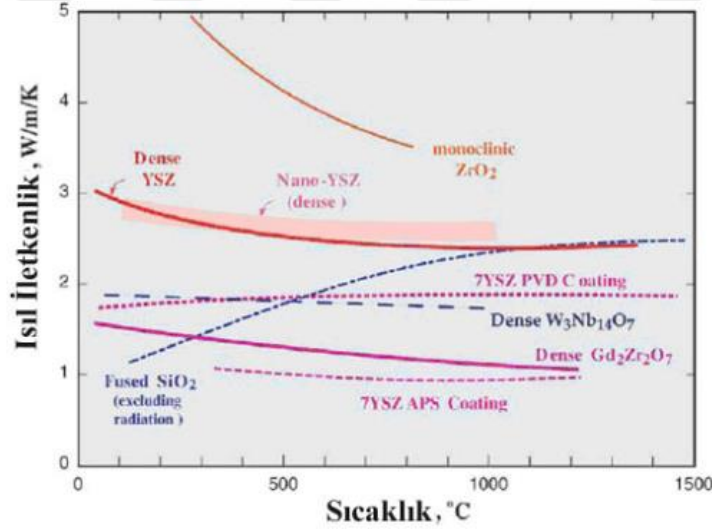
Şekil 3.7. Seramik Katman Malzemelerin Termal Özellikleri.

Zirkonyum oksitin düşük sıcaklıklardan yüksek sıcaklara kadar bütünlüğünü bozmadan kalıyor olması ideal seramik malzeme yapmaktadır. Ancak tek başına faz bütünlüğünü koruyamamaktadır.



Şekil 3.8. Değişen Sıcaklığa Bağlı Seramik Malzemelerin Isı İletim Katsayıları.

CaO, MgO, Y₂O₃ gibi oksitlerin zirkonya içerisine stabilize edilmesi bu sorunu da çözmüştür. Günümüzde geliştirmiş en iyi ve en yaygın seramik üst tabaka, %8 İtriyum ile stabilize edilmiş zirkonyum (8YSZ) olarak adlandırılan seramiktir (Diltemiz, 2010).



Şekil 3.9. Düşük Isıl İletim Katsayılı Seramik Malzemelerin Isıl İletkenliklerinin Sıcaklığa Bağlı Olarak Karşılaştırılması.

Seramik malzeme olan zirkonyum dioksit (ZrO₂); $11-13 \times 10^6 \text{ K}^{-1}$ ısı yayılma katsayısı ve tam yoğun bir materyal için 1000°C'de yaklaşık 2,3 W/(m.K) ısı iletim katsayısı ile her iki gereksinimi de iyi derecede karşılamaktadır. Bu özellikler ortaya konan gözeneklilik tarafından daha fazla indirgenebilmektedir ve Şekil 3.9'da farklı

malzemelerin değişen sıcaklıklar altında gösterdikleri ısı iletimleri yer almaktadır (Clarke ve Phillpot, 2005).

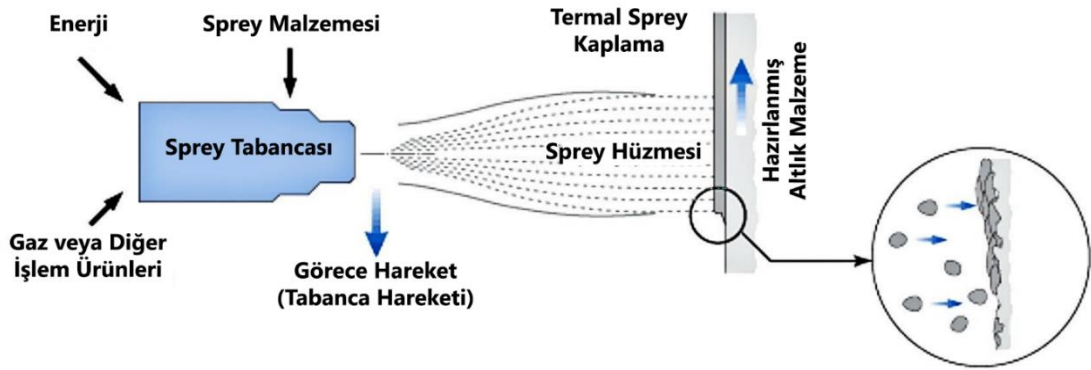
3.2.2. Termal bariyer kaplama yöntemleri

Termal bariyer kaplama yapabilmek için, günümüzde, temel olarak kullanılan iki farklı kaplama tekniği bulunmaktadır: Plazma Sprey Kaplama Yöntemi (APS) ve Elektron Demeti ile Fiziksel Buhar Biriktirme (EB-PVD) Yöntemi.

Plazma sprey kaplama; işlem kolaylığı, maliyet ve iyi ısı yalıtkanlık sağlarken fiziksel buhar biriktirme ise düşük yüzey pürüzlülüğü, yüksek termal şok direnci ile öne çıkmaktadır. Her iki teknik de, parçaların kullanım koşullarına göre ne çıkan özelliklerine tercih edilebilmektedir.

3.2.2.1. Plazma sprey kaplama yöntemi

Plazma sprey kaplama yöntemi, termal sprey kaplama yöntemleri arasında yer alan bir tekniktir. Termal sprey ise, metal veya metal olmayan toz, tel veya çubuk şeklindeki malzemelerin ergime noktasına yakın sıcaklıklara kadar ısıtılarak ergimiş ya da yarı ergimiş durumda bir altlık malzeme üzerine biriktirilmesi ile oluşturulan kaplama yöntemidir.



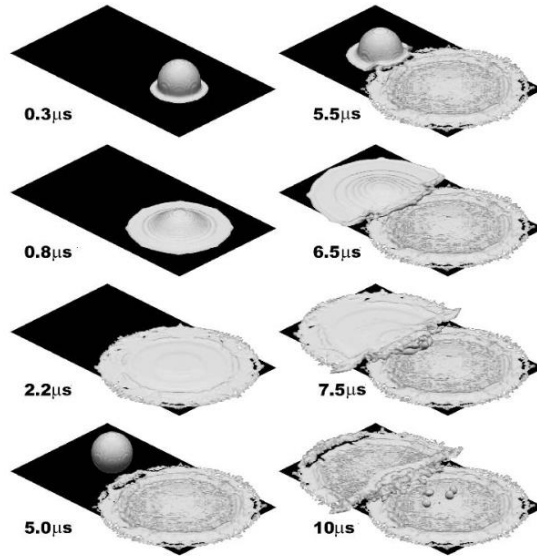
Şekil 3.10. Şematik Olarak Termal Sprey Yöntemi ile Kaplama Oluşumu.



Şekil 3.11. Termal Sprey Kaplama Sistemlerinin Sınıflandırılması.

Sprey tabancasında üretilen yüksek ısı ile ergimiş veya yarı ergimiş toz ve metal damlacıkları altlık malzeme üzerine doğru çarptırılır. Bu şekilde yayılan damlacıklara “splat” ismi verilir. Splatlar üst üste birikerek altlık yüzeyinde, herhangi bir kimyasal bağlanma ile değil, mekanik bir bağlanma oluşması ile altlık malzemenin üst yüzeyinde bir tabaka oluşturur (Pasandideh-Fard ve ark., 2002).

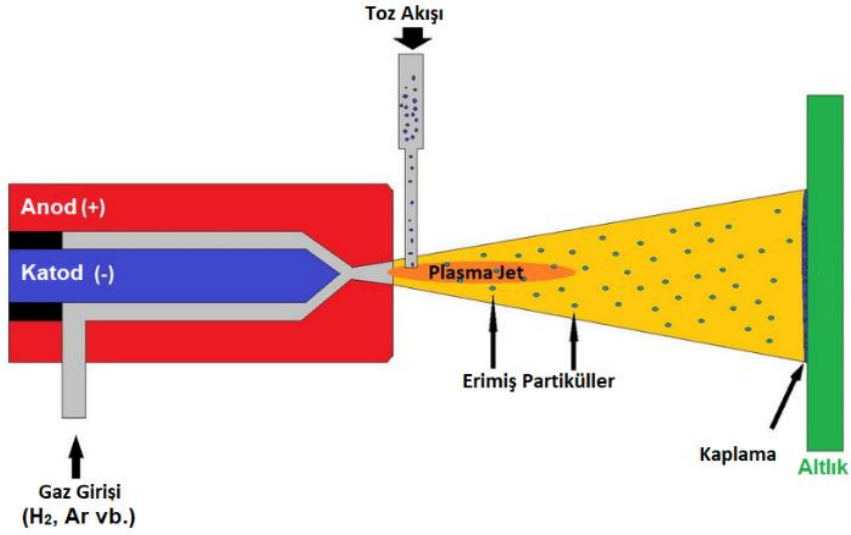
Termal sprej yönteminin en önemli avantajları; oldukça geniş malzeme yelpazesine hitap etmesi, altlık malzemenin ısıtılmaya ihtiyaç duyulmaması ve parçaların boyutlarına bakılmaksızın hasar görmüş parçaların temizlenerek tekrar kaplanabilmeleri olarak sayılabilir (Özgürlük, 2016).



Şekil 3.12. Splat Oluşumu ve Biriken Splatların Kaplamaya Dönüşmesi.

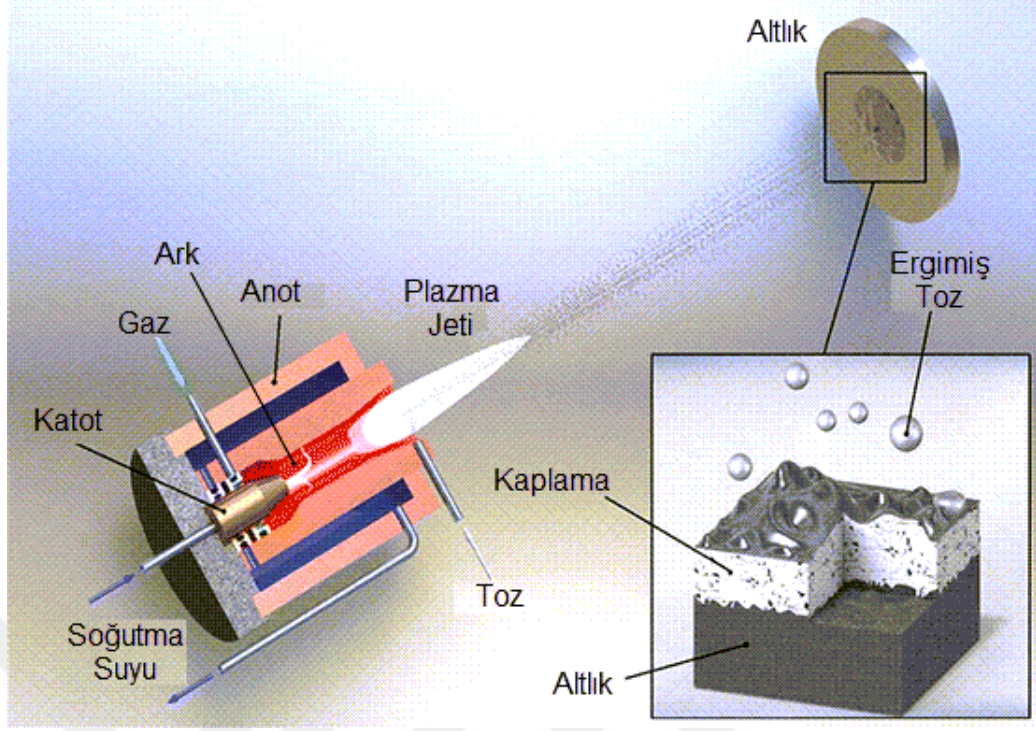
Plazma sprey kaplama tekniğinde, altlık malzeme üzerine biriktirmek istenen metalik, seramik veya bunların karışımı şeklindeki tozların plazma enerjisi ile ergitilerek püskürtülmesi esastır. İşlemin temel enerji kaynağı oluşturulan elektrik enerjisi ile üretilen plazmadır. Plazma kavramı için farklı açıklamalar yapılmaktadır. Fizik ve kimya alanlarında plazma ifadesi iyonize olmuş gaz anlamındadır. Katı bir cismi oluşturan atomlarında yer alan moleküllerin hareketi çok azdır. Cisim içerisindeki moleküllerin ortalama kinetik enerjisi ısıtma gibi bir dış enerji verici yöntem ile arttırıldığında cisim önce sıvıya sonra da gaz fazına dönüşür. Gaz fazında cisimdeki elektronların hareketi çok hızlıdır.

Gaz fazından sonra da maddeye ısı aktarımı devam ederse cisim moleküllerinde iyonlaşma başlayabilir. Bu ortamda bir elektron yörüngede kalmasını sağlayan çekirdek çekiminden kurtulur ve serbest hale çıkar ve elektron uzayı meydana getirerek maddeye yeni bir form kazandırır. Atomun bir elektronu eksik olacak ve net olarak yükü pozitif olacaktır. Madde ısıtıldıkça gaz içindeki diğer atomlar da iyonlaşacak ve bu iyonlaşma işlemi defalarca tekrarlanır. Serbest elektron ve iyon bulutları oluşmaya başlar. Fakat bazı atomlar nötr kalmaya devam eder. Oluşan bu iyon, elektron ve nötr atom karışımı, plazma olarak adlandırılır. Plazmanın birim hacmi içindeki negatif yüklü parçacıkların sayısı (genelde elektronlar) pozitif yüklü parçacık sayısına (genelde iyonlar) yaklaşık olarak eşit olduğundan, plazma elektriksel olarak nötrdür. Plazma en yalın anlamıyla maddenin dördüncü hali olarak tanımlanan, içerisinde eşit sayıda serbest elektron ve pozitif iyon barındıran yüksek enerjili bir gazdır denebilir. Plazmanın en önemli iki avantajı çok yüksek sıcaklığa çıkabilmesi ve maddelere iyi ısı transferi sağlamasıdır (Boyd ve Sanderson, 2003).



Şekil 3.13. Plazma Sprey Sistemi İle Kaplama Oluşumunun Şematik Gösterimi.

Plazma ile yüksek ısı gücü elde imkanı sağlanması, yüksek ergime noktasına sahip seramik ve metal esaslı alaşım tozlarının kaplama uygulamalarında kullanılmasını mümkün kılar. Seramik içerikli malzemeler, yüksek aşınma dayanımı ve yüksek sertlik özellikleri, hammaddesinin kolay bulunurluğu ve temini konusundaki maliyet avantajı, korozyon ve oksitlenme eğiliminin düşük olması, düşük termal iletkenlikleri ve yüksek termal çevrim sayısı özelliklerinin avantajıyla birçok sektör için önemli bir kaplama malzemesi konumundadır. Ancak seramiklerin yüksek ergime noktaları sebebiyle (örneğin Zirkonya'nın ergime derecesi 2715 °C'dir), uygulamalarda kullanılabilirliği/ eritilebilirliği, ancak çok yüksek sıcaklık derecelerine çıktığında mümkün olmaktadır. Plazma enerjisini kullanan plazma sprej kaplama teknolojisi, yüksek ergime sıcaklığına sahip malzemelerin kaplama maddesi olarak kullanılarak işlenebilirliğine (kaplanabilirliğine) imkan sağlar. Plazma sprej işleminde, suni bir plazma oluşturularak yüksek sıcaklığa (~20000 K) ulaşılır.



Şekil 3.14. Plazma Tabancasının Kesit Görünümü ve Bileşenleri.

Plazma, kaplama tabancası içerisinde bulunan bakır anot ile toryumlu tungsten katot arasında oluşturulan yüksek voltaj arkı (doğru akım) ile oluşturulur. Oluşan yüksek voltajın getirdiği sıcaklığı tabanca içerisinde en aza indirmek için su soğutma kullanılır. Tabanca içerisinden bir soygaz, genellikle argon, ve düşük miktarda hidrojen gazı geçirilir. Anot ve katot arasındaki elektrik arkı bu gaz içerisinde plazma arkı yaratır (Pawlowski, 2008).

Plazma sprey sisteminin uygulandığı ortamın atmosfer basıncına göre farklı teknikler ortaya çıkmaktadır. Normal atmosfer şartlarındaki plazmaya APS (Atmosferik Plazma Sprey), düşük basınç altındaki plazmaya VPS (Vakumda Plazma Sprey), koruyucu gaz atmosferi altındaki plazmaya SPS (Shrouded -Koruyuculu- Plazma Sprey) denmektedir. Termal bariyer kaplamalar APS yöntemi ile üretilmektedir.

Atmosferik plazma sprey kullanılarak elde edilen TBK mikroyapısı, uygulanan proses parametrelerine doğrudan bağlıdır. Kaplama içerisinde birçok gözenek bulunur. Bu gözeneklere kaplama literatüründe porozite adı verilmektedir. Kaplama katmanları arasında yer alan ve küresel şekilli gözenekler ile sıcak püskürtülen kaplamanın oda sıcaklığına soğuması esnasında oluşan termal kalıntı gerilmelerin sebep olduğu ve kaplama yüzeyine dik katmanlar arası çatlaklar, TBK içerisindeki porozitelerden bazılarıdır. Oluşan porozite ağı ve katmanlar arası çatlak ilerlemeleri, kaplamadan

istenen düşük termal iletkenlik özelliğine sahip olmasında önemli bir paya sahiptir (Kulacki, 2017).

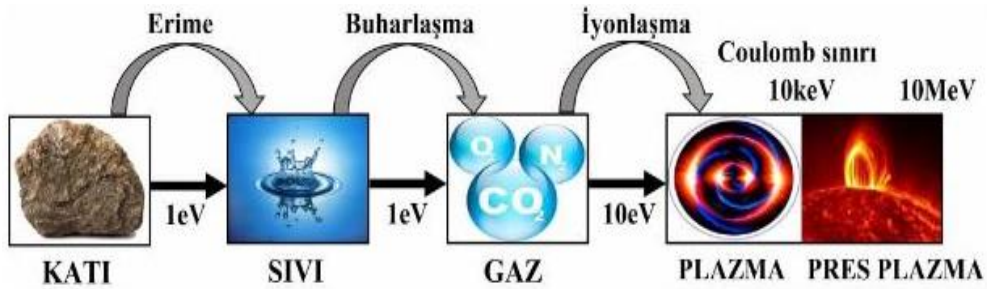
Katmanlar arası porozite boşlukları, kaplama yüzeyine ve dolayısıyla servis şartlarındaki oluşan ısı akısına dik doğrultuda konumlandığı için termal direnç bölgeleri meydana getirerek seramik kaplama tabakasının ısıl iletkenlik değerini yoğun ve boşluksuz zirkonyaya kıyasla yaklaşık yarısına indirmektedir. Buna ilave olarak, kaplama yüzeyine dik çatlaklar, servis şartlarında kaplamanın genişleşerek açılması ve büzülerek küçülebilmesi için uygun ortam sağlar. Bu durum termal şok dayanımını ciddi oranda iyileştirmektedir (Bolot ve ark., 2005)

TBK servis şartlarının çok yüksek sıcaklıklarda olması, seramik kaplama içerisinde yer alan katmanlar arası mikro çatlakların sinterlenme etkisiyle küçülmesi ve hatta kapanmasına yol açar. Bu durum seramik tabakanın termal iletkenliğini artırır ve termal şok davranışında kötüye gidişe sebep olur.

Seramik kaplama tabakası içerisindeki porozite boşluklarının artırılması kaplamanın iletkenlik değerini düşürmektedir, ki bu istenen durumdur. Ancak gözenek miktarının olması gereken miktarı aşması durumunda kaplama taneleri arasındaki bağ kuvveti ve tutunma dayanımı azalır. Birbiri ile bağı zayıflayan kaplamanın mekanik bütünlüğü bozulmaktadır (Portinha ve ark., 2005).

Plazma tanımı ve oluşumu

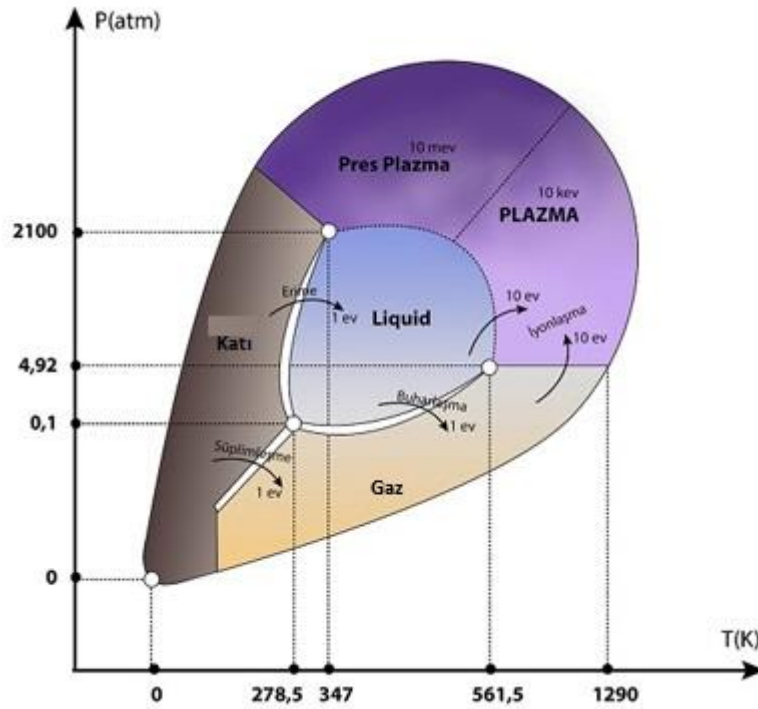
Zaman içerisinde maddenin ve atom yapısının yanı sıra elektriğin doğasının da anlaşılması, Aristoteles'ten beri gelen maddenin halleri tanımlarına yeni bir halin eklenmesine öncü olmuştur. 100 yıldan daha uzun bir süre önce, Crookes vakum tüplerinde elektrik deşarj deneyleri esnasında elektron ve proton karışımı yüklü parçacıklardan oluşan yeni bir gaz türü olduğunu öne sürdü.



Şekil 3.15. Maddenin Halleri

1923 yılında ise Amerikalı kimyacı Irving Langmuir gazlarda elektriksel deşarj üzerine incelemelerde bulundu ve 1929 yılında diğeri bir Amerikalı bilim adamı Lrvy Tonks ile yaptığı deneylerde, elektrik deşarjı sırasında salınım yapan elektron bulutunu tanımlamak üzere “plazma” terimini kullandı. Böylece plazma literatüre maddenin dördüncü hali olarak geçmiştir.

Katı bir cisimde cisimi oluşturan moleküllerin hareketi çok azdır, moleküllerin ortalama hareket enerjisi herhangi bir yöntemle (örneğin ısıtarak) artırıldığında cisim ilk önce sıvıya, sonra da gaza dönüşür. Gaz fazında elektronlar gayet hızlı hareket ederler. Eğer gaz hâlden sonra da enerji vermeye devam edilirse iyonlaşma başlayabilir, bir elektron çekirdek çekiminden kurtulur ve serbest bir elektron uzayı meydana getirerek maddeye yeni bir biçim kazandırır. Atom bir elektronu eksilmiş ve net bir pozitif yüke sahip olmuş olacaktır. Yeterince enerji verildiğinde gaz içinde iyonlaşma defalarca tekrarlanır ve serbest elektron ve iyon bulutları oluşmaya başlar. Ama bazı atomlar nötr kalmaya devam eder. Oluşan bu iyon, elektron ve nötr atom karışımı; “plazma” olarak adlandırılır.



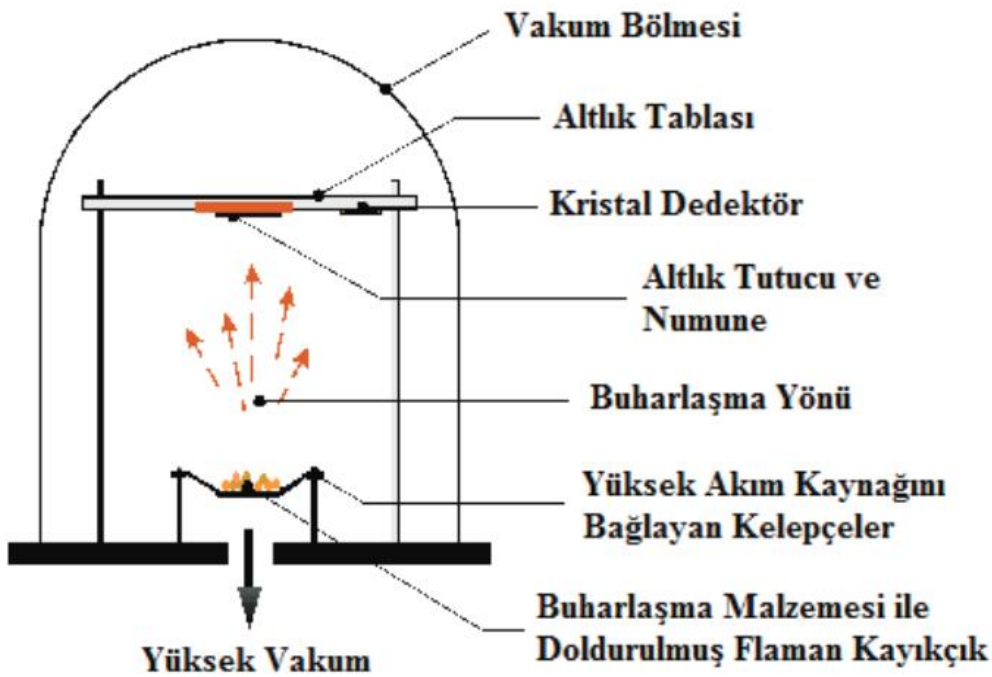
Şekil 3.16. Maddenin Halleri Arasındaki Sıcaklık-Basınç İlişkisi.

Plazma, bütün olarak incelendiğinde elektriksel olarak nötr yapıdadır. İçerisinde yer alan pozitif yüklü iyonlar ile negatif yüklü elektronlar birbirlerini elektriksel olarak

nötr hale getirir. Bununla birlikte plazma, gazların aksine elektrik iletir ve elektriksel alanlar ile etkileşebilir.

3.2.2.2. EB-PVD (Elektron demeti- fiziksel buhar biriktirme) yöntemi

Vakum altında, target ismi verilen kaplanması istenen numunenin buharlaştırılmasını sağlayıcı enerji verilerek altlık üzerine yönlendirilmesi ile ince film kaplama yöntemine Fiziksel Buhar Biriktirme denmektedir. Bu yöntem numune üzerine biriktirilecek buharın oluşturulma şekline göre buharlaştırma ve sıçratma olmak üzere iki farklı gruba ayrılmaktadır. Buharlaştırma yöntemi, target olarak ifade edilen hedef malzemenin katı ya da sıvı fazdan buhar fazına dönüşüncüye kadar bir ısı kaynağı ile ısıtılması tekniğine dayanmaktadır. Sıçratma tekniğinde ise bir kinetik enerji sisteminin target olarak isimlendirilen hedef malzeme üzerine yönlendirildiği ve fiziksel çarpışma sürecinin yaşandığı yöntemdir (Tracton, 2007).



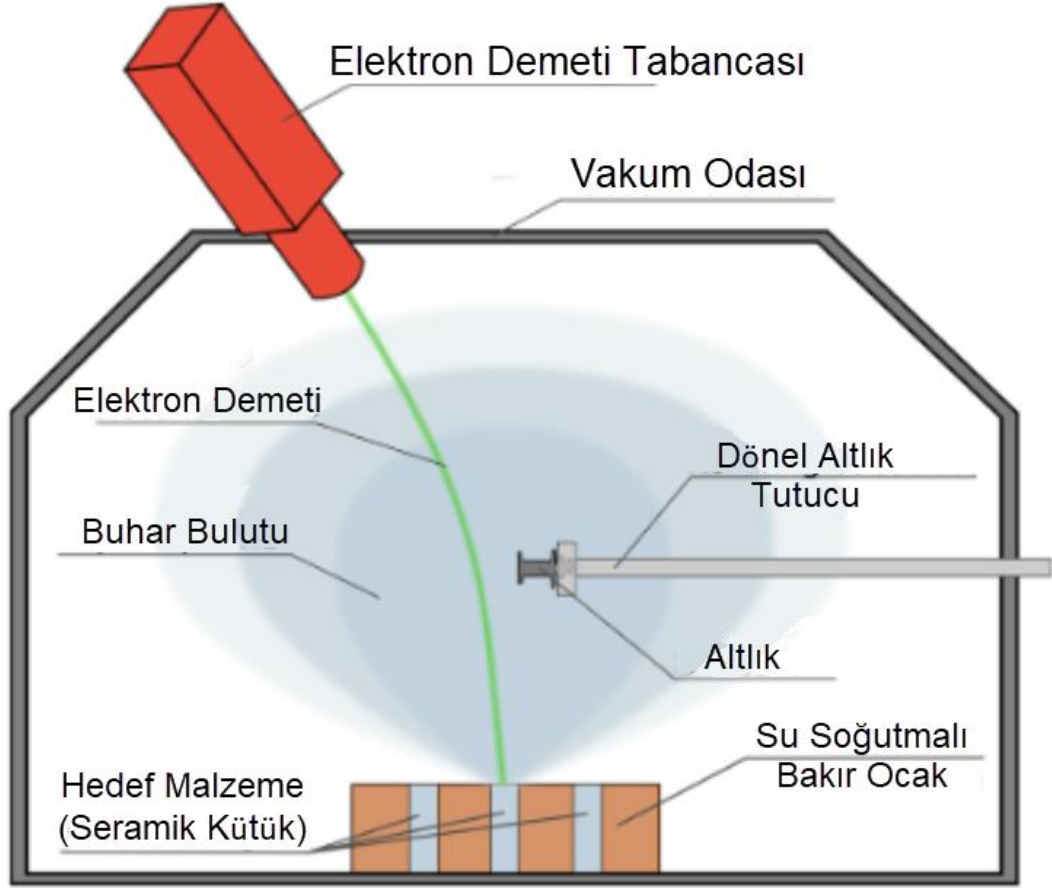
Şekil 3.17. Fiziksel Buhar Biriktirme Yönteminin Şematik Gösterimi.

Fiziksel buhar biriktirme(FBB) prosesleri atomistik biriktirme prosesleridir. Tipik olarak FBB prosesleri birkaç nanometreden binlerce nanometreye kadar kalınlıkta filmlerin biriktirilmesinde kullanılır (Cevher, 2014).

Elektron demeti ile fiziksel buhar biriktirme yöntemi, temel olarak bir elektron kaynağı tarafından hedef malzeme üzerine bombardıman şeklinde iletilen hızlandırılmış elektronları içerir. Demet halinde gönderilen elektronlar, hedef malzemenin ısınmasına

yol açar. Bunun sonucunda hedef malzeme buhar fazına geçerek altlık malzeme üzerinde biriktirilir. Bu yöntem ile yüksek erime sıcaklığına sahip seramik, cam ve metalleri buharlaştırarak kaplamak mümkündür (Mattox, 2010).

Elektron demeti, İngilizce olarak "Electron Beam" olarak ifade edilir. Fiziksel buhar biriktirme ise "Physical Vapour Deposition" şeklinde çevrilmektedir. Bu ifadeler ile EB-PVD olarak İngilizce literatürde yer alan elektron demeti ile fiziksel buhar biriktirme yöntemi, Türkçe olarak ED-FBB şeklinde gösterilir.

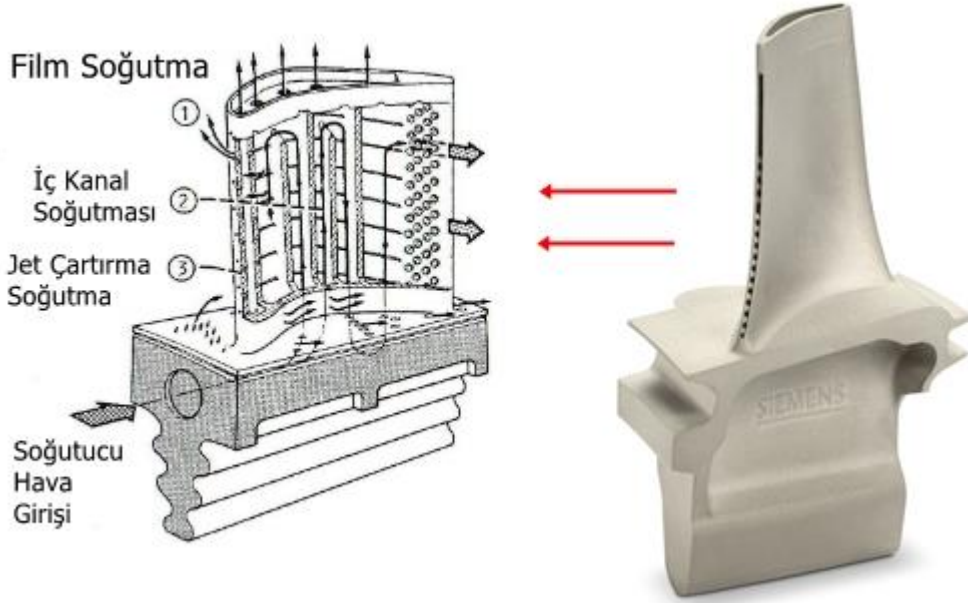


Şekil 3.18. EB-PVD / ED-FBB Yönteminin Şematik Gösterimi.

3.3. Gaz Türbinli Motorlarda Kullanılan Soğutma Teknikleri

İçten yanmalı motorlarda verimi yükseltmek için yanma odası sıcaklığının yükselmesi gerektiği önceki bölümde anlatılmıştır. Ancak daha yüksek sıcaklıklara çıkmanın bazı kısıtları bulunmaktadır. Bu kısıtların en başında motorlarda kullanılan malzemelerin termal dayanımı gelmektedir. Bu konuda termal dayanımı yüksek nikel esaslı metal malzemeler ve üzerine yapılan seramik kaplamalar kullanılması yönünde yapılan çalışmalar verim artışını sağlayıcı yüksek sıcaklıklara çıkılmasını sağlamıştır. Bununla

birlikte kullanılan malzemelerin hasar görmesi ve daha da yüksek sıcaklıkların istenmesi sebebiyle kanatçık içerisinde soğutma fikirleri gündeme gelmiştir. Türbin kanatçığının soğutması çeşitli şekillerde yapılmaktadır. Bunlar; temel olarak film soğutma, jet çarptırma soğutması ve iç kanal soğutmasıdır. En ideali tümünün bir arada olduğu soğutma sistemidir (El-jumma, 2014).



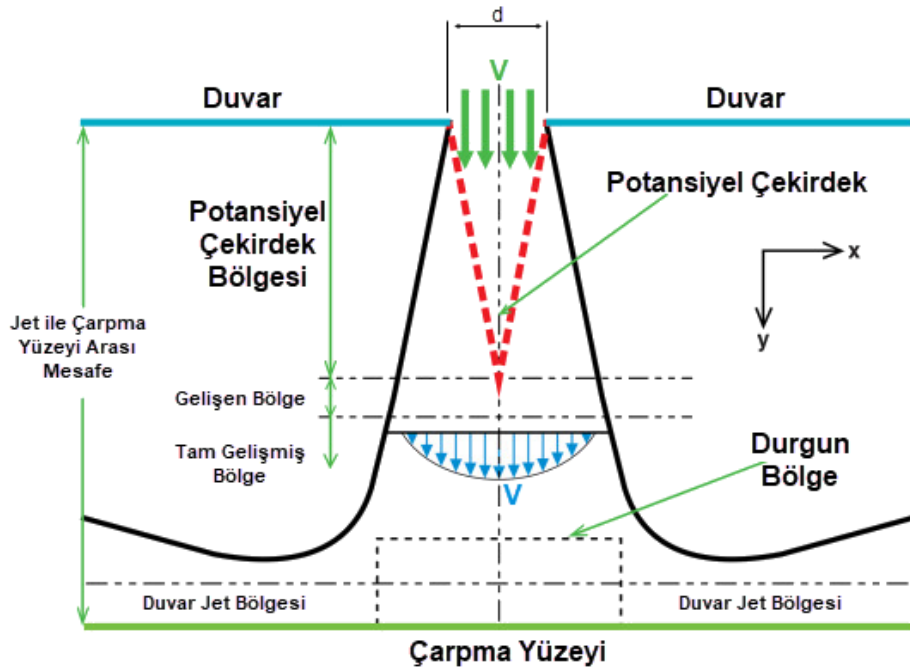
Şekil 3.19. Siemens Firmasının Ürettiği Türbin Kanadındaki Soğutma Sistemleri.

Film soğutmasında amaç; kanatçık yüzeyindeki küçük deliklerden püskürtülen soğuk havanın kanatçık yüzeyinde ince bir hava tabakası oluşturarak yanma odasından gelen sıcak akış havası ile kanatçık metaryali arasında izolasyon katmanı oluşturmaktır. Bu katman ile kanatçık yüksek ısılardan korunmaktadır. Film soğutma tekniğinde delikler yüzeyden dik şekilde konumlanmıştır. Ardından deliğin açılı şekilde delinmesi ile daha verimli bir soğutma elde edildiği görülmüş ve bu soğutma yöntemine sızınım ile soğutma yöntemi (effusion cooling) denmiştir. Sonrasında yapılan çalışmalar ile çok daha küçük çaplı ve çok sayıda açılı delik kullanılarak yapılan soğutma Terleme ile soğutma yöntemi (transpiration cooling) olarak adlandırılmıştır (Koçak, 2019).



Şekil 3.20. Film, Sızınım ve Terleme Soğutma Şematik Gösterimi.

Jet çarpma soğutması ile soğutulması istenen yüzey üzerine küçük hava jetleri gönderilir. Jetin yüzeye çarptığı bölgede türbülans seviyesinin yüksek olmasından ve sınır tabaka kalınlığının inceliği ile ısı geçişi iyileştirilmiş olur (Poettgen, 2020).



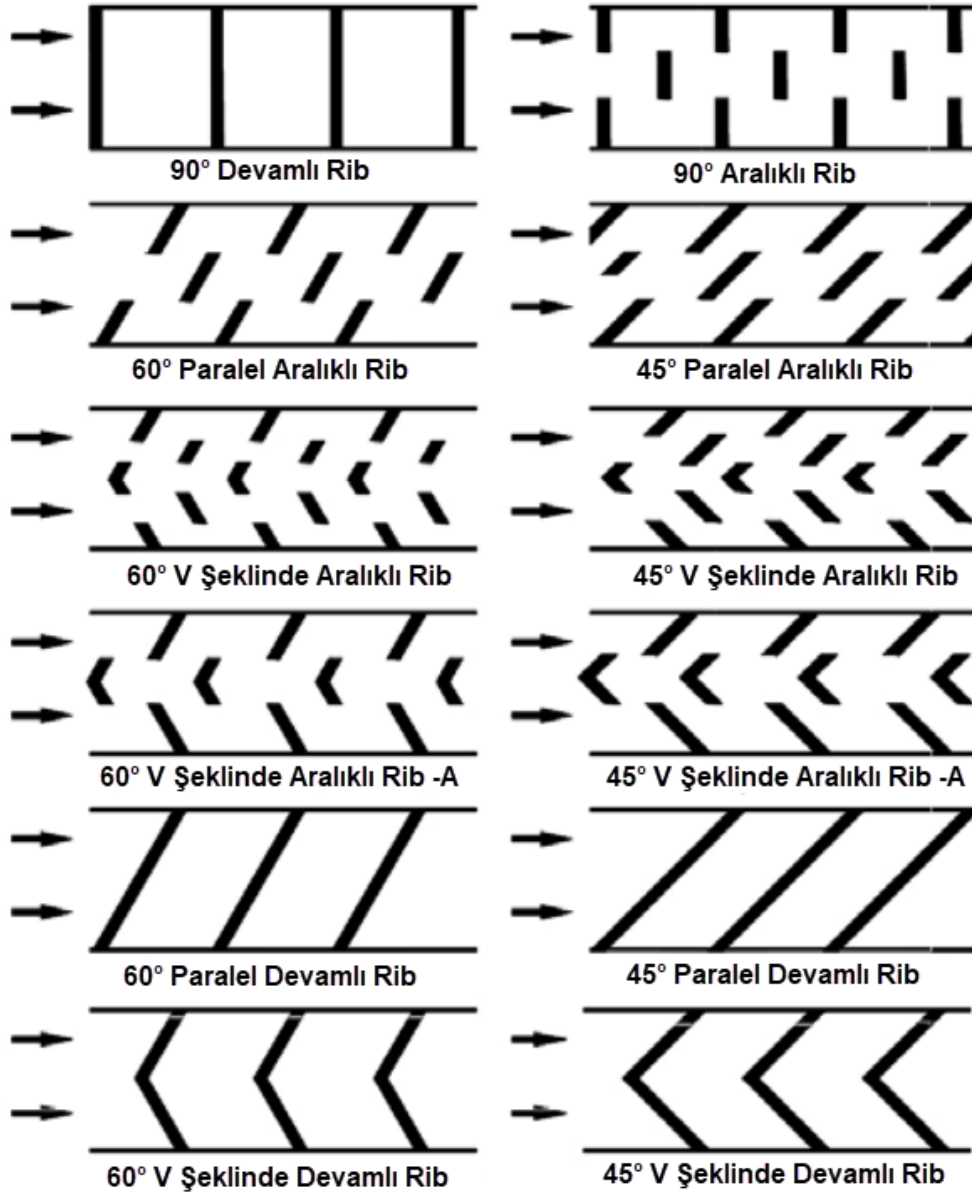
Şekil 3.21. Serbest Jetin Akış Profili ve Akış Bölgeleri.

Serbest jet bölgesi, jetin çıkış noktasından itibaren hızının sabit kaldığı ve çevresindeki akışkanla momentum etkileşiminin gerçekleştiği alanı ifade eder. Bu bölgede jetin çıkış hızına " U_n " adı verilir. Serbest jetin sınırı genişledikçe, potansiyel çekirdek sınırının daraldığı gözlemlenir. Potansiyel çekirdek, jetin merkezinde hızın sabit kaldığı bir bölgeyi tanımlar. Bu bölgenin son noktasında akış hızının " $U_m = 0,95U_n$ " olduğu belirtilmiştir. Jet plakası ile hedef yüzey arasındaki mesafenin büyük olduğu durumlarda, potansiyel çekirdekten itibaren akışın aksel hızında bir azalma meydana gelir.

Akışın yüzeye çarpması sonucunda aksel yöndeki (z yönü) hız düşer ve statik basınç hızla artar. Bu aşamadan sonra akış yön değiştirerek x ya da r yönünde ani bir hızlanma gösterir. Akışın aksel hızının azaldığı ve yüzeye çarptıktan sonra yön değiştirdiği bu alan, "durgun bölge" olarak adlandırılır (Yalçinkaya, 2024).

İç kanal soğutma yönteminde ise kanatçık içine açılmış kanallardan soğuk hava dolaştırılarak kanatçık yüzeyinden soğuk akışkana ısı geçişi sağlanır. Bu yöntemde ısı geçiş performansını iyileştirmek için iç yüzeylere mekanik engeller (rib) yerleştirilir. Bu engeller hem iç kanalda gelişen sınır tabakayı kırarak sınır tabakanın izolasyon özelliğini ortadan kaldırır hem de toplam ısı geçiş yüzeyini büyütür ve daha fazla ısının yüzeyden çekilmesine olanak verir.

Akış rib adı verilen bu engeller ile önce yüzeyden ayrılır, rib arkasında ise tekrar yüzeye yapışmaktadır. Bu sebeple türbin kanatçık iç kanal soğutmasında ribler tercih edilmektedir. Akış türbülâtörden geçtikten hemen sonra yüzeyden ayrılıp akabinde tekrar yüzeye yapışmaktadır. Rib yüksekliği, ribler arasındaki mesafe ve ribin akışa göre konumu ısı transferi katsayısını etkileyen parametrelerdir. Ribler ısı transferine olumlu yönde etki ederlerken kanal içindeki akışın basıncına olumsuz etki etmektedir. Kanal boyunca akışın basıncı riblerle etkileşimi sebebiyle düşmektedir. Ayrıca pinlerin geometrisindeki değişim de ısı transferini değiştirdiğinden soğutma davranışı etkilemektedir (Han ve ark., 1991; Kaewchoothong ve ark., 2017; Lau ve ark., 1991; Tanda ve Satta, 2021; Yalçinkaya ve ark., 2024).



Şekil 3.22. Farklı Rib Şekilleri.

3.4. Gaz Türbinli Motorlarda Kaplama Ömrü Belirleme

Gaz türbinli motorların çalışma şartlarındaki ömürlerini ve bakım aralıklarını belirlemek için kullanılan ekipmanlara ve sistemlere ömür testi yapılmaktadır. Bu ömür testleri ekipmanların çalışma şartlarına karşı yorulma davranışı olarak adlandırılır. Genel olarak ömür testleri üç başlık altında incelenmektedir:

1. Fiziksel Yorulma
2. Kimyasal korozyona karşı yorulma
3. Sıcaklık farklarına karşı yorulma

3.4.1. Fiziksel yorulma

Gaz türbin motorlarında kullanılan TBK için hasar mekanizmalarından fiziksel yorulma; sürünme, aşınma, darbe gibi fiziksel bir etkiye maruz kalarak malzemenin ilk günkü bütünlüğünü ve özelliklerini kaybetmesidir.

Gaz türbin bileşenlerinin düşük çevrim yorulması (LCF) ve yüksek çevrim yorulması (HCF) altında yorulma ömrü önemli bir faktördür. LCF, yüksek sıcaklık ve döngüsel yükleme altında bileşenlerin ömrünü kısaltırken, HCF genellikle dönen bileşenlerde görülür ve malzeme veya üretim hataları ile birleştiğinde ciddi hasarlara yol açar (Cowles, 1996; Nicholas, 1999; Shanmugam ve Prakash, 2019).

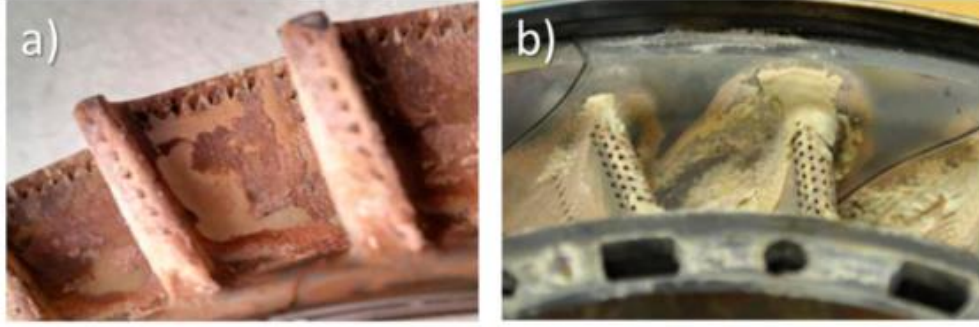


Şekil 3.23. Türbin Kanatlarında Fiziksel Yorulma Sonucu Oluşan Hasar.

Gaz türbin kanatlarında değişken yükleme nedeniyle yorulma çatlaklarının oluşumu ve büyümesi yaygındır. Bu çatlaklar, yüksek santrifüj kuvvetler ve termal yükler nedeniyle oluşur(Hou ve ark., 2002; Salehnasab ve Poursaeidi, 2020).

3.4.2. Kimyasal korozyon yorulması

Gaz türbinli motorlarda kimyasal korozyon, yorulma ömrünü önemli ölçüde azaltan kritik bir faktördür. Korozyon çukurları, yorulma çatlaklarının başlatılmasına ve yayılmasına neden olurken, yüksek sıcaklık ve tuzlu ortamlar bu süreci hızlandırır. Yüzey işlemleri ve koruyucu kaplamalar gibi önlemler, korozyon yorulma hasarını azaltmada etkili olabilir. Bu nedenle, gaz türbinli motorların tasarımında ve bakımında korozyon ve yorulma etkileşiminin dikkate alınması büyük önem taşır (Nieto ve ark., 2021).



Şekil 3.24. Kimyasal Korozyon Sonrası Kanatçık (a) ve Yönlendirici (b).

Gaz türbinlerinde korozyon yorulması, döngüsel yükler ve korozyif ortamların birleşimi sonucu oluşur. Bu tür hasarlar, özellikle sıcak korozyon ve oksidasyon gibi mekanizmalarla ilişkilidir. Yüzeysel işlemleri ve katodik koruma gibi yöntemler, korozyon yorulması hasarını azaltmada etkilidir (Fathyunes ve Mohtadi-Bonab, 2023).

Yüksek sıcaklıklarda ve tuzlu ortamlarda yapılan testler, tuz yüklemesinin ve sülfür bileşiklerinin korozyon çukuru büyümesini hızlandırdığını ve daha düşük yorulma ömrüne yol açtığını göstermiştir (Chan ve ark., 2014; Child ve ark., 2017; Mannava ve ark., 2016).

3.4.3. Sıcaklık farkı yorulması

Bilindiği üzere gaz türbinli motorlar yüksek sıcaklık şartlarında çalışmaktadır. Bununla birlikte yüksek irtifalarda çalıştıklarında oldukça düşük sıcaklık ortamında çalışmaktadır. Motor sistemi çalışmadığı bekleme zamanlarında oda sıcaklığı ortamında muhafaza edilmektedir. Tüm bu yüksek sıcaklık ve düşük sıcaklık değişimleri motor içerisinde kullanılan malzemelerde sıcaklık farkına bağlı yorulmalara ve akabinde hasarlara yol açmaktadır. Bu durum literatürde “Termal Şok” olarak adlandırılır. Bir malzemenin termal şok direncinde malzemenin ısı iletim katsayısı, varsa iç çatlaklar, porozite ve termal gerilmelerin oranı önemli rol oynamaktadır. Malzemeler içerisinde en kırılgan malzemelerden biri olarak görülebilecek seramiklerin ısı iletim katsayılarının oldukça düşük olması, termal şok dirençlerinin oldukça düşük olmasına sebep olan bir faktördür.

Kaplamanın türüne göre, içerisinde bulundurduğu gözenekler ve oksidasyon oranı da termal şok davranışı için oldukça önemlidir. Yüksek sıcaklıklara maruz kaldığı sırada oluşan ısıl gerilmelerin varlığı bu gözenekler sayesinde ortadan kalkmaktadır. Tekrar soğuma sırasında giderilen çekme gerilmelerinin yerini basma gerilmeleri

almakta ve bu da parçada zaman içerisinde hasara sebebiyet vermektedir. Bu sebeple iki kaplama arasındaki termal genleşme uyumsuzluğunun giderilmesi oldukça önemlidir. Bu uyumsuzluğu en aza indirmek adına seramik asıl tabaka ile altlık metal arasına bağ tabaka kaplaması yapılmaktadır.

Termal bariyer kaplamalarında sıcaklık yorulması, kaplamanın mikro yapısı, porozite seviyesi, kaplama türü ve uygulanan yüzey işlemleri gibi birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlerin her biri, kaplamanın termal yorulma direncini ve hasar mekanizmalarını önemli ölçüde etkiler.

Gaz türbin bileşenleri, yüksek sıcaklık farkları ve döngüsel yükler altında termomekanik yorulmaya maruz kalır. Bu tür yorulma, özellikle kaplama sistemlerinde önemli bir rol oynar ve kaplama ile bağlayıcı kaplama arasındaki pürüzlülüğün evrimi ile ilişkilidir (Chang ve Oh, 2019; Shanmugam ve Prakash, 2019).

Gaz türbinlerinin sıcak bileşenleri, çalışma sırasında karmaşık döngüsel yükler ve sıcaklık dalgalanmalarına maruz kalır. Bu durum, bileşenlerin yorulma hasarını gerçek zamanlı olarak değerlendirmek ve öngörücü bakım sağlamak için çevrimiçi hasar değerlendirme yöntemlerinin kullanılmasını gerektirir (H. Zhu ve ark., 2023).

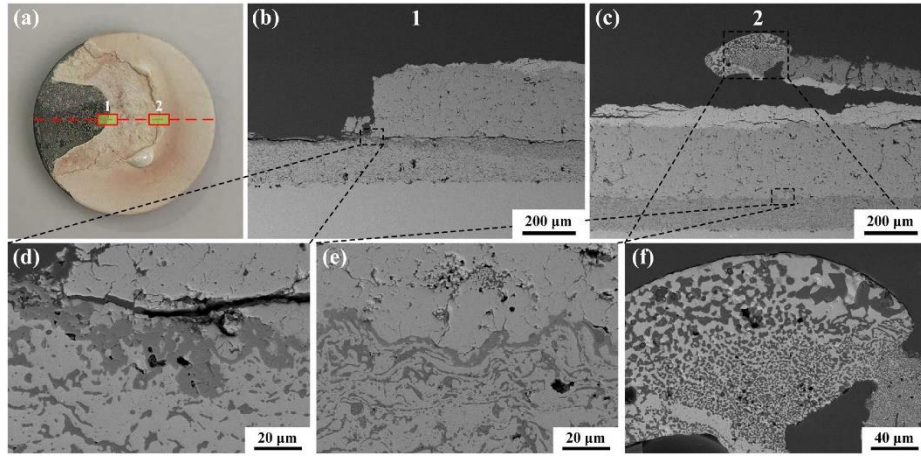
TBK'ların termal yorulma direnci, üst katmanın porozite miktarına bağlı olarak artar. Daha yüksek porozite, termal yorulma direncini artırır fakat, termal döngüleme sonrası kaplama sistemlerinde basınçlı düzlem içi gerilmeler artar ve bu artış, üst katmanın yani seramik kaplama tabakasının porozite seviyesiyle ters orantılıdır (Giolli ve ark., 2008; Scrivani ve ark., 2007).

Kalın TBK'lar, ince TBK'lara benzer şekilde yorulma mekanizmalarına sahiptir. Kalın TBK'lerde, termal yorulma direnci, üst katmanın porozite miktarına bağlı olarak artar. 800 °C'de yapılan testlerde, kaplamaların düşük sıcaklıkta basınçla indüklenen sinterleme belirtileri gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu sinterleme, kaplamaların elastik modülünde değişikliklere yol açar (Wesling ve ark., 1994).

Termal yorulma sırasında, TBK sistemlerinde yüzey çatlakları ve ara yüzey delaminasyonları oluşur. Bu delaminasyonlar, soğuma veya ısınma dönemlerinde meydana gelir ve sıcaklık gradyanı ile ısınma/soğuma hızı, delaminasyon çatlaklarının yayılmasında önemli bir rol oynar (Zhou ve Hashida, 2002b, 2002a).

TBK sistemlerinde, termal gerilmeler ve oksidasyon, kaplama ile bağ katmanı arasındaki ara yüzeyde alumina oluşumuna yol açar. Bu alumina tabakası, termal yorulma ömrünü azaltır ve kaplamanın bozulmasını hızlandırır (Zhou ve Hashida, 2002b).

2010 yılında yapılmış çalışmada plazma spreyle kaplanmış TBK'ler, alev spreyle kaplanmış olanlara göre daha yüksek termal yorulma direncine sahiptir. Plazma spreyle kaplamalar, özellikle $ZrO_2-8\%Y_2O_3$ içeren kaplamalar, en yüksek termal yorulma direncini göstermiştir (Hejwowski, 2010).



Şekil 3.25. Termal Yorulma Sonucu Hasar Almış Numune ve SEM Resimleri.



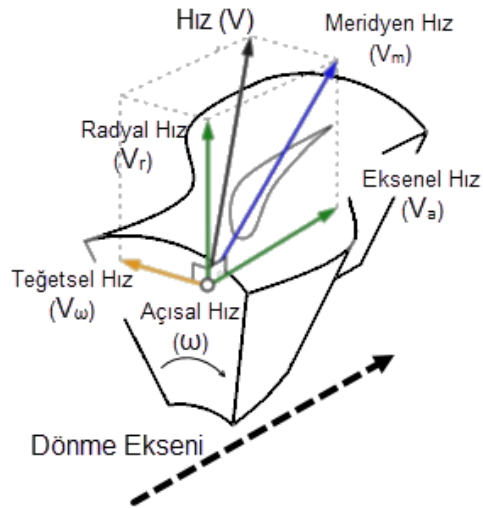
4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Deneysel çalışmalar 3 aşamada ilerlemiştir.

1. Düzeneğin Modellenmesi
2. Düzeneğin İmalatı
 - a. Mekanik İmalat
 - b. Elektronik İmalat
3. Termal Bariyer Kaplama Çalışmaları

4.1. Deneysel Düzeneğin Modellenmesi

Gaz türbin motorlarındaki kanatçıklar üzerindeki akış, Şekil 4.1’de görüldüğü gibi hız vektörlerinden meydana gelmektedir (Ünver, 2010). JETS veya benzeri sabit numune üzerinde test yapan cihazlarda türbin kanadının normal çalışma şartlarına göre sadece aksel hız vektörü doğrultusunda gelen soğutma akışkanının etkisi ölçülmektedir. Oysa gerçek sistemlerde türbin kanadının soğutulmasında diğer hız vektörlerinin de soğutma akışkanı üzerinde etkisi meydana gelmektedir. Bu nedenle yapılan deneyler gerçek sistemlerde meydana gelen soğutma etkisini tam olarak yansıtmamaktadır.



Şekil 4.1. Türbin Kanatçığı Üzerindeki Hız Vektörleri.

Elektronik devre ekipmanları gibi malzemelere yönelik “ASTM 6944-15” isimli Amerikan Test ve Malzeme Topluluğu tarafından numaralandırılan standart bulunmaktadır. Bu standart kullanılarak termal çevrim testi yapılmakta ve ömür belirlemesi yapılmaktadır. Bu standarda göre PCB malzemesi maksimum 50 °C sıcaklığa ısıtılmaktadır. Ancak gaz türbinleri motorları için 1000 °C’nin üzerinde sıcaklıklarda çalışma şartlarına sahiptir. Bu sıcaklıklarda TBK performansının sıcaklığa bağlı değişiminin hangi şartlar altında test edileceği ilgili tanımlanmış ulusal veya uluslararası bir standart bulunmamaktadır.

Testi uygulayıcı kurum ve kuruluşlar kendi ihtiyaçları doğrultusunda, gerekli test düzenekleri oluşturarak mekanik ve termal etkilere bağlı ömür testleri yapmaktadır (Ebrahimi ve Nakhodchi, 2017; Fleck ve ark., 2014; Koolloos ve Houben, 2000).

Literatürdeki deneysel çalışmalarda gaz türbin kanadının statik şekilde modellendiği bilinmektedir. Bu nedenle türbin kanadının soğutulması sırasında meydana gelen radyal yöndeki soğutma bileşeninin etkisi hakkında yeni araştırmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Gaz türbin kanadının hareketli olduğu veya gerçek sistemlere benzer şekilde kanadın döndürüldüğü ve TBK üzerindeki etkisinin nasıl olduğu konusunda deneysel çalışmalara literatürde rastlanmamıştır.

Bu çalışma kapsamında türbin kanadının çalışma şartlarına benzer bir deney düzeneği kurulmuştur. Çalışmada mekanik etkilerden ziyade soğutma akışkanının hem radyal hem de eksenel yönde TBK üzerindeki termal etkileri araştırılmıştır.

Dinamik termal şok testi için, bir dönen disk içerisinde hava geçirme yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem ile dönen disk sayesinde hava akışının oluşturulması sağlandığı gibi disk içerisinde geçirilen hava ile iç soğutma etkisi de gözlenmiştir. Dönen diskin bir yüzeyine termal bariyer kaplaması uygulayarak, yüksek sıcaklıklara maruz kalan metal bileşenlerin üzerinde koruyucu bir tabaka oluşturulmuştur.

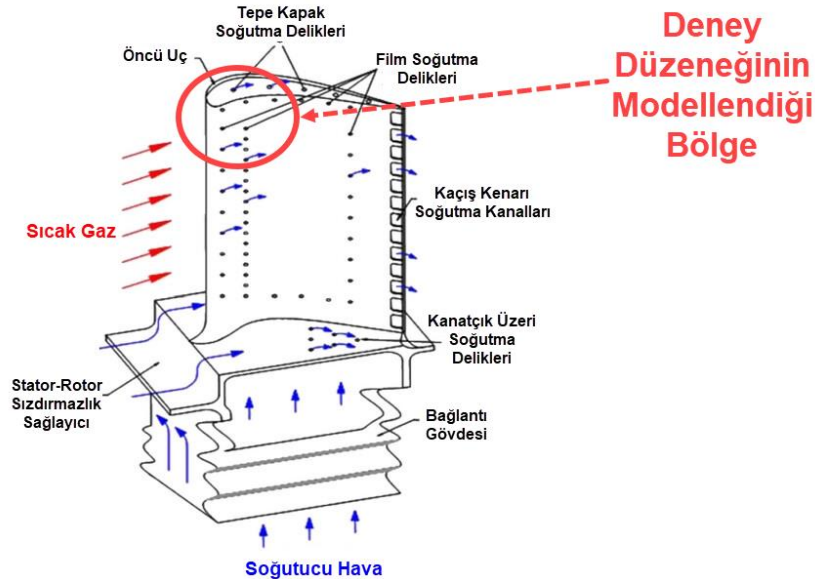
Testin başlangıcında, dönen disk üzerindeki termal bariyer kaplaması sıcaklık artışına tabi tutulmuştur. Aynı anda iç soğutma olarak disk içerisindeki kanallardan geçen hava akışı başlatılmıştır. Bu durum, gerçek kanatçık üzerindeki iç soğutmayı temsil etmektedir. Daha sonra, kaplamalı yüzeyin karşısında duran hava üfleçleri ile hızlı bir soğutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Hava akışı, termal bariyer kaplamasının ani sıcaklık düşüşlerine maruz kalmasını sağlayarak termal şok etkisini yaratır. Bu ısıtma ve soğutma döngüsü defalarca tekrarlanmıştır.

Dönen disk içerisinde geçen hava akışıyla termal bariyer kaplamalı bileşenleri ısıtarak ve ardından hızla soğutarak dinamik termal şok testi gerçekleştirilmiştir. Bu test, termal bariyer kaplamalarının gerçek çalışma koşullarında nasıl davrandığını anlamamıza yardımcı olmuştur. Test sonucunda kaplamanın dayanıklılığı ve performansı hakkında önemli bilgiler edinilmiştir.

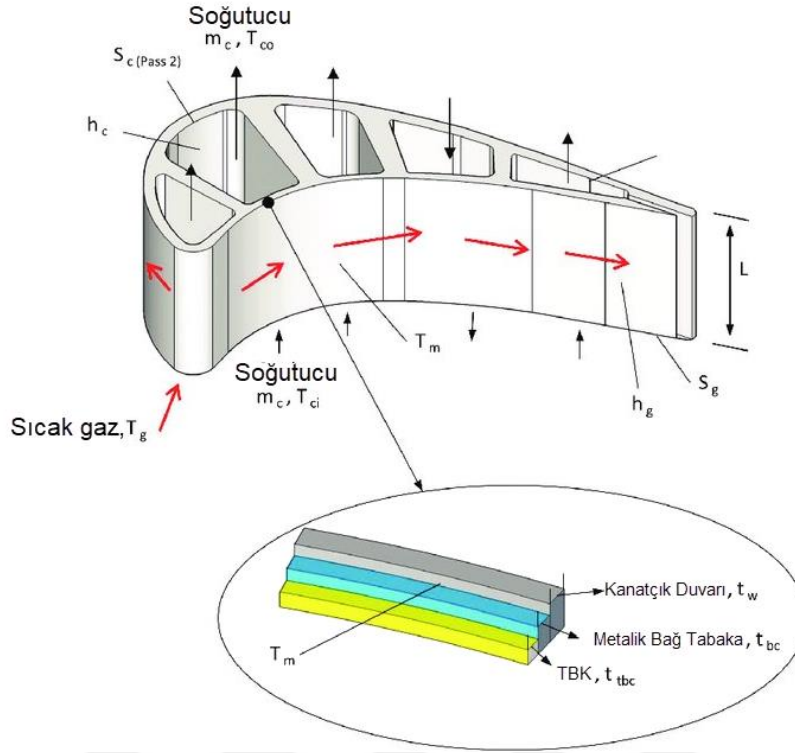
Bu çalışma, Termal Bariyer Kaplama (TBK) yapılmış, kanatçıları modelleyen pullar üzerinde statik olarak yapılmakta olan ömür testlerinin; hava akışını, dolayısıyla soğutma davranışı modelleyecek şekilde kaplanmış numune ve hareketli düzeneğe ile dinamik şartlarda yapılabilmesi amaçlanmıştır. Bu sayede gaz türbin kanatlarındaki TBK performansına radyal ve eksenel yönde soğutma etkisi araştırılmıştır.

Dinamik ortamda yapılan testler ile statik ortamda yapılan testlerin birbiri ile kıyaslanması bir diğer hedefdir. Bu kıyaslama ile daha etkin bir ömür testinin dinamik testle yapılacağı bilimsel olarak göz önüne serilmiştir.

Dinamik şartlarda çalışacak termal şok test düzeneği için detaylı tasarım yapılmış, sonrasında üretime geçilmiştir. Üretim sürecinde test düzeneğinde yer alan plaka, hava ve alev üfleçleri temin edilmiş ve montajları yapılmıştır. Plaka üretiminde, gerçek bir kanatçık üzerinde alev ile ilk karşılaşan hücum kenarı (leading edge) olarak adlandırılan bölgeye benzer bir deney modeli dikkate alınmıştır.



Şekil 4.2. Deney Düzeneği Tasarımında Türbin Kanadındaki Temsil Edilen Bölge.

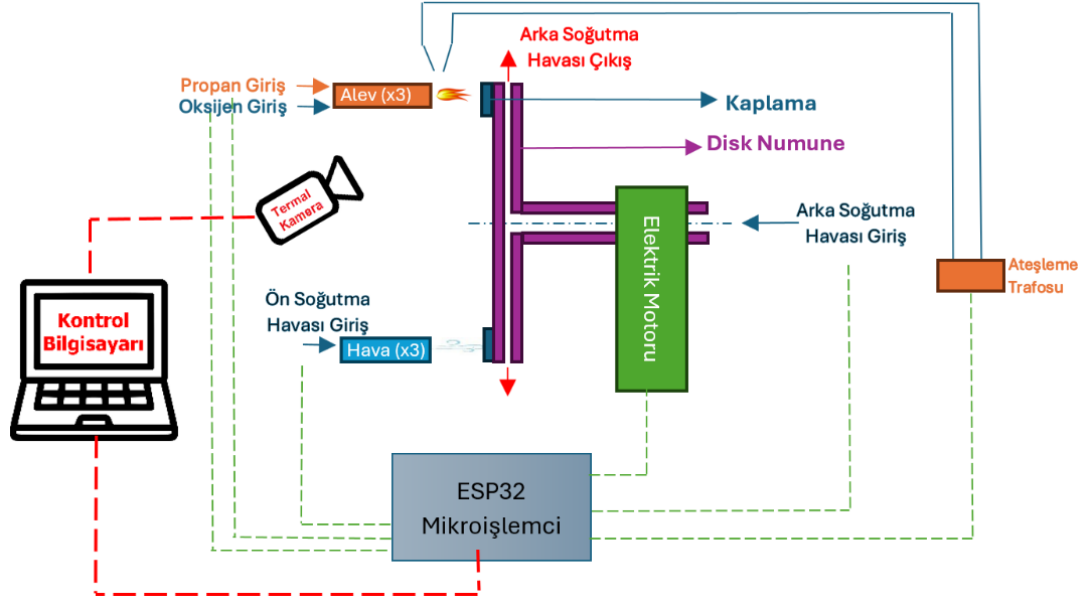


Şekil 4.3. Hücüm Kenarındaki Hava Akışı.

Türbin kanatları üzerinde yer alan hücum kenarı olarak adlandırılan bölge, sıcak hava akışı ile ilk karşılaşılan bölgedir. Kanatçıklar, tasarımından dolayı karşılaştığı sıcak havayı kanadın basınç bölgesine yönlendirerek türbini dönüş yapmaya zorlar. Bu sırada malzeme en yüksek sıcaklıktaki hava akışı ile karşılaşmaktadır. Metalik yüzey üzerine bağ tabaka ve ardından TBK ile bu sıcak havaya karşı dayanım artırılmaktadır. Bununla birlikte iç soğutma kanallarından geçirilen hava yardımıyla numunenin sıcaklığının artma hızı azaltılmaktadır (Naik, 2017).

Türbin kanadının hücum kenarını temsil eden disk şeklindeki plaka hazırlanmış ve bu plaka bir şaft üzerine monte edilmiştir. Şaft bir motor yardımıyla döndürülmüştür. Şaftın bir ucu motorun arka tarafına uzatılmıştır ve buradan iç soğutma havası yönlendirilmiştir. Plakanın diğer yüzeyine TBK uygulanmış ve döndürülerek termal çevrime girmesini mümkün kılan tasarım yapılmıştır.

Şekil 4.4'te gösterilen şematik model görünümü resmetmektedir. JETS adıyla anılan düzeneğe benzer şekilde çalışması tasarlanan sistem, pul şeklinde numune yerine disk yüzeyinin tamamını kullanmaktadır.

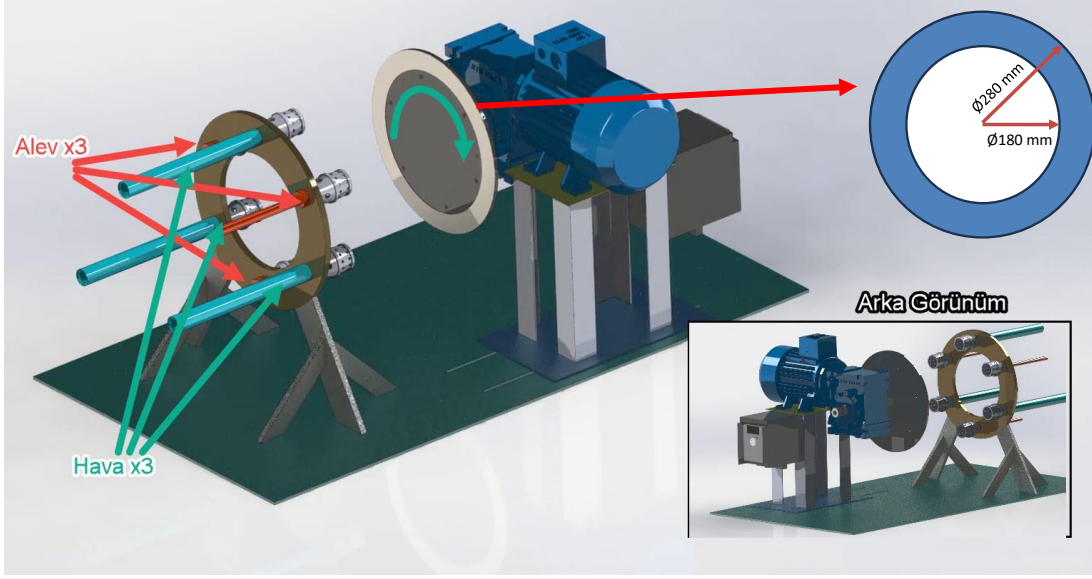


Şekil 4.4. Deney Düzenegi Şematik Modeli.

JETS düzeneğinde numuneler sabit haldeyken alev ve hava üflenir. Ancak tasarladığım düzenekte disk şeklindeki numune sürekli hareket etmektedir. Bununla birlikte diskin arkasından, plakaların arasındaki kanallara giren ve diskin yan bölgelerinden tahliye edilen hava sayesinde iç soğutma modellenmektedir. Tüm bu modellemeler türbin kanatları üzerindeki hava akışını gerçeğe yakın temsil edilmesini sağlamaktadır ve hücum kenarındaki akışı modellemektedir. Şekil 4.4'te mor renkli olan yüzeyler disk şeklindeki plakayı, koyu mavi alanlar ise TBK yüzeyleri temsil etmektedir.

Plakanın 280 mm çapında olması ve dakikada yaklaşık 500 devir ile dönmesi düşünülmüştür. Dönel mekanizmanın arkasından verilecek soğutma havası için rulmanlı rekor kullanmak gerekmektedir. 1/2" çapında dişli bağlantıya sahip rulmanlı rekorun azami 500 d/dk olarak döndürülmesi gerektiği bildirilmiştir.

Bu durum test düzeneği için azami dönme hızını belirlemiştir. Bu döndürme hızı ile birlikte yaklaşık 10.000 d/dk hız ile dönen gerçek gaz türbinli motorları ile 1/20 oranında benzeşim göstererek modellenmiştir.



Şekil 4.5. Tasarlanan Test Düzeninin 3 Boyutlu Görünümü.

Disk üzerinde alev maruz kalan bölgenin dış çaptan itibaren 50 mm genişliğe sahip olması planlanmıştır. Bu planlama, kullanılan alev ve hava üfleçlerinin uygulama çapları baz alınarak yapılmıştır.

4.2. Deney Düzenine İmalatı

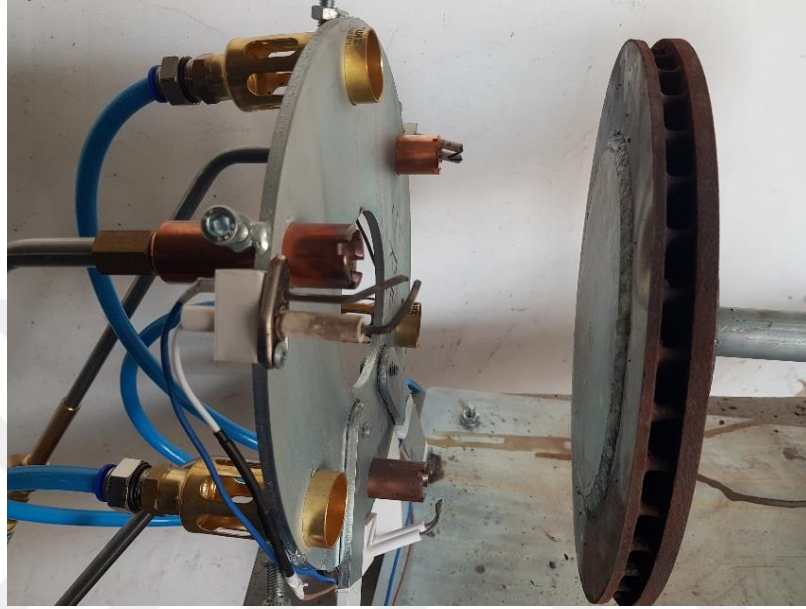
4.2.1. Mekanik İmalat

İmalata çelik levhalardan gövde oluşturularak başlanmıştır. Ardından alev üfleci, hava üfleci, elektronik kontrol için mikroişlemci, disk numunenin dönmesini sağlayan elektrik motoru, ateşleme trafosu, gaz ve hava akışlarının kontrolü için selenoid vanalar ve diğer ekipmanların tedariği sağlanmıştır. Tüm malzemelerin tedariği bittikten sonra montaj aşamasına geçilmiştir.



Şekil 4.6. Kullanılan Alev Üfleci ve Hava Üfleci.

Alev ve hava üfleçleri Yıldız Gaz armatürleri tarafından imal edilen ürünlerden propan kullanımını için uygun olan ürünler tercih edilmiştir. Alev üfleçlerinin hortum bağlantı noktalarına alev geri tepme adı ile satılan, yine aynı firmanın ürettiği çekvalf ürünlerinden monte edilmiştir. Bu ürünler gazın tek yönlü geçişine izin vererek sistemin güvenliğini sağlamaktadır.



Şekil 4.7. Gaz ve Hava Üfleçleri Montajı Sonrası Düzenek Görünümü.

3 adet alev üfleci ve 3 adet hava üfleci aralarında 60° açı olacak şekilde dairesel olarak konumlandırılmıştır. Her 2 alev üflecinin ortasına hava üfleci gelecek şekilde monte edilmiştir. Alev üfleçlerine propan ve oksijen gazı hortumları bağlanmıştır.



Şekil 4.8. Selenoid Vana.

Hava ve gaz hortumları ilgili üfleçlere selenoid vana üzerinden geçtikten sonra gitmektedir. Selenoid vana, üzerine gelen elektronik sinyal ile açılıp kapanarak içinden geçen akışkanın hareketini kontrol eden elektromekanik bir ekipmandır.

Sistemin kontrolü ve elektronik sinyaller ESP WROOM 32 isimli mikro işlemci ile gerçekleştirilmiştir. ESP32 sistemi Bluetooth ve WI-FI özelliği olan düşük güç sinyalleri ile çeşitli fonksiyonel görevler icra edebilen mikrodenetleyici sistemdir.



Şekil 4.9. ESP32 Mikro İşlemci.

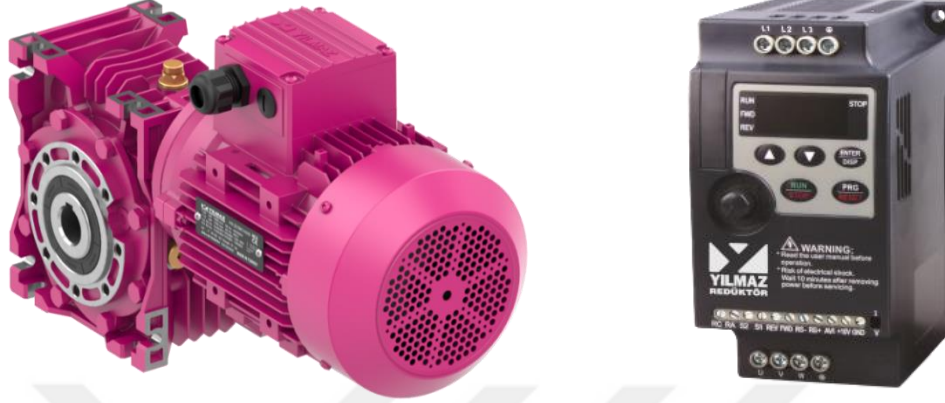
ESP32 çalışmak için 5V gerilim değerine ihtiyaç duymaktadır. Selenoid vanalar da 24V gerilim ile çalışmaktadır. Her iki bileşen de doğru akım ile çalışmaktadır. Sistemin panosuna 220V enerji giriş olmaktadır. 5V ile 24V olmak üzere 2 adet güç kaynağı ile düşürülen gerilim ilgili bileşenlere kablolar ile ulaştırılmıştır.

ESP32’de yazılan kodlar 8 kanallı röle kartına komut vermektedir. Röle kartındaki rölelerden 6 adet röle sistemde kullanılmaktadır. Bu röleler sırayla; oksijen kontrol, propan kontrol, ön hava kontrol, arka hava kontrol, ateşleme kontrol ve motor kontroldür.



Şekil 4.10. Röle Kartı (8 Kanallı).

Röle, gelen sinyal doğrultusunda üzerindeki anahtarı aç/kapa yapan elektronik bileşendir. Bu röleler ESP32'den gelen sinyal ile selenoid vana, ateşleme trafosu ve elektrik motoruna enerji akışını kontrol etmektedir.



Şekil 4.11. Asenkron Elektrik Motoru ve Sürücüsü.

Numuneler bir şaft ile elektrik motoruna monte edilmiş redüktörün içerisinden geçmektedir. Redüktörden tahrik almaktadır. Arka kısmından ise dönel rekor yardımıyla disk içerisindeki kanallardan geçmek üzere hava gönderilmektedir.

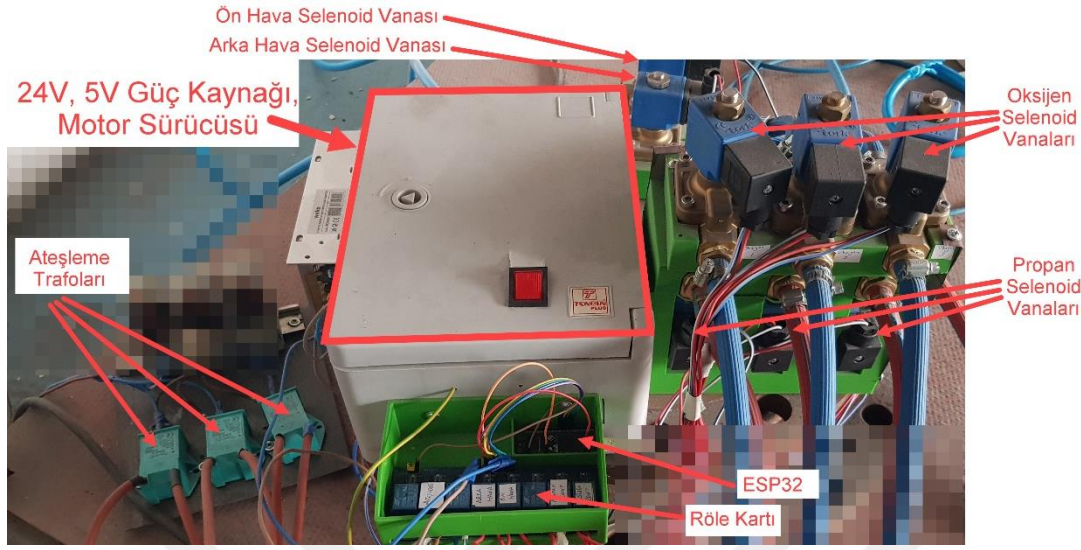
1 KW güce sahip asenkron elektrik motoruna sonsuz dişliye ve 1/5 düşürme oranına sahip redüktör bağlanmıştır. Bu motor, YB1000 serisi bir sürücü ile kontrol edilmektedir.

Ateşleme işlemi ZAG2 ateşleme trafosu kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Genelde kombi gibi ekipmanlarda kullanılan ateşleme trafosu, 220V gerilimi yaklaşık 5000V gibi yüksek gerilimlere çıkararak trafonun iki çıkışı arasında ark sıçraması oluşmasını sağlamaktadır. Bu ark kıvılcımı sayesinde propan gazı yanmaya başlamaktadır. Bu sayede alevler oluşmaktadır.



Şekil 4.12. Ateşleme Trafosu

Tüm sistem bileşenleri bir pano içerisine ve etrafına dikkatlice bağlanmış ve kontroller yapıldıktan sonra sistem çalışır hale getirilmiştir.



Şekil 4.13. Sistem Bileşenleri ve Bağlantıları

Şekil 4.13'te görülen pano kutusunun içerisinde diskin dönmesini kontrol eden motor sürücüsü, 24V güç kaynağı, 5V güç kaynağı ve çoklu kablo klemensi yer almaktadır. Kablo klemensi 24V gerilim kullanan bileşenler için kullanılmıştır. Klemensin bir girişine 24V güç kaynağından pozitif (+) ve negatif (-) girişler yapılmıştır. Klemensin diğer uçlarından ise selenoid vanalara iletilmek üzere çıkışlar alınmıştır.

Röle kartı ve ESP32 birbirine yakın olacak şekilde konumlandırılmıştır. Her iki bileşene de 5V güç girişi yapılmıştır. ESP32 ile röle kartının haberleşmesini sağlayan kablolar bağlanmış ve yazılım ile kontrol edilebilir hale gelmiştir.

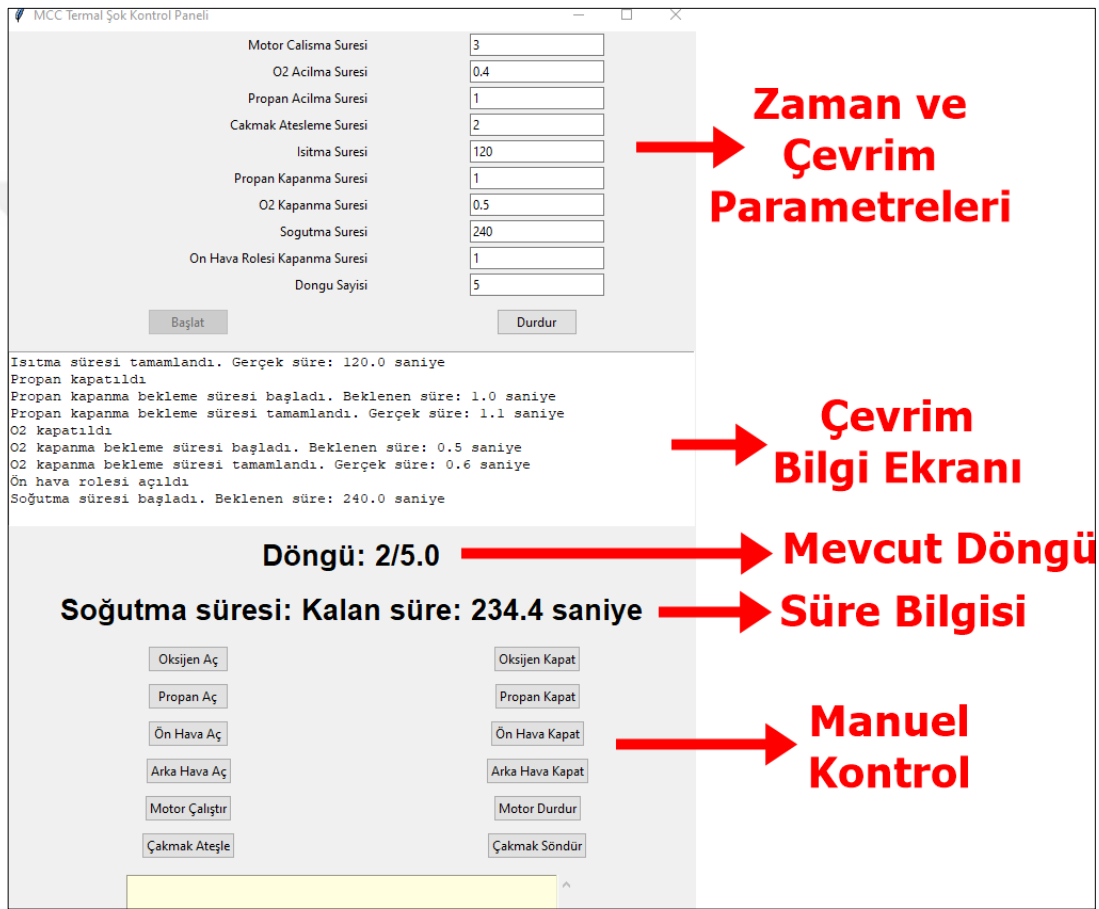
Ateşleme trafolarından bujilere enerjiyi ulaştırmak üzere buji kablosu kullanılmıştır. Bu kablolar bakır iletkenin etrafında kalın ve ısıya dayanıklı bir yalıtkan tabaka ile kaplı şekilde kullanılır. Bu kaplama sayesinde kablo içerisinden geçen yüksek gerilimin, kablonun geçtiği yerlerde elektriksel gürültü yapması önlenmiş olur.

4.2.2. Elektronik kontrol sistemi

ESP32 mikro işlemci üzerine sistemdeki bileşenleri kontrol etmek için yazılım yüklenmiştir. Bu yazılımda röle kartındaki röleleri kontrol edici pinler tanımlanmıştır. Sonrasında bu röleleri aç-kapa yapması için gerekli komutların bilgisayar vasıtasıyla verilmesini sağlayıcı bileşenler yüklenmiştir. ESP32 üzerine yazılan kodun tamamı EK-A'da paylaşılmıştır.

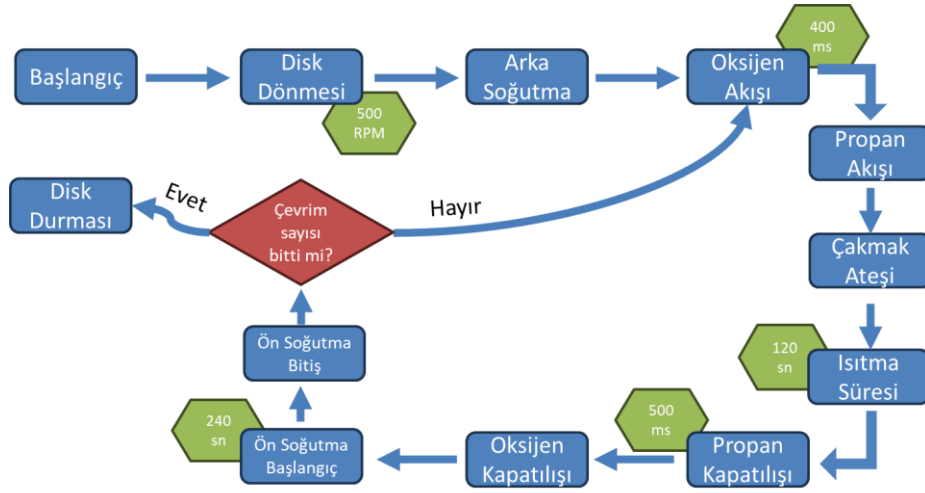
ESP32 üzerine yazılan kod için Python dili yardımıyla basit bir arayüz tasarlanmıştır. Tasarlanan arayüz sayesinde sistem bileşenleri kontrol edilmekte ve döngü sırasındaki bilgilere ulaşılabilmektedir.

Python ile oluşturulan arayüz tasarımı Şekil 4.14'te görülmektedir. Çevrim ile ilgili gerekli parametrelerin girişinin yapılabildiği ve mevcut işlem ile ilgili bilgilerin olduğu ekrana sahip olan arayüzde röleleri manuel olarak kontrol etmeye olanak sağlayan düğmeler de yer almaktadır.



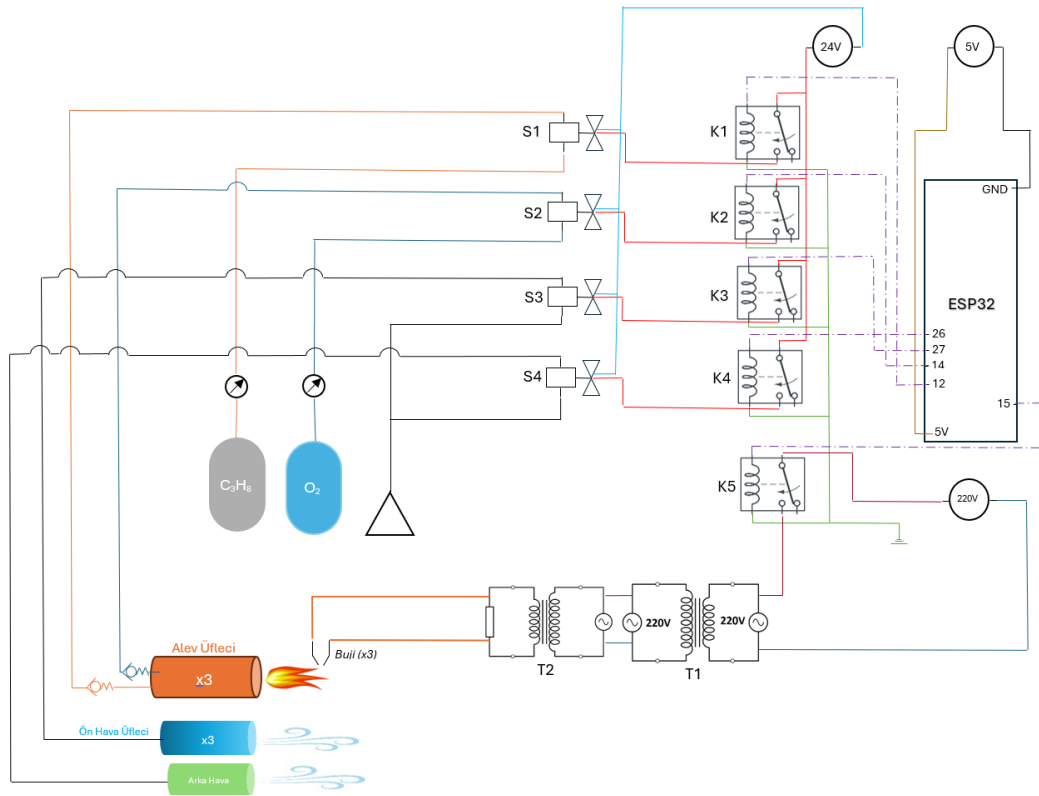
Şekil 4.14. Python İle Tasarlanan Arayüz.

Çevrim, diskin bağlı olduğu motorun dönmesiyle başlamaktadır. Ardından propan ve oksijen gazları yardımıyla oluşan alevle birlikte 120 saniye olarak belirlenen ısıtma süresi başlamaktadır. Isıtma süresinin sonunda 240 saniyelik soğutma süresi başlamaktadır. Soğutma süresi tamamlandığında çevrim tamamlanmış olmaktadır. Çevrim sayısına göre bu işlem tekrarlanmaktadır.



Şekil 4.15. Sistemin Çevrim Olarak Çalışmasının Algoritması.

Şekil 4.15'te çevrimin çalışma algoritması görülmektedir. Şekilden de görüleceği üzere çevrim sayısı tamamlanana kadar sistem üzerinde arka soğutma havası açık konumdadır. Bu sayede ısıtma süresi boyunca iç soğutma etkisi de test edilmiştir. Belirtilen çevrim sayısı tamamlandığında arka soğutma havası kapatılmış ve disk durdurulmuştur. Ardından hasar tespiti yapmak için gözle kontrol ve fotoğraf çekimi yapılmıştır.



Şekil 4.16. Test Düzenineğin Elektriksel Şeması.

Şekil 4.16’da test düzeneğinde kullanılan bileşenler ve bağlantıları ile ilgili elektriksel şema yer almaktadır. Tablo 4.1’de ise bu şemada yer alan bileşenlerin açıklamaları görülmektedir.

Tablo 4.1. Elektriksel Şema Bileşenlerinin Açıklamaları.

KOD	ADET	AÇIKLAMA	TÜR
ESP32	1	Mikro İşlemci	ESP32-WROOM-32D
K1	1	Propan Kontrol Rölesi	SRD-05VDC-SL-C
K2	1	Oksijen Kontrol Rölesi	SRD-05VDC-SL-C
K3	1	Ön Hava Kontrol Rölesi	SRD-05VDC-SL-C
K4	1	Arka Hava Kontrol Rölesi	SRD-05VDC-SL-C
K5	1	Ateşleme Kontrol Rölesi	SRD-05VDC-SL-C
S1	3	Propan Akış Kontrol Selenoid Vanası	S101103145N (24V DC)
S2	3	Oksijen Akış Kontrol Selenoid Vanası	S101103145N (24V DC)
S3	1	Ön Hava Akış Kontrol Selenoid Vanası	S101103145N (24V DC)
S4	1	Arka Hava Akış Kontrol Selenoid Vanası	S101103145N (24V DC)
T1	1	İzolasyon Trafosu	220/220 VOLT (10 VA)
T2	3	Ateşleme Trafosu	ZAG 2 (2,5 VA)

İzolasyon trafoları, elektrik devrelerindeki güvenliği sağlamak ve çeşitli amaçlar için kullanılan önemli bir elektrik ekipmanıdır. Bu trafolar, primer ve sekonder sargılar arasında yüksek düzeyde bir elektriksel izolasyon sağlayarak, devrelerin birbirinden tamamen ayrılmasını sağlarlar. Sistemde kullanmamızın amacı, yüksek gerilimin oluşturduğu elektriksel gürültünün, düşük gerilim ile çalışan diğer sistem elemanlarını etkilemesini önlemek içindir.

4.3. Termal Bariyer Kaplama Çalışmaları

Gerekli literatür incelesi yapıldığında TBK konusunda yapılan araştırmalar ışığında; deneyde kullanılan disk numunelerin yüzeyine %8 Y_2O_3 içeren ZrO_2 (YSZ) tozunun kaplaması gerçekleştirilmiştir. 4 adet numune üzerine farklı kalınlıklar olacak şekilde uygulama yapılmıştır. Bunlar; 100 μm , 150 μm , 200 μm ve 300 μm kalınlıklardır. YSZ tozu ile disk (altlık) arasına NiCrAlY alaşımı bağ tabakası olarak 45-75 μm kalınlığında kaplanmıştır (Feng, Dong, Li, ve ark., 2020).

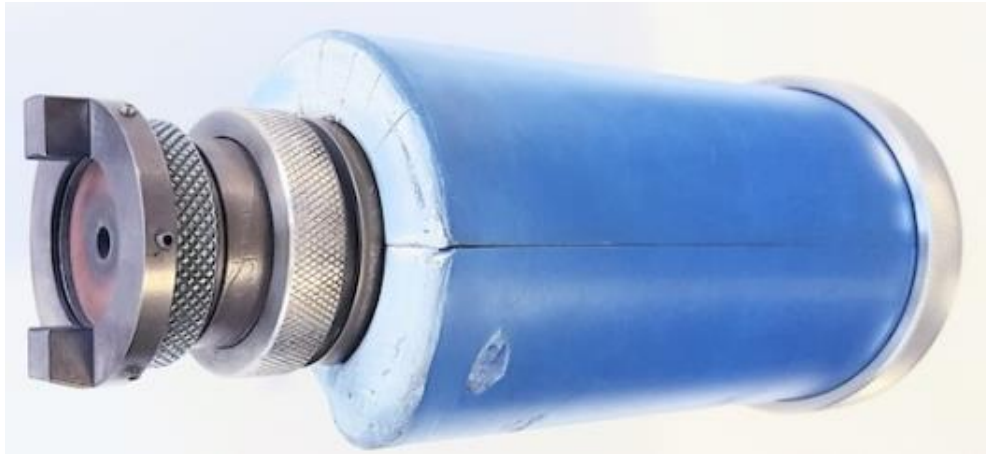
Literatürde yoğun olarak TBK kullanımını 45 ila 75 μm arasında bağ tabaka üzerine ~150 μm seramik tabaka şeklindedir (Fleck ve ark., 2014). Bu durumun uygunluğunu

tespit etmek amacıyla bu kalınlık değeri ile bu değerden daha ince 2, daha kalın 1 kaplama yapılması düşünülmüştür. En ideal kaplama kalınlığı tespiti ve kalınlığa bağlı TBK ömrü değışimi verileri elde edilmiştir.



Şekil 4.17. Kaplamaların Uygulandığı Çoklu Kaplama Kabini.

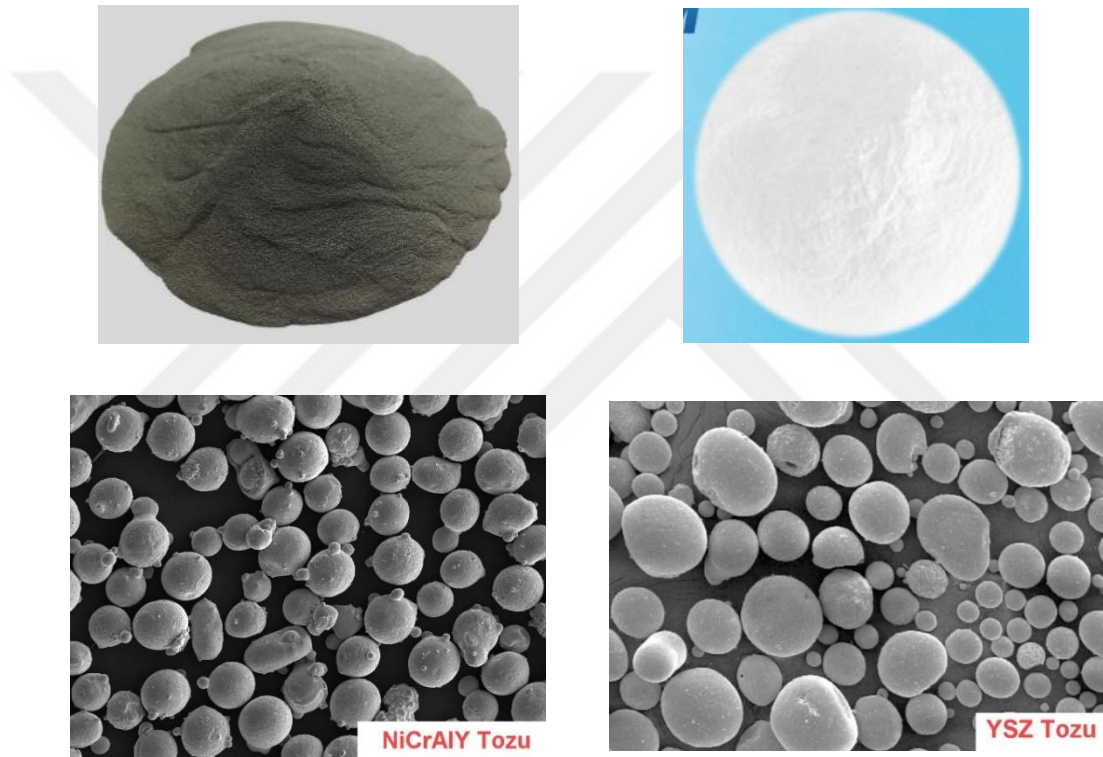
Termal bariyer kaplama işlemleri plazma sprey kaplama tekniğı kullanılarak yapılmıştır. Sakarya Üniversitesi Termal Sprey Araştırma ve Uygulama Laboratuvarı bünyesinde yer alan Sulzer-Metco (Oerlikon Metco) firmasının ürettiğı F4-MB model plazma sprey tabancası, ABB IRB2400 model 6 eksenli robotik kol üzerine bağlanmıştır. 2 eksenli döner tabla üzerine bağlanan numunelere kaplama uygulaması yapılmıştır. Kaplama numunelerinin kenarına, kaplama ile ilgili analizlerin yapılması için çelik plakalar yerleştirilmiştir.



Şekil 4.18. F4-MB Plazma Sprey Tabancası.

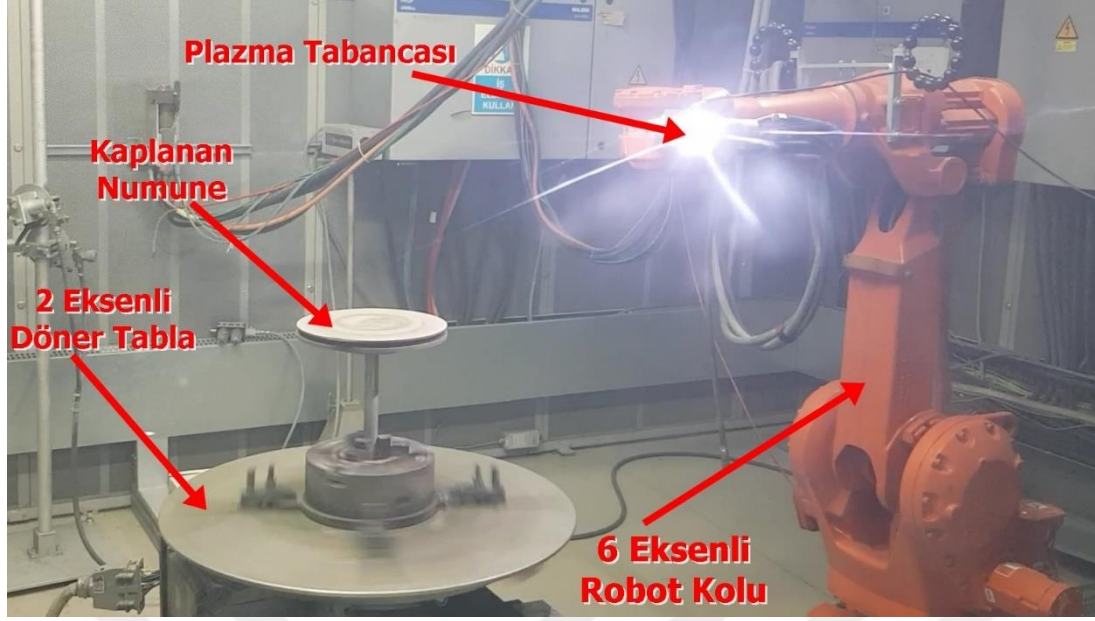
Kaplama, 280 mm çapındaki çelikten imal edilmiş disk yüzeyine halka biçiminde yapılmıştır. Dış çaptan 50 mm uzunlukta merkeze doğru olacak şekilde yapılmış kaplama 4 farklı disk üzerine 4 farklı kalınlıkta uygulanmıştır.

Kaplama tozları tercih edilirken piyasada ticari olarak bulunan ve sektör temsilcileri tarafından tercih edilen tozlar kullanılmıştır. Bu bağlamda Oerlikon Metco firmasının “AMDRY 962” kodu ile ticari olarak üretilip pazarladığı NiCrAlY alaşım tozu bağ tabakası tozu olarak kullanılmıştır. Üzerine Powder Alloy Corporation (PAC) firmasının “2008P” kodu ile piyasada yer alan 8YSZ tozu seramik tabaka olarak kullanılmıştır.



Şekil 4.19. Kullanılan Kaplama Tozlarının Genel ve Mikroskopik Görüntüsü.

Numunelere SAPI marka endüstriyel kumlama cihazı yardımıyla 60 mesh boyutunda alümina kum kullanılarak yüzey pürüzlendirilmesi yapılmıştır. Ardından 2 eksenli döner tabla üzerinde yer alan torna aynasına monte edilmiştir.



Şekil 4.20. Numunelerin Kaplama Anında Görünümü.

Ardından plazma tabancasının bağlı olduğu 6 eksenli robot kolu, numune kaplamasını yapacak şekilde programlanmıştır. Önce bağ tabakası, sonrasında asıl tabaka olacak şekilde kaplamalar gerçekleştirilmiştir.

Tablo 4.2. Kaplama Bilgisi.

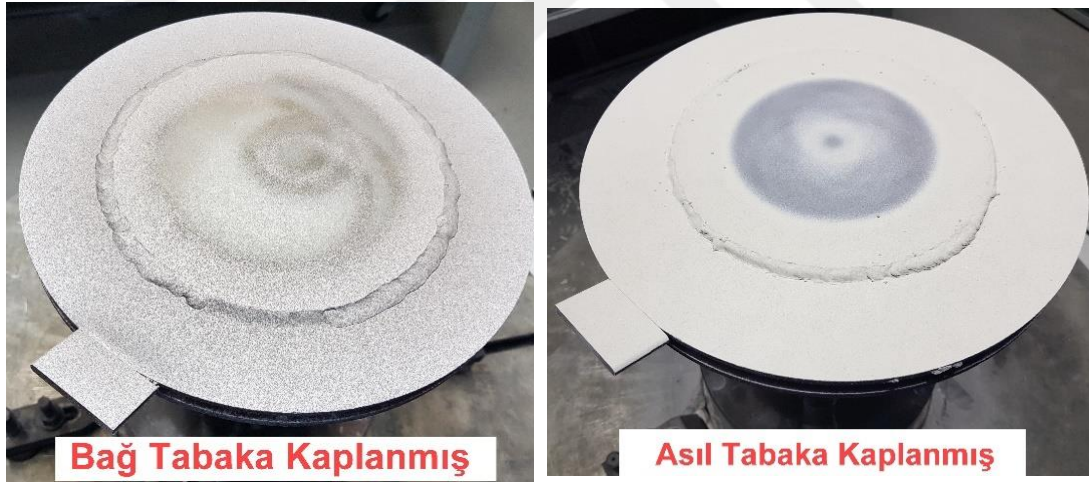
Kaplama Kodu	Bağ Tabaka Kalınlığı	Seramik Tabaka Kalınlığı
MC 01	50 µm	50 µm
MC 02	50 µm	100 µm
MC 03	50 µm	150 µm
MC 04	50 µm	250 µm

Her numuneye yaklaşık 50 µm kalınlığında metalik bağ tabaka kaplaması yapılmıştır. Ardından Tablo 4.2’de görüldüğü üzere farklı seramik tabaka kalınlıkları olacak şekilde 4 adet numunenin kaplaması sırayla tamamlanmıştır.



Şekil 4.21. Kaplama Anından Görseller.

Şekil 4.21’de kaplama anından resimler görülmektedir. Numuneler döner tabla üzerine monte edildikten sonra program ile yere göre yaklaşık 45° açı yapacak şekilde konumlandırılmıştır. Numune üzerine, robot koluna bağlı olan plazma tabancası ile diskin merkez ekseninden geçecek ve bir ucundan diğer ucuna hareket edecek şekilde kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. Tabanca hareketinin, plazmada erimiş toz partiküllerinin numuneye yaklaşık 90° açı yapacak şekilde olmasına dikkat edilmiştir.



Şekil 4.22. Kaplama Sonrası Numunelerin Görünümü.

Plazma sprej yöntemi ile kaplama yapılırken kaplanması istenilen alanın bir miktar dışına çıkılarak kaplama işlemi gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu durum, termal sprej kaplama çalışmalarında rutin olarak uygulanan bir yöntemdir. Aksi halde kaplanması istenen bölge tam anlamıyla kaplanmamış veya tabanca hareketi sebebiyle aşırı kaplama biriken noktalar oluşabilir.

Tablo 4.3. Kaplama Parametreleri.

	Bağ Tabaka	Asıl Tabaka
Argon (l/dk)	45	50
Hidrojen (l/dk)	12	10
Akım (A)	575	625
Toz Besleme (gr/dk)	40	25
Püskürtme Mesafesi (mm)	150	130
Numune Dönme Hızı (RPM)	125	125
Robot Hareket Hızı (mm/sn)	8	4

Tablo 4.3'te kullanılan kaplama parametreleri verilmiştir. Her numune için bağ tabaka kaplamasında aynı parametre kullanılmıştır. Bağ tabakası işlemi için aynı nokta üzerinden 8 kez geçiş yapılmıştır. Bağ tabakası kaplamasından sonra, MC 01 kodlu numune için aynı noktadan 48 kez, MC 02 kodlu numune için 96 kez, MC 03 kodlu numune için 144 kez ve MC 04 kodlu numune için 240 kez geçiş yaparak kaplama işlemleri tamamlanmıştır.



Şekil 4.23. Test İçin Gerekli Kaplama Alanı.

Şekil 4.23'te gösterilen iki çember arasındaki bölge, bu çalışmada test etmek için kullanılan kaplama alanını göstermektedir. İç çemberin merkezine doğru oluşan kaplamalar teste tabi tutulmamıştır. Bununla birlikte merkezi noktalara, kaplama işlemi öncesinde kumlama işlemi de uygulanmamıştır.

Robot hareketi, iç çember hizasını geçtikten sonra merkez bölgesinden hızlı geçecek şekilde programlanmıştır. Buna rağmen merkezi noktalarda kaplama birikmesi oluşmuştur ancak testler sırasında kolayca kaplama ayrılması görülmüştür.





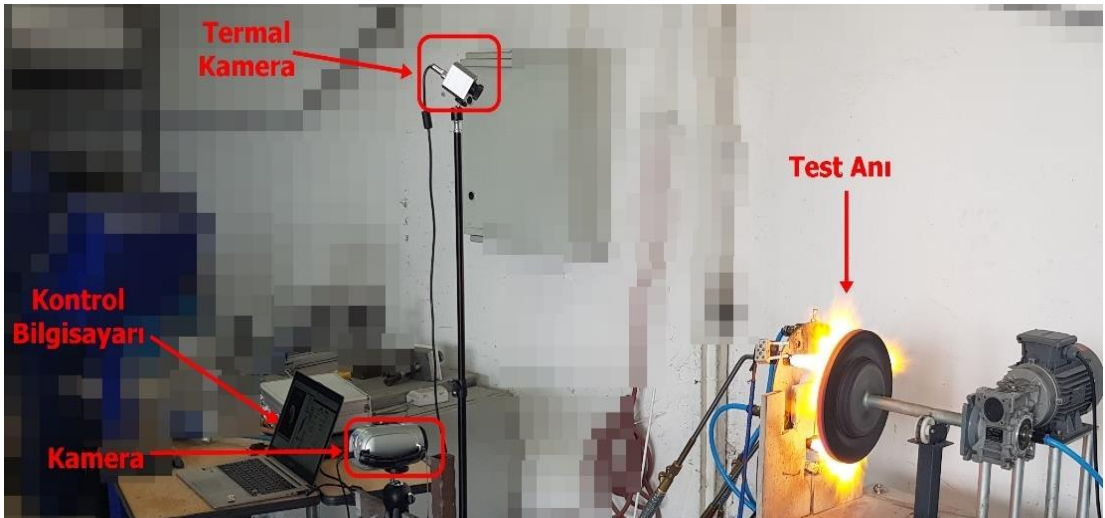
5. DENEYİN YAPILIŞI

5.1. Dinamik Termal Şok Deneyi

Kaplama işlemleri neticesinde üretilmiş numunelere, imalatı tamamlanmış test düzeneği ile ömür testleri yapılmıştır. Düzenek üzerindeki bulunan alev üfleçleri gördüğü yüzey bölgesini 1150 – 1300 °C aralığına çıkarmış, hava üfleçleri ise gördüğü bölgeyi ~250 °C'ye düşürmüştür. Literatürdeki çalışmalar benzer sıcaklıklar arasında gerçekleşmiştir (Liu ve ark., 2022). Her bir numune için bu test tekrarlanmıştır. Hedef çevrim 100 olarak belirlenmiş ama numuneler bu sayıya ulaşamamıştır. Her 10 çevrim sonunda numune üzerinde hasar incelemesi yapılmıştır. Test sonunda kırılma, çatlama, dökülme gibi kusurlar tespit edilmiştir.

Kaplanmış 4 numune, imalatı tamamlanan, elektronik ve mekanik olarak çalışır hale getirilmiş olan test düzeneğine bağlanarak dinamik termal şok testleri sırayla gerçekleştirilmiştir.

Sistemin kontrolü bilgisayar üzerindeki yazılım ile sağlanmaktadır. Aynı zamanda numunelerin yüzeyindeki sıcaklık değişimleri termal kamera yardımıyla kaydedilmektedir. Termal kamera verileri de kontrol bilgisayarı tarafından kaydedilmektedir. Bununla birlikte testler el kamerası ile kayıt altına alınmıştır.



Şekil 5.1. Test Anında Düzenek, Termal Kamera ve Diğer Ekipmanların Yerleşimi.

Termal şok testleri yapılırken aşağıdaki adımlar sırasıyla tekrarlanmıştır:

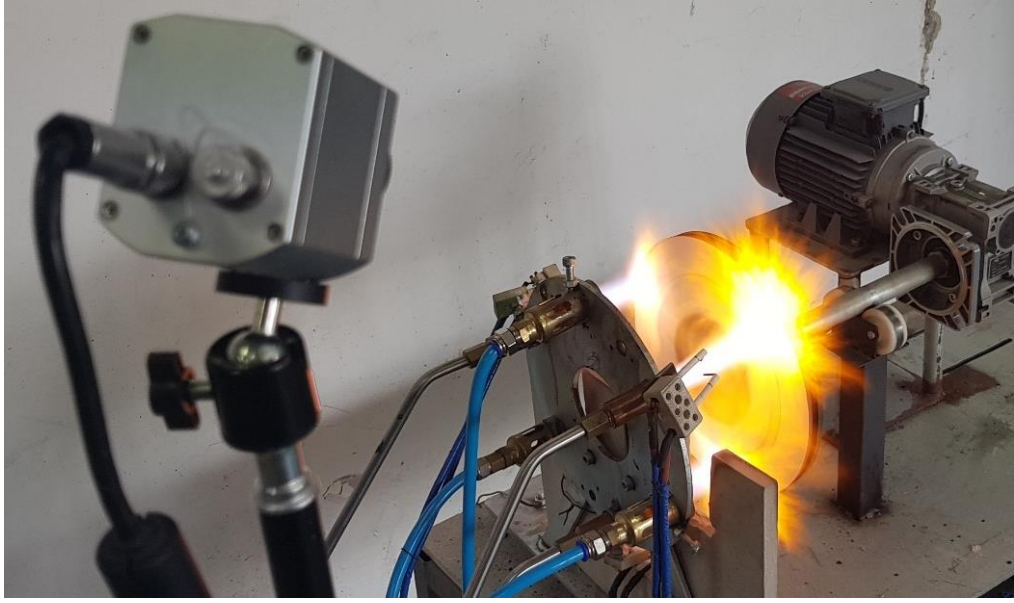
1. İlk numuneyi şaft kısmından elektrik motoruna monte et.
2. Propan gazı, oksijen gazı ve kompresör havasını kontrol et.
3. Kontrol yazılımını çalıştır.
4. 10 çevrim olacak şekilde yazılıma komut ver. (Şekil 4.15'teki sistem algoritmasına göre sistem çalışır)
5. Her 10 çevrim sonunda numuneyi sök, resim çek ve (hasar almadıysa) yeniden monte et.
6. Hasar tespit edilmişse bir sonraki numuneye geçerek listeyi tekrarla.

Numunelerin sıcaklık değişimleri için Optris markasına ait PI400 model termal kamera kullanılmıştır. Bu kamera ile numune üzerinden 3 farklı noktadan sıcaklık değerlerinin test süresince değişimleri kaydedilmiştir.



Şekil 5.2. Termal Kamera ve Deney Esnasında Yazılımdaki Anlık Görüntü.

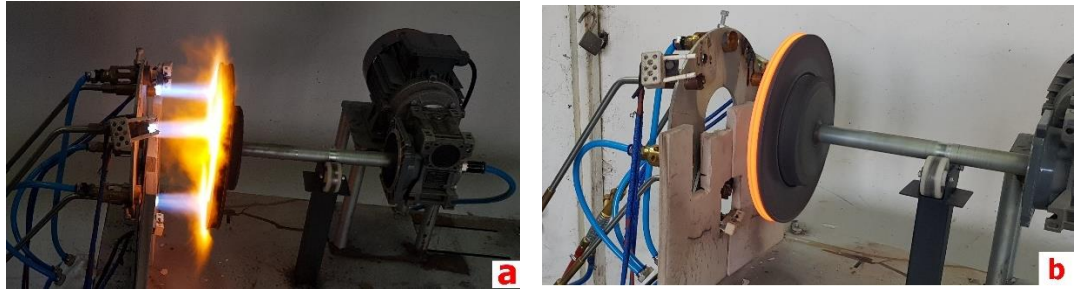
Optris markasının termal kameraları için ürettiği “PIX Connect” isimli yazılım ile termal kameranın gerekli ayarları yapılmaktadır ve elde edilen sıcaklık verileri bilgisayara aktarılmaktadır.



Şekil 5.3. Termal Kameranın Numuneyi Gördüğü Açı.

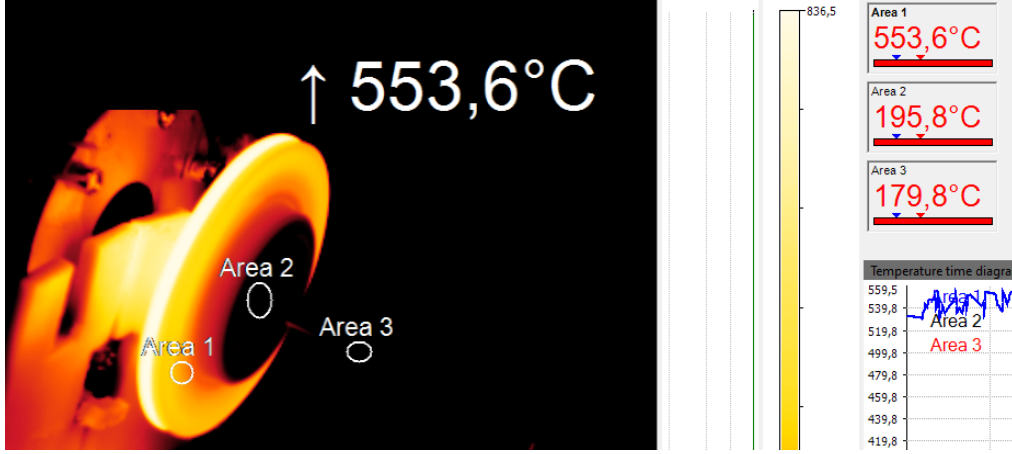
Termal kamera numuneyi görebilecek açıda yükseğe konumlandırılmıştır. Alevlerden etkilenmeyen 3 nokta belirlenmiş ve bu noktalardan elde edilen sıcaklık verileri kaydedilmiştir. Daha sonra bu veriler ile sıcaklık-zaman grafiği çizilmiştir.

Alev ve hava üfleçlerinin sabitlendiği dairesel plaka ve arkasındaki ekipmanlar, test esnasında alevlerin etkisiyle aşırı sıcaklığa maruz kalmaktadır. Bu durumu önlemek adına dairesel plakanın önüne fırınlarda kullanılan termal tuğla monte edilmiştir.



Şekil 5.4. Test Anı (a), Isıtma Çevrimi Sonrası Anlık Görünüm(b).

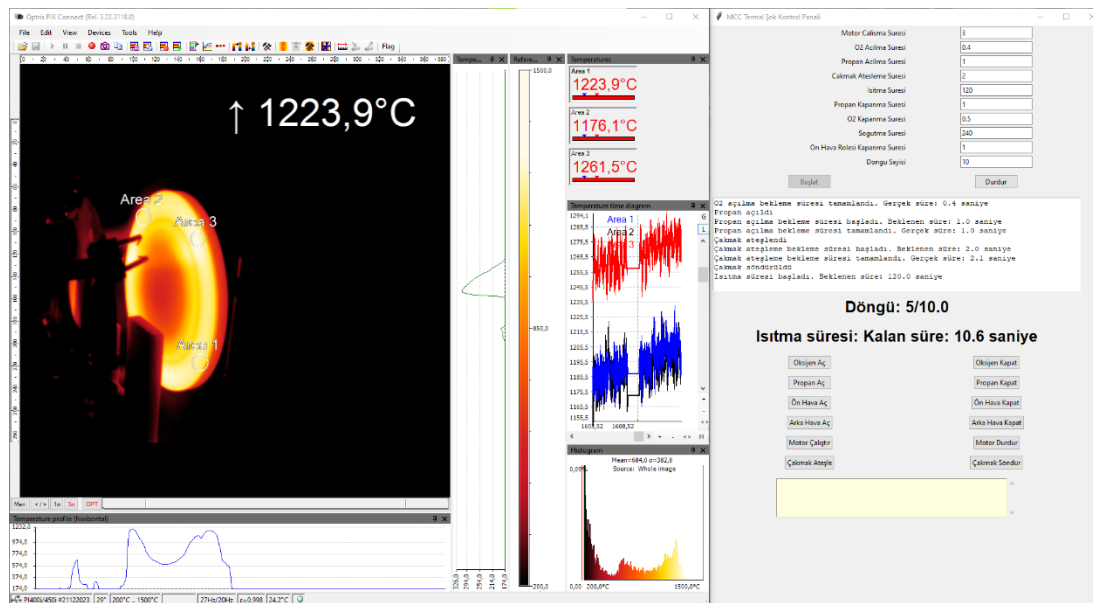
Şekil 5.4b’de termal çevrimde ısıtma süresinin sonlandığı, soğutma süresinin henüz başladığı andaki görüntü yer almaktadır. Aleve maruz kalan yüzeyin sıcak olduğu, iç soğutmanın etkisi ile diskin arka yüzeyinin ise oldukça soğuk olduğu bariz biçimde görülmektedir.



Şekil 5.5. Isıtma Çevrimi Sonunda Numunenin Arkasından Termal Kamera Görünümü

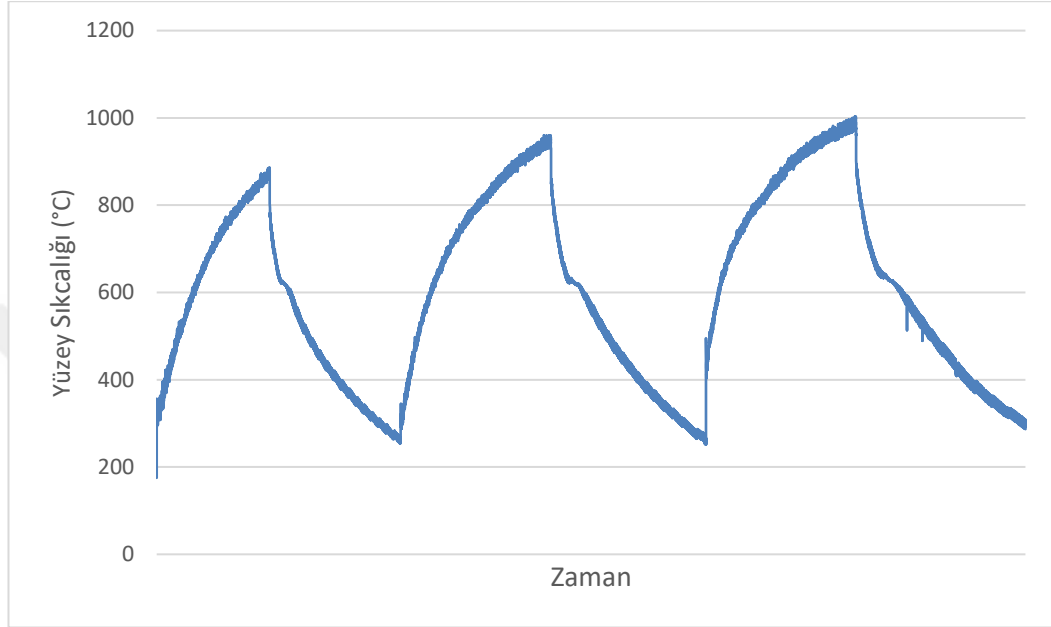
Şekil 5.5'te termal kamera tarafından ısıtma çevriminin sonunda numunenin arkasından elde edilen sıcaklık verileri görülmektedir. Numunenin ön yüzeyi yaklaşık 1250 °C sıcaklıkta iken numunenin arka yüzeyi yaklaşık 550 °C, hava akışının olduğu borular ise azami olarak 200 °C sıcaklığa ulaşmıştır. Bu durum iç soğutmanın numune üzerindeki etkisini açıkça göstermektedir.

Alev üfleçleri için 2 bar basınçta propan gazı, 4 bar basınçta oksijen gazı kullanılmıştır. Soğutma ise kompresör tarafından üretilen 9 bar basınçta sahip kuru hava ile gerçekleştirilmiştir. Isıtma süresi 120 saniye, soğutma süresi 240 saniye olarak belirlenmiştir. Numunenin ön yüzü ısıtma süresi sonunda yaklaşık 1250 °C sıcaklığa ulaşmaktadır. Soğutma süresi sonunda ise yüzey sıcaklığı yaklaşık 250 °C olmaktadır.



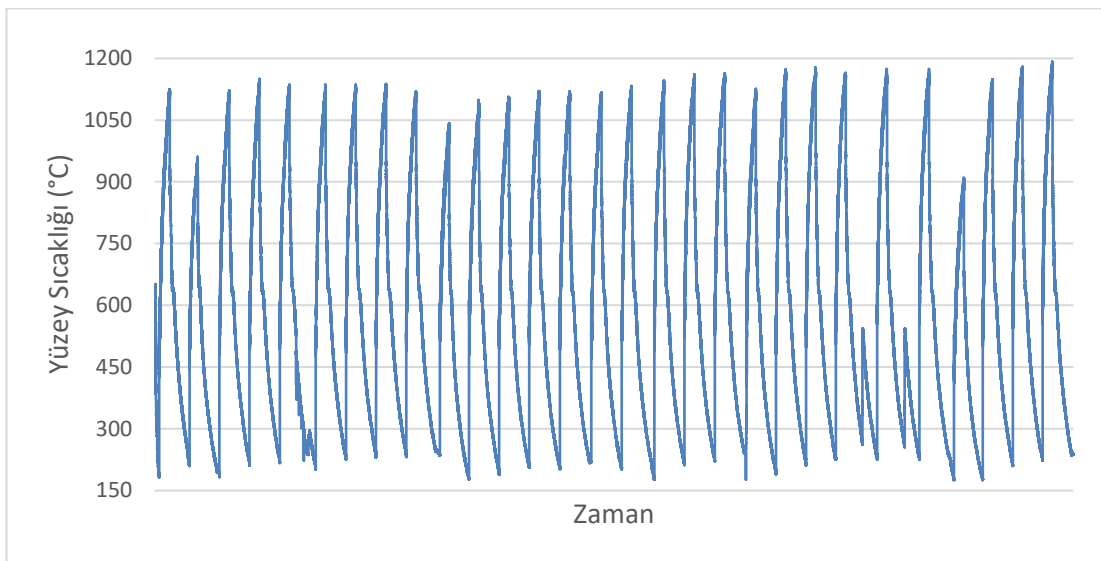
Şekil 5.6. Çevrimde Isıtma Aşamasının Kontrol Bilgisayarından Görünümü.

Termal kamera ile 3 farklı noktadan elde edilen veriler, en sıcak değerler incelendiğinde, sıcaklıkların ortalamaya göre ± 20 °C değiştiği görülmektedir. Dolayısıyla sistemin sıcaklık dağılımının homojen olduğu kabul edilmektedir. Buna göre ortalama değerler üzerinden zamana bağlı sıcaklık değişim grafikleri aşağıdaki şekillerde görülmektedir.



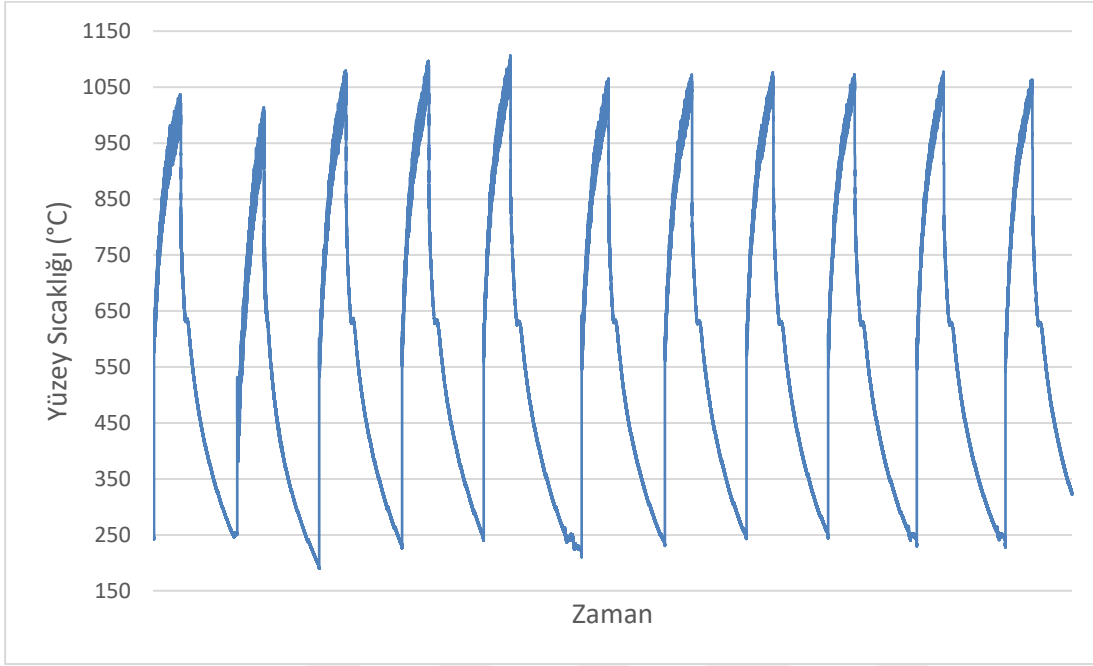
şekil 5.7. MC 01 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.

Termal kameranın kaydettiği verileri anlamlı grafiklere dökmek için tablolama programı kullanılmıştır. Birkaç işlem sonunda kameranın verdiği veriler ile sıcaklık-zaman grafiğine dönüştürülmüştür.



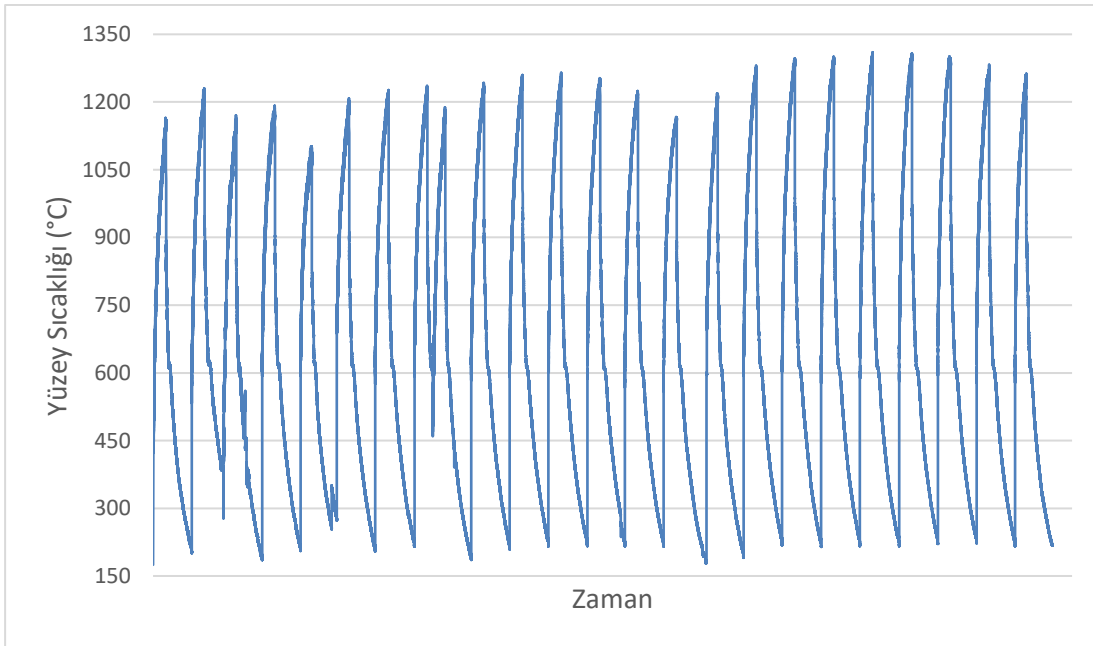
şekil 5.8. MC 02 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.

Test esnasında numune yüzeyinden 3 farklı noktadan yüzbinlerce sıcaklık verisi kaydedilmiştir. Bu 3 noktadan elde edilen verilerin ortalaması alınmış ve zamana bağlı olarak ortalama yüzey sıcaklığı değerleri üzerinden grafik çizimi gerçekleştirilmiştir.

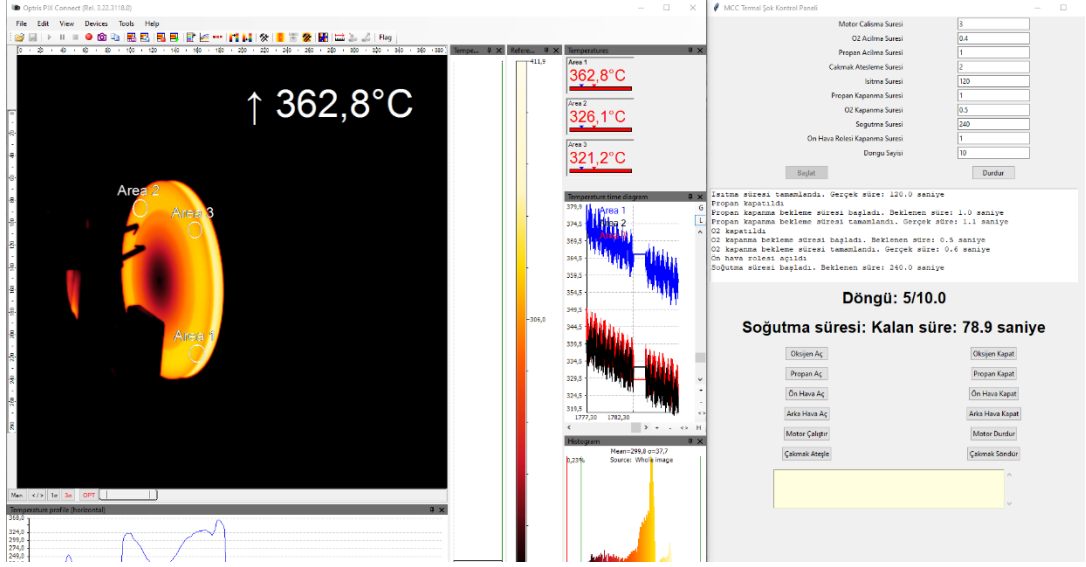


Şekil 5.9. MC 03 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.

Her numune için 10 çevrim inceleme periyodu olarak belirlenmiştir. 10 çevrimi tamamlayan numune, resim çekilerek, hasar gözlemi yapılarak yeniden monte edilmiş ve teste devam edilmiştir.



Şekil 5.10. MC 04 Kodlu Numunenin Sıcaklık-Zaman Grafiği.



Şekil 5.11. Çevrimde Soğutma Aşamasının Kontrol Bilgisayarından Görünümü.

Ortam sıcaklığı, kullanılan yanma gazlarının durumu ve test numuneleri değişiminden kaynaklı olarak her numune için ulaşılan azami sıcaklık farklılık göstermektedir. Anlık ve bölgesel olarak MC 01 kodlu numune için 1036 °C, MC 02 kodlu numune için 1235 °C, MC 03 kodlu numune için 1175 °C, MC 04 kodlu numune için 1368 °C ölçülmüştür. Bu ölçüm değerleri 3 ölçüm noktasından herhangi biri için noktasal olarak test süresi boyunca ölçülmüş en yüksek sıcaklık değeridir. Bununla birlikte her numune test süresi boyunca, ortalama 1250 ± 100 °C sıcaklığında kalmıştır.

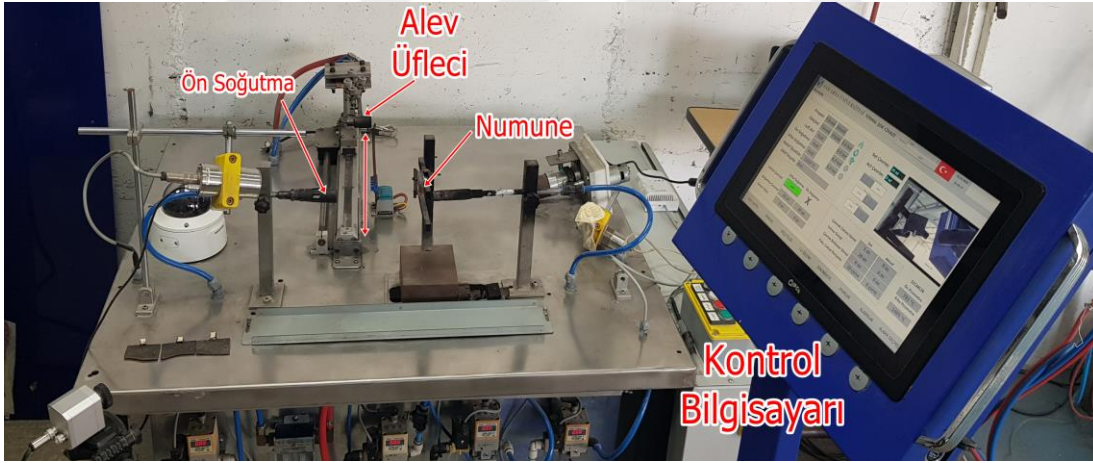
5.2. Statik Termal Şok Deneyi

Dinamik termal şok testine maruz kalan numuneler ile birlikte analizlerde kullanılmak üzere aynı şartlarda kaplanmış olan numunelere statik şartlar altında termal şok deneyi uygulanmıştır. Bu deney dinamik termal şok deneyi ile statik termal şok deneyi arasında kıyaslama yapmamıza imkan vermiştir.



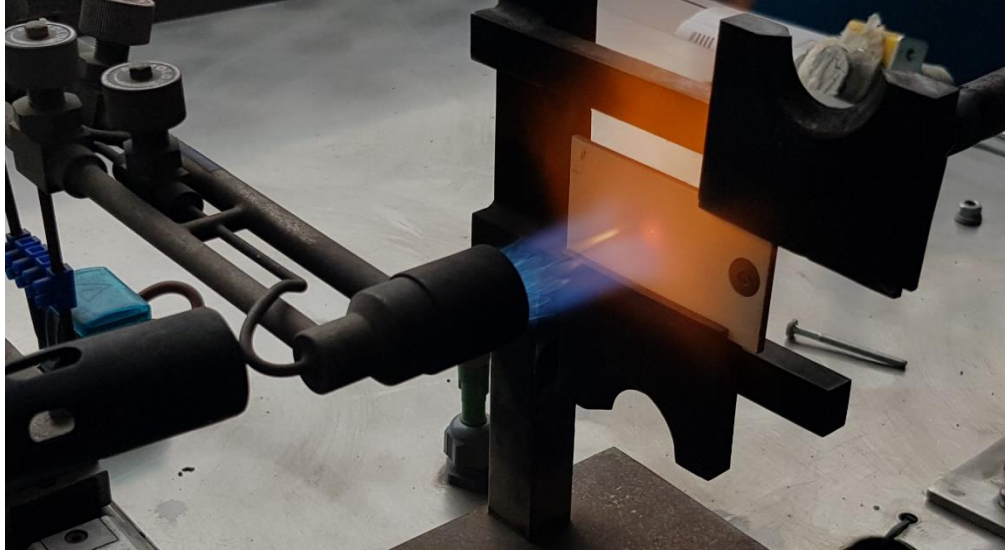
Şekil 5.12. Statik Test İçin Kullanılan Numuneler.

Disk numunenin yanında diğer analizlerde kullanılmak üzere kaplaması yapılan sac levhalardan 40mm x 70mm boyutlarında numuneler hazırlanmıştır. Bu numunelere TESLAB envanterinde yer alan, Statik Termal Şok Test Düzenegi ile termal ömür testi gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.13. Statik Termal Şok Test Düzenegi Genel Görünümü.

Cihazda alev üfleci hareketli bir pistonla bağlanmıştır. Çevrim başladığında piston hareketi ile numune karşısına gelen alev üfleci, ısıtma süresi boyunca numuneyi ısıtmaktadır. Ardından numunenin karşısından uzaklaşır. Bu sırada ön hava üfleci çalışmaya başlar ve numuneyi soğutmaya başlar. Tüm bu süreçler boyunca numune sabit olarak durmaktadır. Isıtma ve soğutma süresi dahil tüm parametreler kontrol bilgisayarından kontrol edilmektedir. Bununla birlikte numune yüzeyindeki sıcaklık, termal kamera ile kayıt altına alınmaktadır.



Şekil 5.14. Test Anından Görüntü.

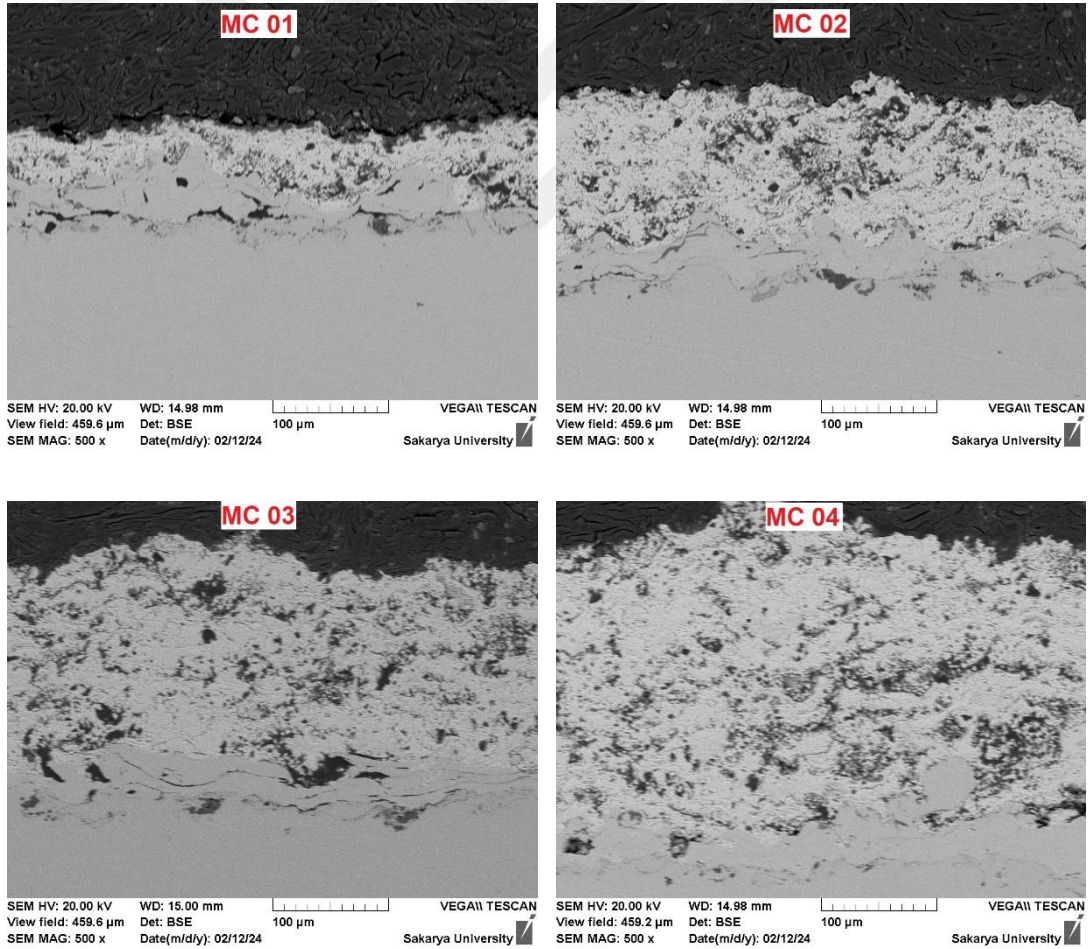
Isıtma süresi 30 saniye, soğutma süresi de 25 saniye olarak belirlenmiştir. Soğutma süresi sonunda 5 saniye bekleme süresi ile 1 çevrim tamamlanmaktadır. Isıtma süresi sonunda yüzey sıcaklığı 1250 °C sıcaklığa ulaşmakta ve bekleme süresinin sonunda yaklaşık 200 °C sıcaklığa gerilemektedir. Kontrol periyodu olarak 10 çevrim seçilmiştir. 10 çevrim tamamlandığında numune üzerinden görüntü alınmaktadır. Hasar tespit edilirse diğer numuneye geçilmektedir. Hasar yoksa test devam ettirilmektedir.



6. SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRME

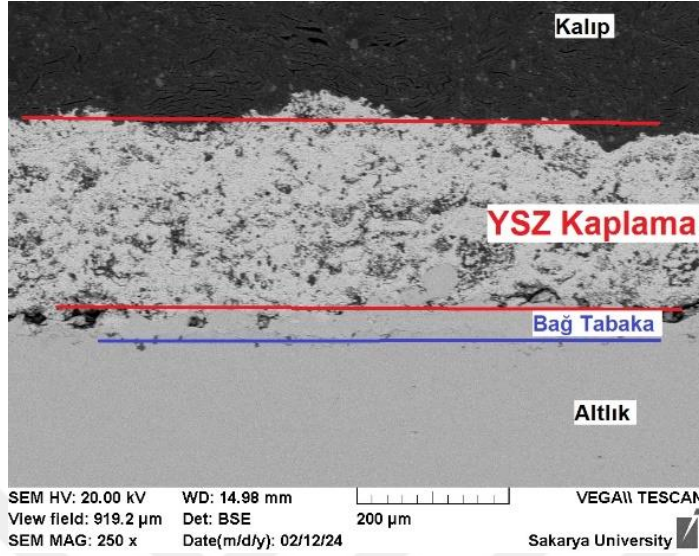
6.1. Kaplama Sonrası Numunelerin Kesit Görünümü

Disklerin kaplaması yapılırken, incelemelerde kullanılmak üzere, sac numune kullanılmış ve sonrasında sac numune diskten ayrılmıştır. Bu sac numuneler, öncelikle metalografik işlemlerden geçirilmiştir. Ardından Termal Sprey Laboratuvarı envanteri içerisinde yer alan Tescan markasına ait Vega II model taramalı elektron mikroskobu (SEM) yardımıyla incelenmiştir. Kaplamanın kesitinden görüntüleri alınmıştır.



Şekil 6.1. Kaplamaların SEM Altında Kesit Görünümleri.

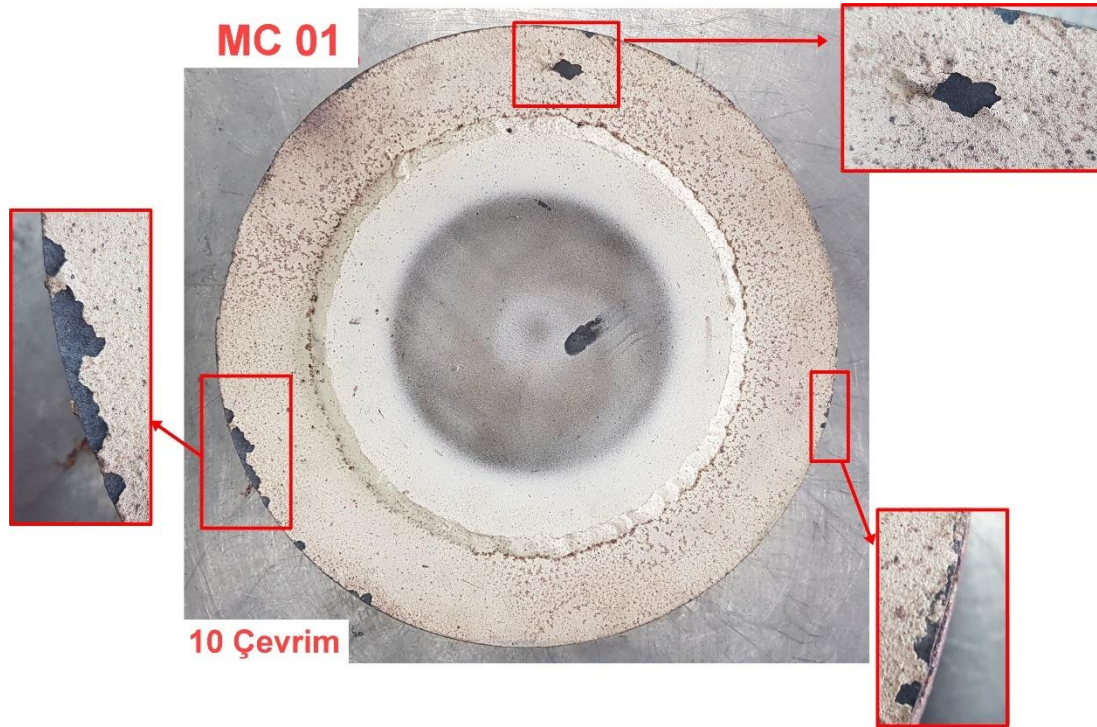
Şekil 6.1'de 4 farklı kaplamanın da 500x büyütme altında kesit görüntüleri yer almaktadır. Şekil 6.2'de ise MC 04 kodlu kaplama üzerinde kaplanmış alanlar belirtilmiştir.



Şekil 6.2. MC 04 Kodlu Kaplama Üzerindeki Detaylar.

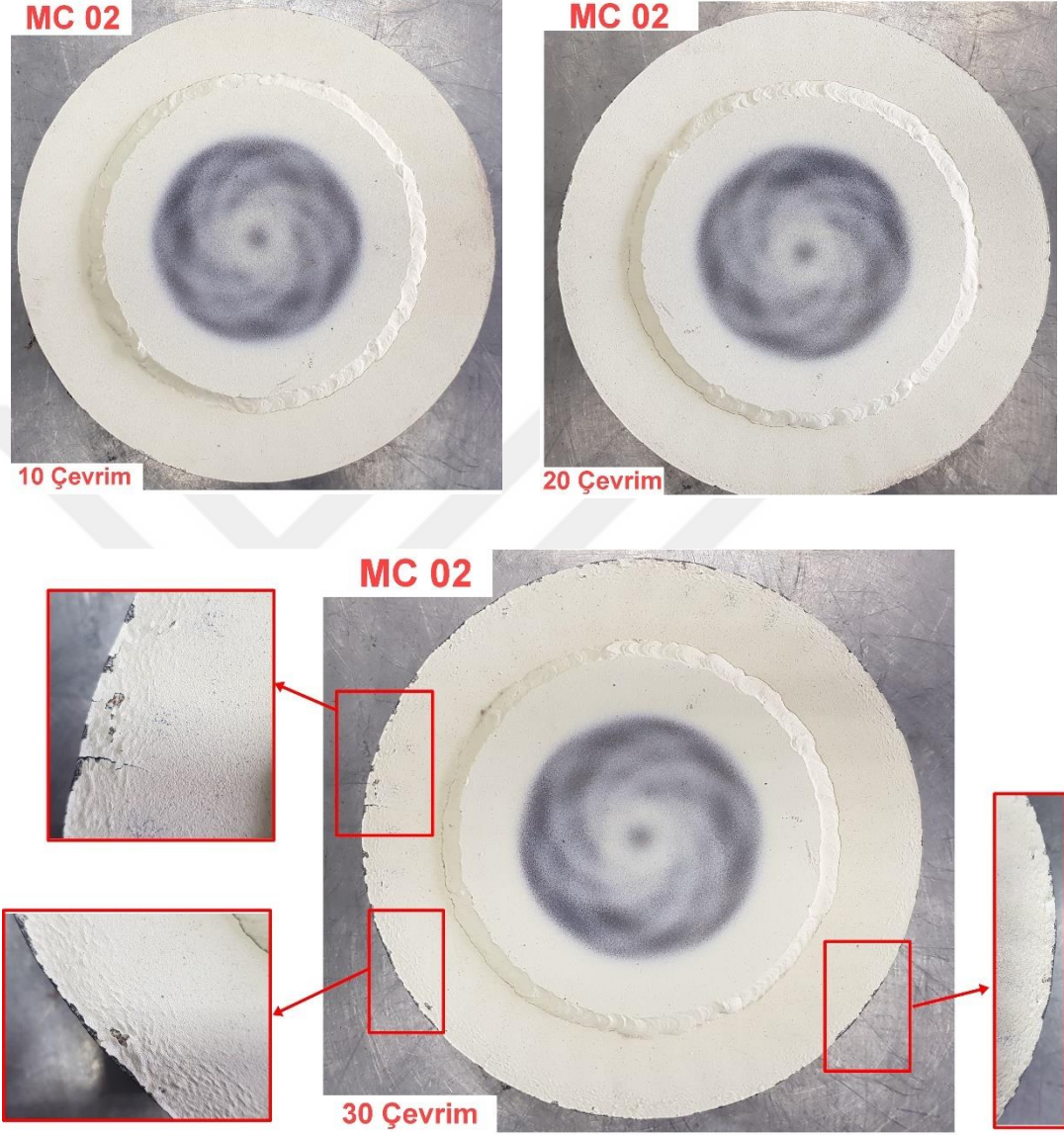
6.2. Dinamik Termal Şok Test Sonuçları

MC 01 ilk test gerçekleştirilen numunedir. Ardından sırayla diğer numunelere gerçekleştirilen testlerin çevrim bazlı sonuçlarına ait görseller aşağıdaki gibidir.



Şekil 6.3. MC 01 Kodlu Numunenin 10 Çevrim Sonrası Hasarlı Görünümü.

MC 01 Kodlu numune 10 çevrim sonrasında kaplama bütünlüğü bozulmuş biçimde gözlemlenmiştir. Bir çok bölgede ayrılmalar görülmüş ve ayrılmaya başlayacak olan çatlaklar tespit edilmiştir.



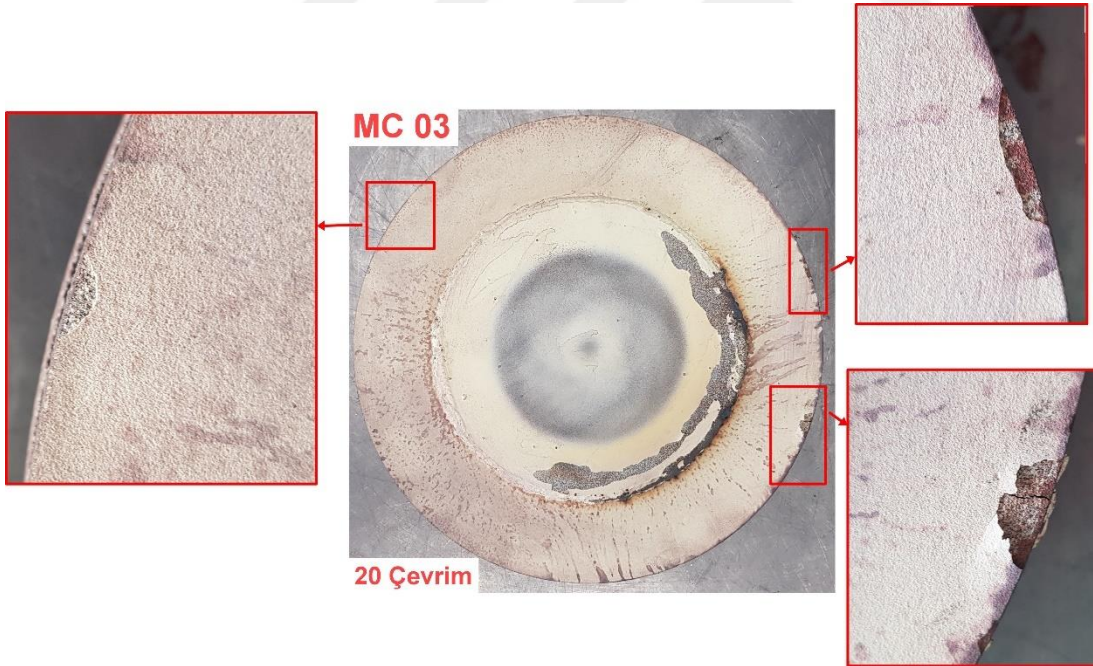
Şekil 6.4. MC 02 Kodlu Numunenin Çevrim Sonlarındaki Görünümü.

MC 02 kodlu numune her 10 çevrim sonunda resim çekilerek kontrol edilmiştir. 20 çevrim tamamlandığında bazı çatlak başlangıçları gözlemlenmiştir. Kaplama bütünlüğü bozulmadığından test devam ettirilmiştir. 30 çevrim tamamlandığında birçok noktada kaplamanın kalktığı, kabarmaların olduğu ve yeni çatlakların oluştuğu görülmüştür.



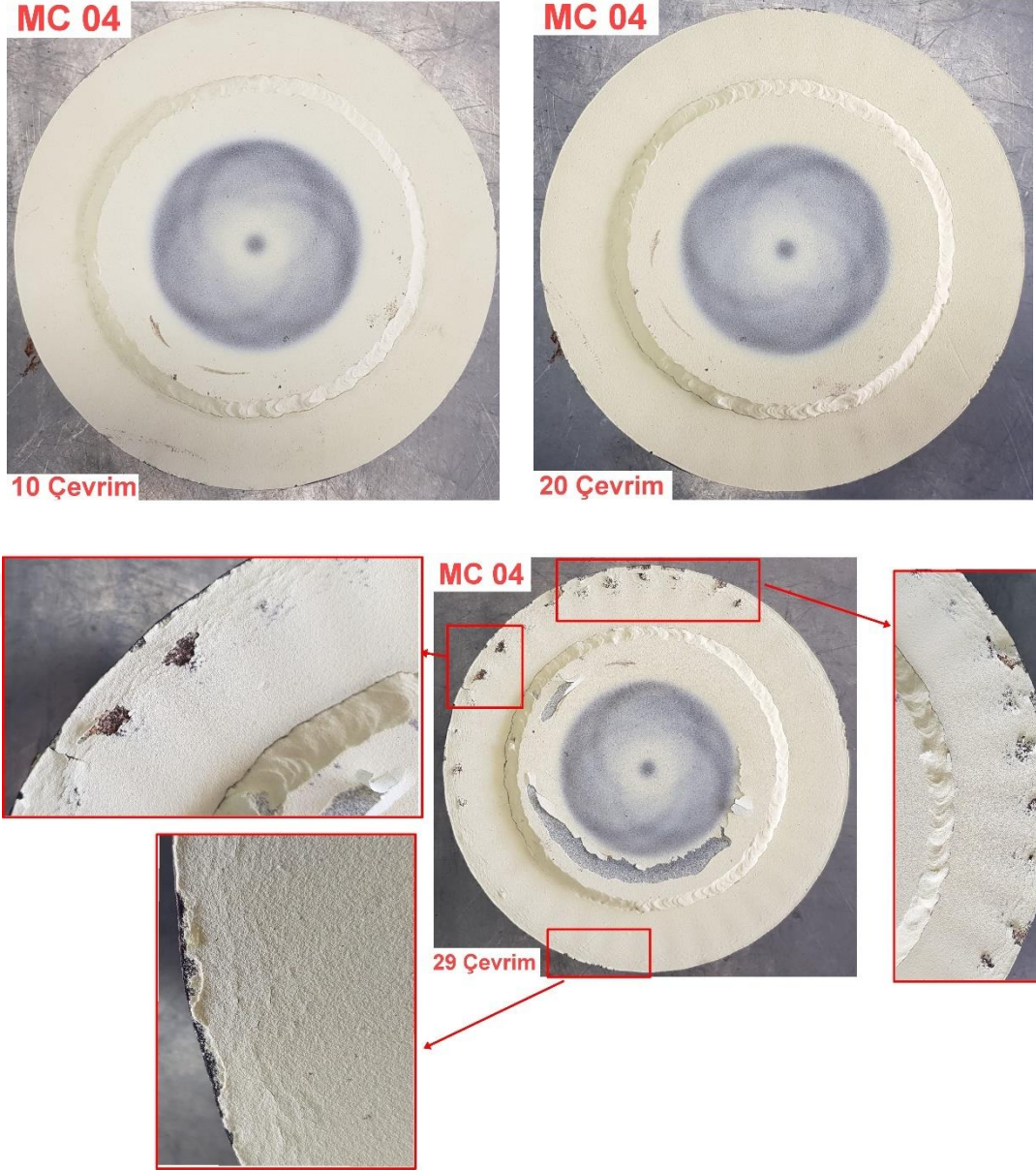
Şekil 6.5. MC 03 Kodlu Numunenin 10 Çevrim Sonrası Görünümü.

MC 03 kodlu numunede 10 çevrim sonunda herhangi bir hasar oluşmadığı gözlemlendiğinden test devam ettirilmiştir.



Şekil 6.6. MC 03 Kodlu Numunenin 20 Çevrim Sonrası Görünümü.

Numunenin 20 çevrim sonrasında kaplama bütünlüğünü kaybettiği, birden fazla noktada ayrılmalar yaşandığı, çatlakların ve kabarmaların olduğu görülmüştür.

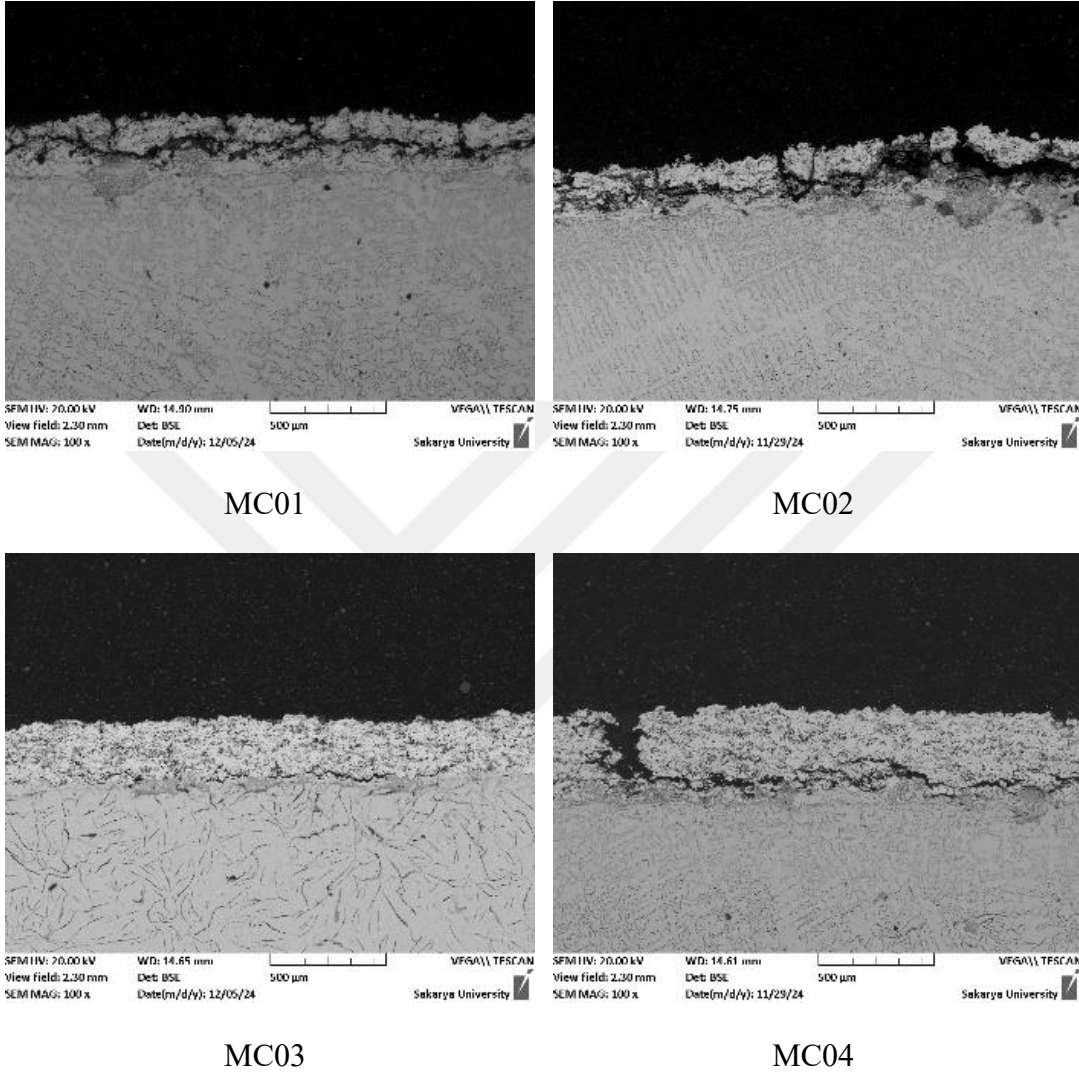


Şekil 6.7. MC 04 Kodlu Numunenin Termal Şok Testi Sonrası Görünümleri.

Numune 10 çevrim aralıklarla resimlenmiştir. 29 çevrim tamamlandığında birçok noktada kaplamanın ayrıldığı, çatlaklar oluştuğu ve kabarmaların olduğu gözlemlenmiş ve bu sebeple çevrim durdurulmuştur. İlk 20 çevrim sonunda gözle görülür hasar olmaması sebebiyle test devam etmiş ve 30 çevrim sonunda duracak şekilde ayarlanmıştır. Ancak 29. çevrim sırasında kopan kaplama parçacıklarının dönme etkisiyle etrafa sıçraması ve güvenlik açısından tehlike oluşturması sebebiyle test durdurulmuştur.

6.3. Dinamik Termal Şok Sonrası Kesit Görünümü

Dinamik termal şok testleri sonrasında disk numunelerin hasar almış bölgelerinden numune alınarak SEM ile kesit görüntüleri alınmıştır.



Şekil 6.8. Termal Şok Testi Sonrası Kesit Görünümleri.

Resimlerde açıkça görülmektedir ki kaplama üst yüzeyi ile altlık arasında yüzeye dik biçimde çatlaklar meydana gelmiştir. Aynı zamanda altlık ile kaplama arasında da yatay çatlak oluşumu ve oksit oluşumu görülmüştür. Bu çatlak oluşumları termal bariyer kaplamanın bütünlüğünü korumasını engellemiştir. Çatlakların arasından sızan hava içerisindeki oksijen atomları, bağ tabakasındaki metalik atomlar ile bileşikler oluşturarak TGO katmanını da oluşturmaktadır.

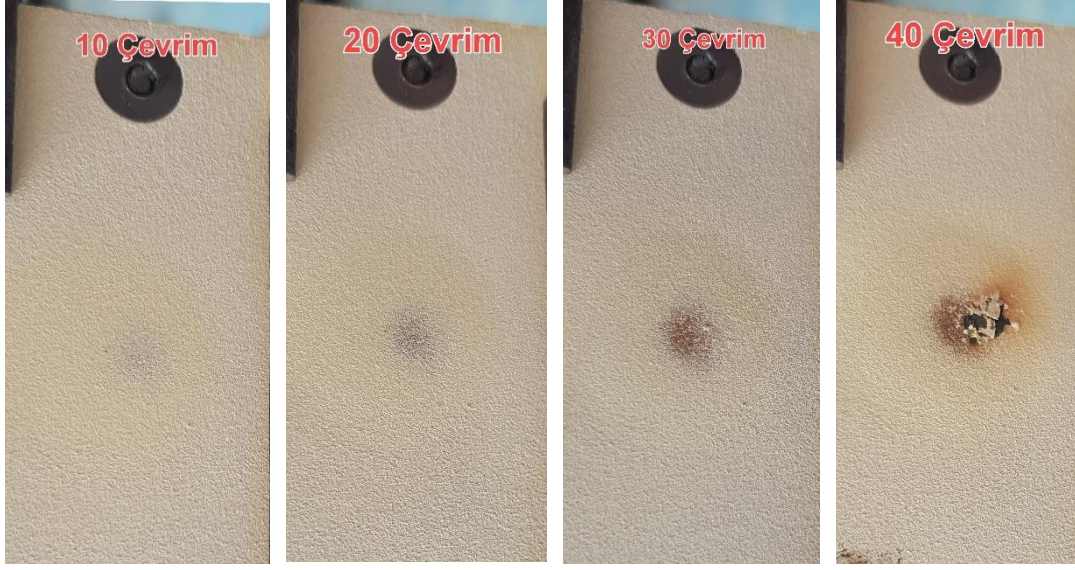
6.4. Statik Termal Şok Test Sonuçları

Statik testler de dinamik testlerde olduğu gibi MC 01 kodlu numune ile başlamış ve diğer numuneler ile devam etmiştir. Aşağıda numunelerin test süresi boyunca ve sonunda çekilmiş resimleri yer almaktadır. Numuneler her 10 çevrim sonunda resimlenmiştir. Numune üzerindeki hasar sonucunda kaplama kalkmış ve altlık ortaya çıktığı anda test sonlandırılmıştır.



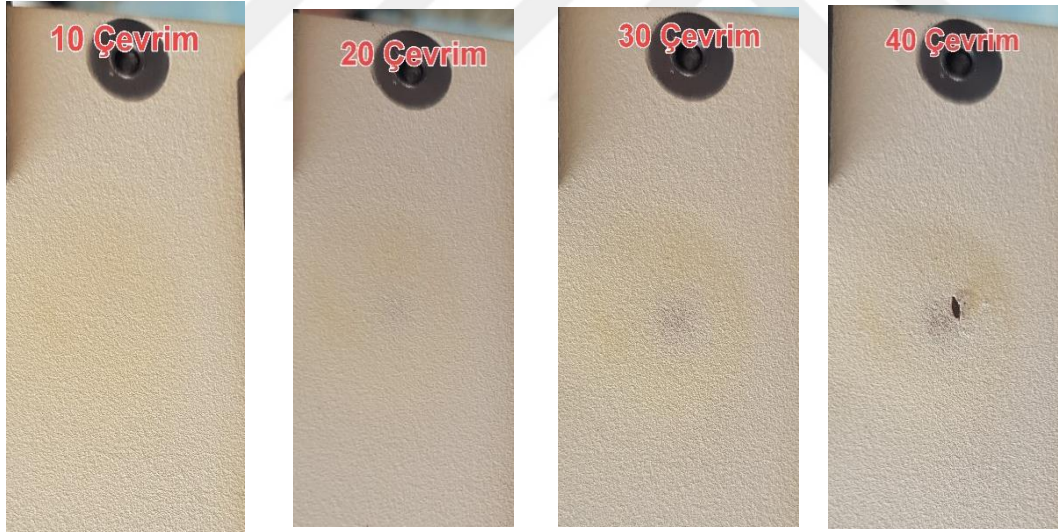
Şekil 6.9. MC 01 Kodlu Numunenin Statik Test Sonrası Görünümleri.

MC 01 kodlu numunede ilk 20 çevrim sonunda belirgin bir hasar tespit edilememiştir. 30 çevrim sonunda gözle görülür şekilde oluşmaya başlayan hasar, 40 çevrim tamamlandığında çatlaklar, kabarmalar ve kaplama kalkması şeklinde kendini göstermiştir. Bu yüzden test sonlandırılmıştır. Diğer numune monte edilerek testler devam ettirilmiştir.



Şekil 6.10. MC 02 Kodlu Numunenin Test Sonrası Görünümleri.

MC 02 kodlu numunede 30 çevrim sonunda belirginleşmeye başlayan bir hasar tespit edilmiştir. 40 çevrim sonunda çatlaklar görülmeye başlanmıştır bununla birlikte kaplama bütünlüğü bozulmuş ve numune hasar almıştır.



Şekil 6.11. MC 03 Kodlu Numunenin Test Sonrası Görünümleri

MC 03 kodlu numunede 30 çevrim sonuna kadar belirgin bir hasar tespit edilememiştir. 40 çevrim tamamlandığında ise artık kaplama bütünlüğü bozulmuş ve numune hasar almıştır. Kaplama hasarı neticesinde test sonlandırılmış ve diğer numune ile teste devam edilmiştir.





Şekil 6.12. MC 04 Kodlu Numunenin Test Sonrası Görünümleri.

MC 04 kodlu numunede 60 çevrim sonuna kadar belirgin bir hasar tespit edilememiştir. Ancak 70 çevrim sonrasında çatlaklar ve dökülmeler görülmeye başlamıştır. Merkezi bölgelerde kaplama kopmaları ve ayrışmalar gerçekleşmiştir. Kaplama bütünlüğü bozulmuş ve numune hasar almıştır. 60 çevrim boyunca hasar görülmemiş olması numune kaynaklı bir kusur olabileceğini göstermektedir. Hasar tespit edilen 70 çevrim ardından fotoğraflanan numune ile birlikte statik testler sonuçlandırılmıştır.

6.5. Numune Bazlı Çevrim Karşılaştırması




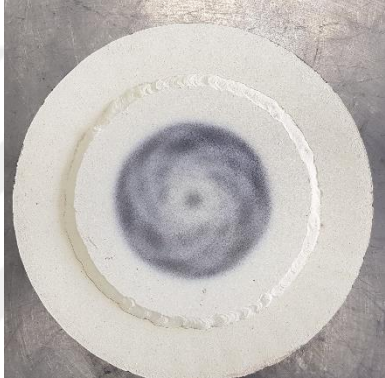



Aynı kaplama özelliklerine sahip numunelerin statik ve dinamik testler sonucunda hasar durumları, numune özelinde tablolar halinde aşağıda gösterilmiştir.

Tablo 6.1. MC 01 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.

Çevrim sayısı	MC 01	
	Statik	Dinamik
10		
20		
30		
40		







MC 01 kodlu numune, statik testlerde 40 çevrime kadar dayanırken, dinamik test sırasında 10 çevrim sonunda hasara uğramıştır. Tablo 6.1’de bu durum fotoğraflar ile birlikte detaylı olarak görülmektedir. Statik test ile dinamik test arasında en çok fark bulunan numune, aynı zamanda en ince kaplama kalınlığına sahip olan MC 01 kodlu numunedir.

Tablo 6.2. MC 02 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.

Çevrim sayısı	MC 02	
	Statik	Dinamik
10		
20		
30		
40		


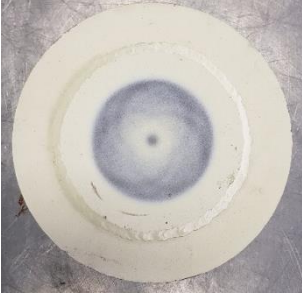

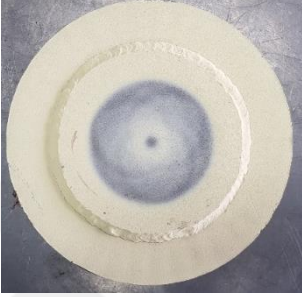






MC 02 kodlu numune, statik testlerde 40 çevrime kadar dayanırken, dinamik test sırasında 30 çevrim sonunda hasara uğramıştır. Bu numuneler arasında dinamik test numunesinde kaynaklı bölgede problem tespit edilmiştir. Bölüm 7’de konu hakkında bilgi verilmiştir.

Tablo 6.3. MC 03 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.

Çevrim sayısı	MC 03	
	Statik	Dinamik
10		
20		
30		
40		

MC 03 kodlu numune, statik testlerde 40 çevrime kadar dayanırken, dinamik test sırasında 20 çevrim sonunda hasara uğramıştır. Statik test gerçekleştirilen numunenin 40 çevrim sonunda aldığı hasar, diğer statik numunelerin aldığı hasarlara göre çok daha küçüktür. Ancak testlerin ve ortamın güvenliği açısından test bu noktada sonlandırılmıştır.

Tablo 6.4. MC 04 Kodlu Numunenin Hasar Karşılaştırması.

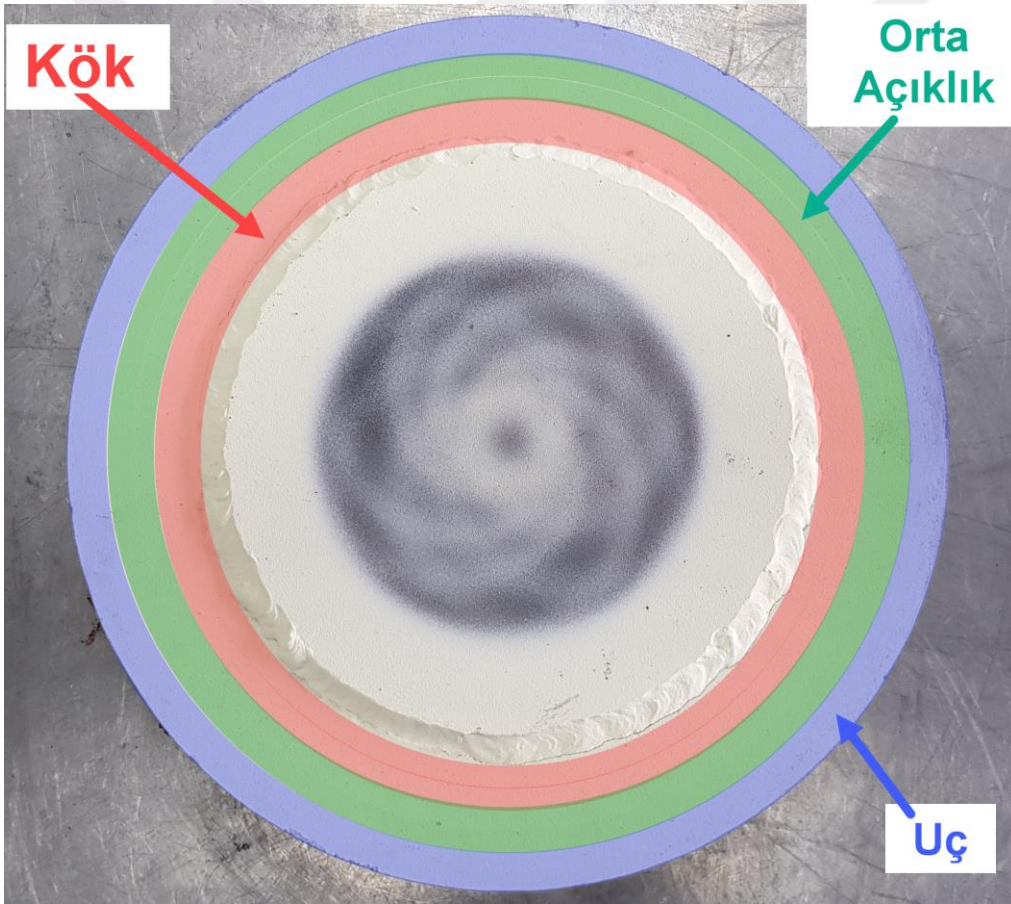
Çevrim sayısı	MC 04	
	Statik	Dinamik
10		
20		
30		
40		
50		
60		
70		

Tablo 6.4'te görüldüğü üzere MC 04 kodlu numune, statik testlerde 70 çevrime kadar dayanırken, dinamik test sırasında 29 çevrim sonunda hasara uğramıştır. Tablolar açıkça göstermektedir ki statik testler, dinamik testlere göre numunelere çok daha uzun çevrim sonucunda hasar vermektedir.

6.6. Hasarların İstatistiksel Analizi

6.6.1. Hasar sayıları

Termal şok testi sonuçlarının ardından hasarlar sayılmış ve bölgelere ayrılmıştır. Bölgeler türbin kanadı tasarımına göre adlandırılmıştır. Kök (Root), numune alanının merkezi bölgesidir. Uç (Tip), soğutma havasının numuneden çıktığı bölgedir. Orta açıklık (Mid-span) bu iki bölgenin ortasındadır.



Şekil 6.13. Numune Üzerindeki Hasar Bölgeleri.

Hasar tespiti yapılırken kopmuş alanların ortalama çapları belirlenmiştir. Bu çaplar 0,5 mm'den küçük, 0,5 mm ile 1 mm arasında ve 1 mm ile 2 mm arasında şeklinde üç gruba ayrılmıştır. Her numunedeki hasarlar sayılarak gruplara ayrılmış ve Tablo 6.5'te belirtilmiştir.

Tablo 6.5. Numunelerdeki Hasar Sayıları.

		$\emptyset < 0,5 \text{ mm}$	$0,5 \text{ mm} < \emptyset < 1 \text{ mm}$	$1 \text{ mm} < \emptyset < 2 \text{ mm}$
MC01	Kök	0	0	0
	Orta Açıklık	0	0	1
	Uç	13	3	0
MC02	Kök	0	0	0
	Orta Açıklık	0	8	0
	Uç	23	6	0
MC03	Kök	0	0	0
	Orta Açıklık	0	0	0
	Uç	4	4	15
MC04	Kök	0	0	0
	Orta Açıklık	0	0	0
	Uç	16	5	14

Her numune için çevrim bitiminden sonra hasar sayısı incelemesi yapılmıştır. Hasar sayıları incelendiğinde kök bölgesinde tüm numunelerde hasar olmadığı anlaşılmıştır. Orta açıklık bölgesinde nispeten az hasar gözlenmiştir. Her bir numunenin uç bölgesinde kayda değer sayıda hasar tespit edilmiştir. MC 01 ve MC 02 kodlu numunelerde daha küçük hasarlar gözlenmiştir. MC 03 ve MC 04 kodlu numunelerde ise çok daha büyük hasarlar meydana gelmiştir. Kaplama kalınlığı arttıkça hasar sayısında ve boyutunda artış gözlenmiştir.

6.6.2. İstatistiksel analiz

Tablo 6.5 incelendiğinde tekil veri setinin olmadığı, bu yüzden normal dağılım kullanılarak analiz yapılamayacağı anlaşılmıştır. Normal dağılım testi (Shapiro-Wilk, Kolmogorov-Smirnov vb.) yapabilmek için aynı koşullarda birden fazla ölçüm değerine ihtiyaç duyulmaktadır. Ancak her hücre tek bir sayı içeriyor. Dolayısıyla bu tabloya bakarak “normal dağılıma uyup uymadığını” test etmek, istatistiksel açıdan mümkün değildir. Bunun yerine, kategorik veri (frekans) analizine uygun analiz yöntemleri tercih edilmelidir. Böyle bir tabloyu analiz etmek için en sık kullanılan yöntem Ki-kare (Chi-Square) testidir (Lancaster ve Seneta, 2005).

Ki-Kare testine başlamak için elimizdeki tabloda üç ölçüm noktasındaki değerleri (Kök, Orta Açıklık, Uç) toplayarak tek bir satır oluşturulur. Ardından “Toplam” satırı ve “Toplam” sütunu da oluşturularak yeni bir tablo elde edilir.

Tablo 6.6. Ki-Kare Testi İçin Oluşturulan Tablo.

	$\emptyset < 0,5 \text{ mm}$	$0,5 \text{ mm} < \emptyset < 1 \text{ mm}$	$1 \text{ mm} < \emptyset < 2 \text{ mm}$	Toplam (Satır)
MC01	13	3	1	17
MC02	23	14	0	37
MC03	4	4	15	23
MC04	16	5	14	35
Toplam (Sütun)	56	26	30	112

Bu tabloya Ki-kare bağımsızlık testi uygulandığında şu hipotezler sunulmaktadır:

- **H₀ (Null Hipotezi):** MC grubu ile çap kategorisi arasında ilişki yoktur (dağılımlar aynıdır).
- **H₁ (Alternatif Hipotez):** MC grubu ile çap kategorisi arasında ilişki vardır (dağılımlar farklıdır).

Hipotezlerin sunulmasının ardından her bir hücre için beklenen değer hesabı (**E_{ij}**) yapılmaktadır. Her hücre için beklenen değer aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır:

$$E_{ij} = \frac{(\text{Satır Toplamı}) \times (\text{Sütun Toplamı})}{\text{Genel Toplam}} \quad (6.1)$$

Örneğin, MC01 satırı ile ($\emptyset < 0,5 \text{ mm}$) sütununun kesiştiği hücre için:

$$E_{11} = \frac{(17) \times (56)}{112} = \frac{952}{112} \cong 8,5 \quad (6.2)$$

Benzer şekilde her hücre için bu hesap yapılır. Ardından aşağıdaki tablo oluşur.

Tablo 6.7. Beklenen Değer Tablosu.

E	$\emptyset < 0,5 \text{ mm}$	$0,5 \text{ mm} < \emptyset < 1 \text{ mm}$	$1 \text{ mm} < \emptyset < 2 \text{ mm}$
MC01	8,5	3,946428571	4,553571429
MC02	18,5	8,589285714	9,910714286
MC03	11,5	5,339285714	6,160714286
MC04	17,5	8,125	9,375

Ki-Kare (χ^2) istatistiğini hesaplamak için şu formül kullanılır:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{\text{Satır}} \sum_{j=1}^{\text{Sütun}} \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}} \quad (6.3)$$

Formüldeki O_{ij} , gözlenen değeri; E_{ij} ise beklenen değeri göstermektedir. Formülü Tablo 6.6 ve Tablo 6.7 deki değerleri kullanarak hesapladığımızda;

$\chi^2 \approx 41,32$ olarak bulunur.

Ana tablomuzun serbestlik derecesi (df) hesabını yapmak için şu formül kullanılır:

$$df = (R - 1) \times (C - 1) \quad (6.4)$$

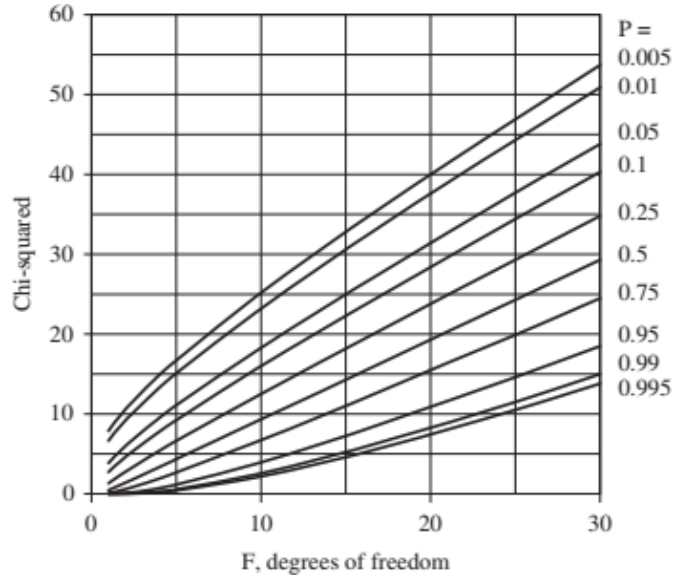
Burada $R=4$ (MC grubu sayısı), $C=3$ (çap kategorisi) şeklinde hesaplandığında;

$$df = (R - 1) \times (C - 1) = 3 \times 2 = 6 \quad (6.5)$$

$F =$	$P =$	0.995	0.990	0.975	0.950	0.900	0.750	0.500	0.250	0.100	0.050	0.025	0.010	0.005
1		0.0 ⁴ 393	0.0 ³ 157	0.0 ³ 982	0.0 ² 393	0.0158	0.102	0.455	1.32	2.71	3.84	5.02	6.63	7.88
2		0.0100	0.0201	0.0506	0.103	0.211	0.575	1.39	2.77	4.61	5.99	7.38	9.21	10.6
3		0.0717	0.115	0.216	0.352	0.584	1.21	2.37	4.11	6.25	7.81	9.35	11.3	12.8
4		0.207	0.297	0.484	0.711	1.06	1.92	3.36	5.39	7.78	9.49	11.1	13.3	14.9
5		0.412	0.554	0.831	1.15	1.61	2.67	4.35	6.63	9.24	11.1	12.8	15.1	16.7
6		0.676	0.872	1.24	1.64	2.20	3.45	5.35	7.84	10.6	12.6	14.4	16.8	18.5
7		0.989	1.24	1.69	2.17	2.83	4.25	6.35	9.04	12.0	14.1	16.0	18.5	20.3
8		1.35	1.65	2.18	2.73	3.49	5.07	7.34	10.2	13.4	15.5	17.5	20.1	22.0
9		1.73	2.09	2.70	3.33	4.17	5.90	8.34	11.4	14.7	16.9	19.0	21.7	23.6
10		2.16	2.56	3.25	3.94	4.87	6.74	9.34	12.5	16.0	18.3	20.5	23.2	25.2
11		2.60	3.05	3.82	4.57	5.58	7.58	10.3	13.7	17.3	19.7	21.9	24.7	26.8
12		3.07	3.57	4.40	5.23	6.30	8.44	11.3	14.8	18.5	21.0	23.3	26.2	28.3
13		3.57	4.11	5.01	5.89	7.04	9.30	12.3	16.0	19.8	22.4	24.7	27.7	29.8
14		4.07	4.66	5.63	6.57	7.79	10.2	13.3	17.1	21.1	23.7	26.1	29.1	31.3
15		4.60	5.23	6.26	7.26	8.55	11.0	14.3	18.2	22.3	25.0	27.5	30.6	32.8
16		5.14	5.81	6.91	7.96	9.31	11.9	15.3	19.4	23.5	26.3	28.8	32.0	34.3
17		5.70	6.41	7.56	8.67	10.1	12.8	16.3	20.5	24.8	27.6	30.2	33.4	35.7
18		6.26	7.01	8.23	9.39	10.9	13.7	17.3	21.6	26.0	28.9	31.5	34.8	37.2
19		6.84	7.63	8.91	10.1	11.7	14.6	18.3	22.7	27.2	30.1	32.9	36.2	38.6
20		7.43	8.26	9.59	10.9	12.4	15.5	19.3	23.8	28.4	31.4	34.2	37.6	40.0
21		8.03	8.90	10.3	11.6	13.2	16.3	20.3	24.9	29.6	32.7	35.5	38.9	41.4
22		8.64	9.54	11.0	12.3	14.0	17.2	21.3	26.0	30.8	33.9	36.8	40.3	42.8
23		9.26	10.2	11.7	13.1	14.8	18.1	22.3	27.1	32.0	35.2	38.1	41.6	44.2
24		9.89	10.9	12.4	13.8	15.7	19.0	23.3	28.3	33.2	36.4	39.4	43.0	45.6
25		10.5	11.5	13.1	14.6	16.5	19.9	24.3	29.3	34.4	37.7	40.6	44.3	46.9
26		11.2	12.2	13.8	15.4	17.3	20.8	25.3	30.4	35.6	38.9	41.9	45.6	48.3
27		11.8	12.9	14.6	16.2	18.1	21.7	26.3	31.5	36.7	40.1	43.2	47.0	49.6
28		12.5	13.6	15.3	16.9	18.9	22.7	27.3	32.6	37.9	41.3	44.5	48.3	51.0
29		13.1	14.3	16.0	17.7	19.8	23.6	28.3	33.7	39.1	42.6	45.7	49.6	52.3
30		13.8	15.0	16.8	18.5	20.6	24.5	29.3	34.8	40.3	43.8	47.0	50.9	53.7

Şekil 6.14. Ki-Kare Dağılım Tablosu.

Hesapladığımız $\chi^2 \approx 41,32$ ve $df = 6$ değerlerini kullanarak Ki-kare dağılım tablosuna bakılarak p değeri hesaplandığında çok küçük bir değer ($< 0,0001$) ortaya çıkmaktadır (Holman, 2012). $p < 0,05$ olduğu için H_0 reddedilir. Bu durumda, MC grubu ile çap kategorisi arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark (ilişki) olduğu anlaşılmaktadır.



Şekil 6.15. Ki-Kare Fonksiyonu.

Farklı MC gruplarının bu çap aralıklarında dağılımı benzer değil, aralarında istatistiksel olarak anlamlı bir farklılık vardır (Breton, 2015; Charniigo ve ark., 2013; Holman, 2012).

7. TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Termal bariyer kaplamaların (TBK) performans değerlendirmesi, uzun yıllardır büyük ölçüde statik koşullar altında gerçekleştirilen termal şok testlerine dayanmaktadır. Bu testler, kaplamaların yüksek sıcaklıklara karşı direncini ölçmede değerli bilgiler sunsa da gerçek çalışma ortamlarının dinamik doğasını göz ardı ederler. Gaz türbini kanatları, havacılık motoru parçaları veya diğer yüksek performanslı bileşenler üzerindeki kaplamalar, yalnızca aşırı sıcaklık değişimlerine değil, aynı zamanda dönme hareketinden kaynaklanan santrifüj kuvvetleri, titreşim ve mekanik gerilimler gibi karmaşık ve çok yönlü zorlamalara da maruz kalır. Statik testler bu mekanik bileşeni tamamen denklem dışında bırakır. Bu durum da kaplamanın gerçek ömrü ve bozulma mekanizmaları hakkında eksik bir resim sunar.

Bu çalışmada; literatürde bulunan kritik bir boşluğu doldurmak üzere "**Dinamik Termal Şok Test Cihazı**" tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu deney düzeneği, termal çevrimlerin yarattığı termomekanik gerilimleri, dönme hareketinden kaynaklanan radyal etkilerle birleştirerek gerçek çalışma koşullarını simüle edecek şekilde dinamik bir ortamda yapılmasına olanak sağlanmıştır. Böylece daha etkin bir termal yorulma test cihazı ve yöntemi literatüre kazandırılmıştır.

Yapılan deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçlar ile statik testlerin arasında anlaşılabilir bir farkın olduğu görülmüştür. Dinamik etkiler altında, kaplamaların deformasyon hızının belirgin şekilde arttığı ve dayanım ömürlerinin statik koşullara kıyasla dramatik ölçüde düştüğü net bir şekilde tespit edilmiştir. Daha da önemlisi, cihaz sayesinde radyal etkilerin, kaplama-altlık ara yüzeyindeki hasar mekanizmalarını çok daha erken tetiklediği ve çatlak ilerleme dinamiğini temelden değiştirdiği görülmüştür. Bu durum; statik testlerle elde edilmesi mümkün olmayan, kaplamanın gerçekçi bozulma senaryosuna ait net bir bilgi olarak ortaya konmuştur.

Statik testler, kaplamanın ömrü hakkında iyimser ve çoğu zaman yanıltıcı sonuçlar verebilirken, dinamik testler çok daha muhafazakar ve gerçekçi veriler sunmaktadır. Bu bilgiler; özellikle havacılık ve enerji santralleri gibi güvenliğin kritik olduğu

sektörlerde, daha dayanıklı ve güvenilir kaplamaların tasarlanması ve malzeme seçiminin doğru yapılması açısından hayati önem taşımaktadır.

Dinamik Termal Şok Test Cihazı'nın imalatı, sadece bu çalışma özelinde bir başarı olmanın ötesinde, termal bariyer kaplamaların dinamik testleri alanında bir standart oluşturma yolunda atılmış öncü bir adımdır. Hâlihazırda bu tür termal şok testleri için uluslararası kabul görmüş bir standart bulunmamaktadır. Geliştirilen bu prototip düzenek ve bu düzenekle uygulanan test metodolojisi, gelecekte endüstriyel ve akademik standartların geliştirilmesi için temel bir referans noktası ve model teşkil etme potansiyeline sahiptir.

Yapılan termal şok testlerinin sonuçları, kaplama kalınlığının çevrim ömrü üzerindeki etkisine dair literatür verileriyle tutarlılık sergilemektedir. Beklendiği üzere, en düşük kaplama kalınlığına sahip MC 01 numunesi en kısa sürede hasara uğrarken, en kalın kaplamalı MC 04 numunesi MC 02 numunesi ile birlikte en yüksek dayanımı göstermiştir.

Dinamik testler neticesinde MC 01, MC 02, MC 03 ve MC 04 kodlu numuneler sırasıyla 10, 30, 20 ve 29 termal çevrim sonunda test ömürlerini tamamlarken; statik koşullar altında test edilen kontrol numunelerinin ömürleri çok daha yüksek olup sırasıyla 40, 40, 40 ve 70 çevrim olarak ölçülmüştür. (Bkz. Bölüm 6.4). Bu sonuçlara göre; “Dinamik testlerle belirlenen TBK'nın dayanım ömrü, statik testlerle belirlenen ömürün yaklaşık yarısı kadardır.” çıkarımı yapılabilir.

Tablo 7.1. Termal Şok Testleri Sonuçları.

	MC 01	MC 02	MC 03	MC 04
Dinamik Termal Şok Test Çevrim Sayısı	10	30	20	29
Statik Termal Şok Test Çevrim Sayısı	40	40	40	70

Testlerin sonlandırılması kararı, numuneler üzerinde önceden tanımlanmış kritik hasar seviyelerine ulaşıldığında alınmıştır. Bu kriterler; kaplama yüzeyinde kabarma ve dökülmelerin (spalasyon) başlaması, mevcut çatlakların ilerleyerek kaplama bütünlüğünü tehdit eder hale gelmesi veya seramik tabakanın delaminasyonu (katman ayrılması) sonucu metalik altlığın aşırı ısınma riskiyle karşı karşıya kalması olarak

tanımlanmıştır. Bu durumlarda, hem veri bütünlüğünü korumak hem de test cihazını ve diğer ekipmanları korumak amacıyla ve ortam güvenliğini sağlamak için deneylere son verilmiştir.

Tablo 7.2. Literatürdeki Statik Termal Şok Örnekleri

Kaplama Cinsi	Kalınlık	Çevrim Sayısı	Notlar ve Ek Bilgi	Yayın
%56 Y ₂ O ₃ - stabilize ZrO ₂ (TTBC)	1000 µm	83 (düşük porozite), 44 (yüksek porozite)	1000°C'de; porozite artıkça çevrim ömrü azalıyor	(Lu ve ark., 2019)
ZrO ₂ -7%Y ₂ O ₃ (YSZ)	100 µm	240	200 µm optimum, 400 µm'de 80 çevrim; 200 µm'de >340 çevrim	
ZrO ₂ -7%Y ₂ O ₃ (YSZ)	200 µm	>340	En uzun çevrim ömrü bu kalınlıkta	(Wu ve ark., 2023)
ZrO ₂ -7%Y ₂ O ₃ (YSZ)	400 µm	80	Kalınlık arttıkça çevrim ömrü azalıyor	
Al ₂ O ₃ + YSZ (eşit oran)	300 µm	350	850 °C'de; 100 ve 200 µm'ye göre daha iyi dayanım	(Nayak ve ark., 2024)
8YSZ-Al ₂ O ₃ kompozit	330 µm	162 (10% Al ₂ O ₃), 56 (40% Al ₂ O ₃)	1100 °C'de; Al ₂ O ₃ oranı artıkça çevrim ömrü azalıyor	(Lu ve ark., 2019)
YAG/ Yb ₂ SiO ₅ / Yb ₂ Si ₂ O ₇ çok katmanlı	320 µm	442±10	1573 K'de; çok katmanlı yapıda yüksek çevrim ömrü	(Duan ve ark., 2024)
YSZ (gradyan kalınlık)	İnce kısım	37	1100 °C'de; kalın kısımda daha uzun ömür, ince kısımda erken delaminasyon	(Lee ve ark., 2017)

Termal şok testlerinin sonuçları ile ilgili tespitler şu şekildedir:

- Elde edilen test sonuçları, literatürde yer alan çevrim sayılarından çok düşüktür. Bu durumun en önemli nedeni altlık malzemesi olarak çelik kullanılmasıdır.
- Statik test sonuçlarını incelediğimizde, belirli bir kaplama kalınlığından sonra hasarların oluştuğu gözlemlenmektedir. Bu da kritik kaplama kalınlığı açısından belirgin bir ipucu vermektedir. 250-300 µm kalınlığında seramik tabakaya sahip bir kaplamanın ideal olduğu ortaya çıkmıştır.
- MC 02 kodlu numunenin dinamik testlerde gösterdiği üstün performans, önceden belirlenen beklentilerin oldukça üzerindedir. Bu performansın temel nedeni, test süresince ulaşılan azami yüzey sıcaklık değerinin 1235 °C ile hedeflenen sıcaklık eşiğinin altında kalması olarak değerlendirilmektedir. Numunenin daha düşük termal yüke maruz kalması, mikroyapısal bozulma ve hasar oluşumunu geciktirerek numunenin bütünlüğünü daha uzun süre korumasını sağlamış olabilir. Bununla birlikte, statik testlerde elde edilen sonuçlar başlangıçtaki öngörülerle uyumludur. Bu durum, numune üretim sürecindeki kaynak işleminde bir kusurun varlığına işaret etmektedir. Bu kusur, iç soğutma havasının kaplama yüzeyine doğru kontrolsüz bir şekilde sızmasına yol açmış ve bu sızıntı, "film soğutma" etkisi oluşturduğu görülmüştür. Bu etki, numunenin beklenenden daha iyi bir termal kararlılık sergilemesine katkıda bulunduğu anlaşılmıştır. Yapılan imalat hatasının etkisi gaz türbin kanatlarının soğutulmasında kullanılan film soğutmanın etkisinin ne düzeyde olduğunu beklenmedik şekilde göstermiştir.



Şekil 7.1. MC02 Kodlu Numune Üzerindeki Hatalı Kaynak Detayı.

- MC 04 kodlu numunenin, yüksek kaplama kalınlığına sahip olması nedeniyle daha üstün bir performans sergilemesi beklenirken, dinamik test sonuçları bu beklentilerin altında kalmış ve hedeflenen çevrim sayılarına ulaşamamıştır. Bu durum, test süresince ulaşılan azami yüzey sıcaklık değeri olan 1368 °C'nin, öngörülen 1250 °C sıcaklık sınırını yaklaşık 100 °C aşmasıyla doğrudan ilişkili olduğunu göstermiştir. Anlık yüksek sıcaklık maruziyeti, numune üzerinde termal stresin artmasına ve dolayısıyla beklenenden daha kısa sürede hasar oluşumuna yol açmış olabilir. Bu durum kaplama kalınlığının tek başına yeterli bir koruma sağlamadığını, kritik sıcaklık eşiklerinin aşılmasının performansı önemli ölçüde düşürebileceğini göstermektedir.
- Dinamik test sonuçları, statik olarak gerçekleştirilen testlere kıyasla belirgin derecede daha düşük çevrim sayılarına ulaşıldığını net bir şekilde ortaya koymuştur. Bu bulgu, hareketli olarak gerçekleştirilen testlerdeki radyal yöndeki mekanik etkilerin, hasar mekanizmalarını statik koşullara göre çok daha erken tetiklediğini ve numunenin bütünlüğünü daha hızlı bir şekilde kaybetmesine neden olduğunu düşündürmektedir. Özellikle yüksek hızlı dönme ve titreşim gibi radyal kuvvetler, malzeme yorulmasını hızlandırarak çatlak başlangıcını ve ilerlemesini teşvik edebilir. Bu analiz, dinamik yüklemeye koşullarının malzeme yorulması ve yapısal bütünlük üzerindeki kritik etkisini vurgulayarak, tasarım ve test süreçlerinde radyal etkilerin daha fazla dikkate alınması gerektiğini işaret etmektedir.

Yukarıda sunulan tespitler ışığında, test metodolojisinin doğruluğunu artırmak ve gerçek operasyonel koşullarına daha uygun veriler elde etmek amacıyla aşağıdaki tavsiye edilen çalışmaların yapılmasının faydalı olacaktır:

1. Testlerin doğruluk payını artırmak adına, altlık malzemesi olarak havacılık ve enerji sektöründe kullanılan nikel bazlı süperalaşımalar veya titanyum alaşımları tercih edilmelidir. Bu malzemeler, türbin kanatları gibi kritik bileşenlerde karşılaşılan yüksek sıcaklık, yüksek gerilim ve korozyon ortamlarına özgü davranışları daha doğru bir şekilde yansıtmaktadır. Ayrıca, numune hazırlık süreçlerinde kaynak kusurlarının tespiti ve önlenmesi için ileri tahribatsız muayene (NDT) yöntemleri (örneğin, ultrasonik muayene veya X-ışını tomografisi) rutin olarak uygulanmalıdır. Bu, test sonuçlarının sadece malzeme performansını değil, aynı zamanda üretim kalitesini de doğru bir

şekilde yansıtmasını sağlayacaktır. Numune yüzey pürüzlülüğü ve geometrik hassasiyetin kontrolü de tekrarlanabilirliği artırmak için kritik öneme sahiptir.

2. Mevcut test düzeneğindeki sınırlamaları aşmak ve gerçek operasyonel koşullara daha yakın bir radyal etki deneyimi elde etmek için daha yüksek devir sayısına sahip bir motor entegre edilmesi şarttır. Bu motor, numuneler üzerindeki merkezkaç kuvvetlerini ve titreşim frekanslarını artırarak, döner ekipmanlarda karşılaşılan dinamik yüklere daha uygun bir simülasyon sağlayacaktır. Ayrıca, düzenekte radyal ve eksenel yükleme kapasitesini artıran aktüatör sistemleri entegre edilerek, çok eksenli gerilmelerin ve yorulma etkileşimlerinin daha doğru bir şekilde modellenmesi sağlanabilir. Yüksek hızlı kamera sistemleri ve yerinde gerinim ölçerler gibi gelişmiş izleme ekipmanları, dinamik testler sırasında hasar başlangıcı ve ilerlemesi mekanizmalarını anlık olarak gözlemlemek ve belgelemek için kullanılmalıdır. Bu detaylı veri toplama, malzeme davranışının daha derinlemesine anlaşılmasına olanak tanıyacaktır.

KAYNAKLAR

- Aabid, A., & Khan, S. A. (2018). Optimization of Heat Transfer on Thermal Barrier Coated Gas Turbine Blade. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 370, 12022. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/370/1/012022>
- Ahmadi, M. S., Shoja-Razavi, R., Valefi, Z., & Jamali, H. (2019). The effect of laser surface treatment on the thermal shock behavior of plasma sprayed Al₂O₃/YSZ multilayer thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2019.03.024>
- Ashofteh, A., Mashhadi, M., & Amadeh, A. (2018). Thermal shock behavior of multilayer and functionally graded micro- and nano-structured topcoat APS TBCs. *Ceramics International*, 44, 1951-1963. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2017.10.138>
- Begum, F., Reddy, V. V. R., & Ramanjaneyulu, S. (2017). Design and thermal analysis of cooling of Gas turbine blade through radial holes. *Materials Today: Proceedings*, 4(8), 7714-7722. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.07.106>
- Bolcavage, A., Feuerstein, A., Foster, J., & Moore, P. (2004). Thermal shock testing of thermal barrier coating/bondcoat systems. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 13(4), 389-397. <https://doi.org/10.1361/10599490419883>
- Bolot, R., Antou, G., Montavon, G., & Coddet, C. (2005). A Two-Dimensional Heat Transfer Model for Thermal Barrier Coating Average Thermal Conductivity Computation. *Numerical Heat Transfer, Part A: Applications*, 47(9), 875-898. <https://doi.org/10.1080/10407780590921953>
- Boyd, T. J. M., & Sanderson, J. J. (2003). The Physics of Plasmas. *Çininde The Physics of Plasmas*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511755750>
- Brereton, R. G. (2015). The chi squared and multinormal distributions. *Journal of Chemometrics*, 29(1), 9-12. <https://doi.org/10.1002/cem.2680>
- Cao, J., Gao, K., Cao, X., & Jiang, B. (2020). Thermal shock behavior of a 8YSZ/CoCrAlYTaSi thermal sprayed barrier coating on GH202 superalloy. *Ceramics International*, 46, 7489-7498. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.11.247>
- Cevher, Ö. (2014). *Lityum iyon piller için fiziksel buhar biriktirme yöntemi ile metaloksit-karbon kompozit anotların geliştirilmesi* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.
- Ceylan, V., Özgür, A. E., & Yazar, S. (2021). Süperkritik Brayton Çevriminin Termodinamik Analizi. *The Journal of Graduate School of Natural and Applied Sciences of Mehmet Akif Ersoy University*, 12, 500-509. <https://doi.org/10.29048/makufebd.1008178>

- Chan, K. S., Enright, M. P., & Moody, J. P. (2014). Development of a probabilistic methodology for predicting hot corrosion fatigue crack growth life of gas turbine engine disks. *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, *136*(2). <https://doi.org/10.1115/1.4025555/373502>
- Chang, S. Y., & Oh, K. (2019). Contribution of High Mechanical Fatigue to Gas Turbine Blade Lifetime during Steady-State Operation. *Coatings*. <https://doi.org/10.3390/COATINGS9040229>
- Charniago, R., Zhou, F., & Hongying, D. (2013). Contaminated Chi-Square Modeling and Large-Scale ANOVA Testing. *Journal of Biometrics & Biostatistics*, *4*(1), 1-7. <https://doi.org/10.4172/2155-6180.1000157>
- Chen, D., Dambra, C., & Dorfman, M. (2020). Process and properties of dense and porous vertically-cracked yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, *404*(September), 126467. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.126467>
- Child, D. J., Meldrum, J., & Onwuarolu, P. (2017). Corrosion-fatigue testing of Ni-based superalloy RR1000. *Materials Science and Technology (United Kingdom)*, *33*(9), 1040-1047. https://doi.org/10.1080/02670836.2016.1242827/ASSET/IMAGES/LARGE/10.1080_02670836.2016.1242827-FIG9.JPEG
- Clarke, D. R., Oechsner, M., & Padture, N. P. (2012). Thermal-barrier coatings for more efficient gas-turbine engines. *MRS Bulletin*, *37*(10), 891-898. <https://doi.org/10.1557/mrs.2012.232>
- Clarke, D. R., & Phillpot, S. R. (2005). *Thermal barrier coating materials*.
- Cowles, B. (1996). High cycle fatigue in aircraft gas turbines—An industry perspective. *International Journal of Fracture*, *80*, 147-163. <https://doi.org/10.1007/BF00012667>
- Diltemiz, S. F. (2010). *Plazma Sprey Termal Bariyer Kaplamaların Isıl ve Mekanik Özelliklerinin Optimizasyonu* [Doktora Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Duan, Z., Deng, L., Lü, K., Dong, S., Xie, Y., Luo, Z., Jiang, J., Chen, W., & Cao, X. (2024). Thermal cycle and water oxygen performance of multi-layered Y3Al5O12/Yb2SiO5/Yb2Si2O7 thermal/environmental barrier coatings. *Ceramics International*, *50*(9, Part B), 16309-16317. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2024.02.112>
- Ebrahimi, H., & Nakhodchi, S. (2017). Thermal fatigue testing and simulation of an APS TBC system in presence of a constant bending load. *International Journal of Fatigue*, *96*, 1-9. <https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2016.11.008>
- El-jumma, A. M. (2014). *Impingement and Impingement / Effusion Cooling of Gas Turbine Components: Conjugate Heat Transfer Predictions By* [Doktora Tezi]. The University of Leeds.
- Fathyunes, L., & Mohtadi-Bonab, M. (2023). A Review on the Corrosion and Fatigue Failure of Gas Turbines. *Metals*. <https://doi.org/10.3390/met13040701>

- Feng, Y., Dong, T. shun, Li, G. lu, Wang, R., Ma, G. zheng, Zhao, X. wei, & Liu, Q. (2020). The roles of stress in the thermal shock failure of YSZ TBCs before and after laser remelting. *Journal of Alloys and Compounds*, 828, 154417. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2020.154417>
- Feng, Y., Dong, T.-S., Fu, B., Li, G.-L., Liu, Q., & Wang, R. (2020). Thermal shock resistance of double-layer thermal barrier coatings. *Journal of Materials Research*, 35, 2808-2816. <https://doi.org/10.1557/JMR.2020.228>
- Fleck, N. A., Cocks, A. C. F., & Lampenscherf, S. (2014). Thermal shock resistance of air plasma sprayed thermal barrier coatings. *Journal of the European Ceramic Society*, 34(11), 2687-2694. <https://doi.org/10.1016/J.JEURCERAMSOC.2014.01.002>
- Giolli, C., Scrivani, A., Rizzi, G., Borgioli, F., Bolelli, G., & Lusvardi, L. (2008). Failure Mechanism for Thermal Fatigue of Thermal Barrier Coating Systems. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18, 223-230. <https://doi.org/10.1007/S11666-009-9307-4>
- Han, J. C., Zhang, Y. M., & Lee, C. P. (1991). Augmented Heat Transfer in Square Channels With Parallel, Crossed, and V-Shaped Angled Ribs. *Journal of Heat Transfer*, 113(3), 590-596. <https://doi.org/10.1115/1.2910606>
- Hejwowski, T. (2010). Comparative study of thermal barrier coatings for internal combustion engine. *Vacuum*, 85, 610-616. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2010.08.020>
- Heywood, J. B. (1988). *Internal Combustion Engine Fundamentals*. Tata McGraw-Hill Edition.
- Holman, J. P. (2012). *Experimental methods for engineers* (8. ed). McGraw-Hill.
- Hou, J., Wicks, B. J., & Antoniou, R. (2002). An investigation of fatigue failures of turbine blades in a gas turbine engine by mechanical analysis. *Engineering Failure Analysis*, 9, 201-211. [https://doi.org/10.1016/S1350-6307\(01\)00005-X](https://doi.org/10.1016/S1350-6307(01)00005-X)
- Jamali, H., Mozafarinia, R., Razavi, R., & Ahmadi-Pidani, R. (2012). Comparison of thermal shock resistances of plasma-sprayed nanostructured and conventional yttria stabilized zirconia thermal barrier coatings. *Ceramics International*, 38, 6705-6712. <https://doi.org/10.1016/J.CERAMINT.2012.05.060>
- Kaewchoothong, N., Maliwan, K., Takeishi, K., & Nuntadusit, C. (2017). Effect of inclined ribs on heat transfer coefficient in stationary square channel. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 7(6), 344-350. <https://doi.org/10.1016/j.taml.2017.09.013>
- Kim, M., Shin, D. H., Kim, J. S., Lee, B. J., & Lee, J. (2021). Experimental investigation of effusion and transpiration air cooling for single turbine blade. *Applied Thermal Engineering*, 182(July 2020), 116156. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116156>
- Kini, C. R., Yagnesh Sharma, N., & Satish Shenoy, B. (2016). Thermo-structural investigation of gas turbine blade provided with helicoidal passages. *Indian Journal of Science and Technology*, 9(20). <https://doi.org/10.17485/ijst/2016/v9i20/88245>

- Kislov, O., Ambrozhevich, M., & Shevchenko, M. (2021). Development of a method to improve the calculation accuracy of specific fuel consumption for performance modeling of air-breathing engines. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2(8 (110)), 23-30. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.229515>
- Koçak, T. B. (2019). *Jet Çarptırma ile Gaz Türbinli Motorların Soğutulması* [Yüksek Lisans Tezi]. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi.
- Koolloos, M. F. J., & Houben, J. M. (2000). Behavior of plasma-sprayed thermal barrier coatings during thermal cycling and the effect of a preoxidized NiCrAlY bond coat. *Journal of Thermal Spray Technology*, 9(1), 49-58. <https://doi.org/10.1361/105996300770350050/METRICS>
- Krivina, L. A., Tarasenko, Y. P., Levanov, Y. K., & Kirikov, S. V. (2020). Gas-dynamic spraying, as a method of the component recovery in the power engineering industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 971, 052026. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/971/5/052026>
- Kromer, R., Mauget, F., Després, L., Costil, S., & Cormier, J. (2019). Thermo-mechanical fatigue evaluation of a thermal barrier coating bond-coatless system. *Materials Science and Engineering: A*. <https://doi.org/10.1016/J.MSEA.2019.04.020>
- Kulacki, F. A. (2017). Handbook of Thermal Science and Engineering. İçinde *Springer Cham*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-32003-8>
- Lancaster, H. O., & Seneta, E. (2005). Chi-Square Distribution. İçinde *Encyclopedia of Biostatistics*. John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/0470011815.b2a15018>
- Lau, S. C., Kukreja, R. T., & Mcmillin, R. D. (1991). Effects of V-shaped rib arrays on turbulent heat transfer and friction of fully developed flow in a square channel. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 34(7), 1605-1616. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(91\)90140-A](https://doi.org/10.1016/0017-9310(91)90140-A)
- Lee, D., Kang, N., Lee, K.-S., Moon, H., Kim, H., & Kim, C. (2017). Evaluation of Thermal Durability of Thermal Barrier Coating and Change in Mechanical Behavior. *Journal of The Korean Ceramic Society*, 54, 314-322. <https://doi.org/10.4191/KCERS.2017.54.4.05>
- Leishman, J. G. (2023). Introduction to Aerospace Flight Vehicles. İçinde *Introduction to Aerospace Flight Vehicles*. Embry-Riddle Aeronautical University. <https://doi.org/10.15394/EAGLEPUB.2022.1066>
- Lu, F., Huang, W., & Liu, H. (2019). Mechanical Properties and Thermal Shock Resistance of 8YSZ-Al₂O₃ Composite Coatings with Different Thicknesses. *Journal of Thermal Spray Technology*, 28(8), 1893-1905. <https://doi.org/10.1007/s11666-019-00946-1>
- Mannava, V., Swaminathan, A. V., Kamaraj, M., & Kottada, R. S. (2016). An innovative spraying setup to obtain uniform salt(s) mixture deposition to investigate hot corrosion. *Review of Scientific Instruments*, 87(2). <https://doi.org/10.1063/1.4941779/1021961>

- Mattox, D. M. (2010). The “Good” Vacuum (Low Pressure) Processing Environment. İçinde *Handbook of Physical Vapor Deposition (PVD) Processing*. William Andrew Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-8155-2037-5.00003-4>
- Miller, R. A. (1997). Thermal barrier coatings for aircraft engines: History and directions. *Journal of Thermal Spray Technology*, 6(1), 35-42. <https://doi.org/10.1007/BF02646310>
- Naik, S. (2017). Basic Aspects of Gas Turbine Heat Transfer. İçinde *Heat Exchangers—Design, Experiment and Simulation*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/67323>
- Nayak, H., K r, V., M. k, V., Shamkuwar, S., Suresh Kumar, R., T a, S., Malge, A., M, V., & Prasad, C. D. (2024). Thermal cycle behaviour of plasma sprayed thermal barrier coatings on cast iron substrate for the application of liner of internal combustion engine. *Results in Surfaces and Interfaces*, 17, 100297. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2024.100297>
- Nicholas, T. (1999). Critical issues in high cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 21, 221-231. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(99\)00074-2](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(99)00074-2)
- Nieto, A., Agrawal, R., Bravo, L., Hofmeister-Mock, C., Pepi, M., & Ghoshal, A. (2021). Calcia–magnesia–alumina–silicate (CMAS) attack mechanisms and roadmap towards Sandphobic thermal and environmental barrier coatings. *International Materials Reviews*, 66(7), 451-492. <https://doi.org/10.1080/09506608.2020.1824414>
- Özgürlük, Y. (2016). *Soğuk Gaz Dinamik Sprey (CGDS) Kaplama Yöntemiyle Üretilen Termal Bariyer Kaplamaların (TBC) Sıcak Korozyon Davranışlarının İncelenmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. Bartın Üniversitesi.
- Pasandideh-Fard, M., Pershin, V., Chandra, S., & Mostaghimi, J. (2002). Splat shapes in a thermal spray coating process: Simulations and experiments. *Journal of Thermal Spray Technology*, 11(2), 206-217. <https://doi.org/10.1361/105996302770348862/METRICS>
- Pawłowski, L. (2008). The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition. İçinde *The Science and Engineering of Thermal Spray Coatings: Second Edition*. <https://doi.org/10.1002/9780470754085>
- Poettgen, B. K. (2020). *Experimental Methods for Studying Mixing and Heat Transfer Characteristics of Effusion Jets in a Vitiated Crossflow* [Yüksek Lisans Tezi]. University of Connecticut.
- Portinha, A., Teixeira, V., Carneiro, J., Martins, J., Costa, M. F., Vassen, R., & Stoeber, D. (2005). Characterization of thermal barrier coatings with a gradient in porosity. *Surface and Coatings Technology*, 195(2-3), 245-251. <https://doi.org/10.1016/J.SURFCOAT.2004.07.094>
- Royce, R. (1996). The Jet Engine. İçinde *Wiley*. <https://doi.org/10.1038/d41586-019-03077-3>
- Salehnasab, B., & Poursaeidi, E. (2020). Mechanism and modeling of fatigue crack initiation and propagation in the directionally solidified CM186 LC blade of a gas turbine engine. *Engineering Fracture Mechanics*, 225, 106842. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2019.106842>

- Sarikaya, O., Islamoglu, Y., & Celik, E. (2005). Finite element modeling of the effect of the ceramic coatings on heat transfer characteristics in thermal barrier applications. *Materials and Design*, 26(4), 357-362. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2004.06.020>
- Savrun, F. S. (2023). *Gaz türbinli motorlarda döner disk ön tasarımında optimum boyutlandırma aracının geliştirilmesi* [Yüksek Lisans Tezi]. İstanbul Teknik Üniversitesi.
- Scrivani, A., Rizzi, G., Bardi, U., Giolli, C., Miranda, M. M., Ciattini, S., Fossati, A., & Borgioli, F. (2007). Thermal Fatigue Behavior of Thick and Porous Thermal Barrier Coatings Systems. *Journal of Thermal Spray Technology*, 16, 816-821. <https://doi.org/10.1007/S11666-007-9128-2>
- Shanmugam, E., & Prakash, R. (2019). The Effect of Creep-Fatigue Interactions on Thermo-Mechanical Fatigue Life and Reliability Estimates for a Typical Gas Turbine Engine Component. *Volume 12: Advanced Materials: Design, Processing, Characterization, and Applications*. <https://doi.org/10.1115/imece2019-11174>
- Tanda, G., & Satta, F. (2021). Heat transfer and friction in a high aspect ratio rectangular channel with angled and intersecting ribs. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 169, 120906. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.120906>
- Taylor, C. F. (2020). Internal Combustion Engine in Theory and Practice. İçinde *Internal Combustion Engine in Theory and Practice*. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3851.001.0001>
- Tracton, A. A. (2007). Coatings Technology Fundamentals, Testing, And Processing Techniques. İçinde *Technology*. <https://www.routledge.com/Coatings-Technology-Fundamentals-Testing-and-Processing-Techniques/Tracton/p/book/9781420044065>
- Ünver, Ü. (2010). *Turbo Makinalar Ders Notu*.
- Walsh, P. P., & Fletcher, P. (2004). Gas Turbine Performance. İçinde *Wiley*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9780470774533>
- Wang, Y., Shi, Y., Cai, M., & Xu, W. (2020). Predictive control of air-fuel ratio in aircraft engine on fuel-powered unmanned aerial vehicle using fuzzy-RBF neural network. *Journal of the Franklin Institute*, 357(13), 8342-8363. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2020.03.016>
- Wesling, K. F., Socie, D., & Beardsley, B. (1994). Fatigue of Thick Thermal Barrier Coatings. *Journal of the American Ceramic Society*, 77, 1863-1868. <https://doi.org/10.1111/J.1151-2916.1994.TB07063.X>
- Wu, M., Liu, Y., Qu, W., Guo, W., Zhang, H., Pei, Y., Li, S., & Gong, S. (2023). Thickness-related failure behaviors of the thermal barrier coatings under thermal gradient cycling. *Surface and Coatings Technology*, 468, 129748. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129748>
- Yalçınkaya, O. (2024). *Çarpmalı jet ve rib kullanımının kanal yüzeyindeki soğutma performansına etkilerinin araştırılması* [Doktora Tezi]. Sakarya Üniversitesi.

- Yalçinkaya, O., Özel, M. B., Durmaz, U., & Uysal, Ü. (2024). Experimental heat transfer analysis of conical pin configurations in jet impingement cooling with elongated nozzle holes. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 164, 105709. <https://doi.org/10.1016/J.JTICE.2024.105709>
- Yuan, K., Yu, Y., & Wen, J. (2017). A study on the thermal cyclic behavior of thermal barrier coatings with different MCrAlY roughness. *Vacuum*, 137, 72-80. <https://doi.org/10.1016/J.VACUUM.2016.12.033>
- Zhou, Y., & Hashida, T. (2002a). Thermal fatigue failure induced by delamination in thermal barrier coating. *International Journal of Fatigue*, 24, 407-417. [https://doi.org/10.1016/S0142-1123\(01\)00096-2](https://doi.org/10.1016/S0142-1123(01)00096-2)
- Zhou, Y., & Hashida, T. (2002b). Thermal Fatigue in Thermal Barrier Coating. *Jsm International Journal Series A-solid Mechanics and Material Engineering*, 45, 57-64. <https://doi.org/10.1299/JSMEA.45.57>
- Zhu, H., Dai, S., Zhang, X., Chen, J., Luo, M., & Huang, W. (2023). An Online Fatigue Damage Evaluation Method for Gas Turbine Hot Components. *Energies*. <https://doi.org/10.3390/en16196785>
- Zhu, W., Wang, J. W., Yang, L., Zhou, Y. C., Wei, Y. G., & Wu, R. T. (2017). Modeling and simulation of the temperature and stress fields in a 3D turbine blade coated with thermal barrier coatings. *Surface and Coatings Technology*, 315, 443-453. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2017.03.012>
- Ziaei-Asl, A., & Ramezanlou, M. T. (2019). Thermo-mechanical behavior of gas turbine blade equipped with cooling ducts and protective coating with different thicknesses. *International Journal of Mechanical Sciences*, 150(October 2018), 656-664. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.10.070>



EKLER

EK A. ESP32 Üzerine Yazılan Kod



EK A

```
#include <WiFi.h>
const char* ssid      = "Cihan"; // WiFi SSID
const char* password = "1234567890"; // WiFi password

#include <AsyncTCP.h>
#include <ESPAsyncWebSrv.h>

// Kullanacak pinler
#define PROPANE_RELAY_PIN 12
#define OXYGEN_RELAY_PIN 14
#define FRONT_AIR_RELAY_PIN 27
#define BACK_AIR_RELAY_PIN 26
#define IGNITION_FIRE_RELAY_PIN 15
#define DISKMOTOR_START_RELAY_PIN 21

AsyncWebServer server(80);

void setup() {

  // serial port baslat
  Serial.begin(115200);

  // Röle pinlerini çıkış olarak ayarlama
  pinMode(PROPANE_RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(OXYGEN_RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(FRONT_AIR_RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(BACK_AIR_RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(IGNITION_FIRE_RELAY_PIN, OUTPUT);
  pinMode(DISKMOTOR_START_RELAY_PIN, OUTPUT);

  // Röleleri ve motoru varsayılan olarak kapatma
  digitalWrite(PROPANE_RELAY_PIN, LOW);
  digitalWrite(OXYGEN_RELAY_PIN, LOW);
  digitalWrite(FRONT_AIR_RELAY_PIN, LOW);
  digitalWrite(BACK_AIR_RELAY_PIN, LOW);
  digitalWrite(IGNITION_FIRE_RELAY_PIN, LOW);
  digitalWrite(DISKMOTOR_START_RELAY_PIN, LOW);
  WiFi.mode(WIFI_STA);
  WiFi.begin(ssid, password);
  if (WiFi.waitForConnectResult() != WL_CONNECTED) {
    Serial.printf("WiFi Failed!\n");
    return;
  }

  Serial.print("IP Address: ");
  Serial.println(WiFi.localIP());

  // Web sunucusunu başlatma
  startWebServer();
}

void loop() {

}

void startWebServer() {
  server.on("/", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request) {
    request->send(200, "text/html", "Murat Cihan Caliskan - Dinamik Termal Sok
Duzenegi Sistemine Hos Geldiniz");
  });
};
```

Şekil A.1. ESP32 Üzerine Yazılan Kod

```

// Propan rölesini kontrol etmek için endpoint
server.on("/12/1", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    activatePropane();
    request->send(200, "text/plain", "Propan rolesi acildi");
}]);

server.on("/12/0", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    deactivatePropane();
    request->send(200, "text/plain", "Propan rolesi kapandi");
}]);

// Oksijen rölesini kontrol etmek için endpoint
server.on("/14/1", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    activateOxygen();
    request->send(200, "text/plain", "Oksijen rolesi acildi");
}]);

server.on("/14/0", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    deactivateOxygen();
    request->send(200, "text/plain", "Oksijen rolesi kapandi");
}]);

// Ön hava rölesini kontrol etmek için endpoint
server.on("/27/1", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    activatefrontair();
    request->send(200, "text/plain", "On Hava rolesi acildi");
}]);

server.on("/27/0", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    deactivatefrontair();
    request->send(200, "text/plain", "On Hava rolesi kapandi");
}]);

// Arka hava rölesini kontrol etmek için endpoint
server.on("/26/1", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    activatebackair();
    request->send(200, "text/plain", "Arka Hava rolesi acildi");
}]);

server.on("/26/0", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    deactivatebackair();
    request->send(200, "text/plain", "Arka Hava rolesi kapandi");
}]);

// Çakmak ateşleme rölesini kontrol etmek için endpoint
server.on("/15/1", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    activateIgnitionFire();
    request->send(200, "text/plain", "Cakmak atesledi");
}]);

server.on("/15/0", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    deactivateIgnitionFire();
    request->send(200, "text/plain", "Cakmak sondu");
}]);

//Diskin bagli oldugu motoru dondurmek icin endpoint
server.on("/34/1", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    diskmotorstart();
    request->send(200, "text/plain", "Motor Donmeye Basladi");
}]);

server.on("/34/0", HTTP_GET, [(AsyncWebServerRequest *request) {
    diskmotorstop();
    request->send(200, "text/plain", "Motor Durdu");
}]);

```

Şekil A.2.(devamı) ESP32 Üzerine Yazılan Kod

```

//acil durdurma
server.on("/estop", HTTP_GET, [](AsyncWebServerRequest *request){
deactivateIgnitionFire();
deactivatePropane();
delay(1000); // 1000 milisaniye bekletme
deactivateOxygen();
request->send(200, "text/plain", "!!!Acil Durdurma!!!");
});

server.begin();
}

// Röleleri aktif etmek ve deaktif etmek için fonksiyonlar
void activatePropane() {
digitalWrite(PROPANE_RELAY_PIN, HIGH);
}

void deactivatePropane() {
digitalWrite(PROPANE_RELAY_PIN, LOW);
}

void activateOxygen() {
digitalWrite(OXYGEN_RELAY_PIN, HIGH);
}

void deactivateOxygen() {
digitalWrite(OXYGEN_RELAY_PIN, LOW);
}

void activatefrontair() {
digitalWrite(FRONT_AIR_RELAY_PIN, HIGH);
}

void deactivatefrontair() {
digitalWrite(FRONT_AIR_RELAY_PIN, LOW);
}

void activatebackair() {
digitalWrite(BACK_AIR_RELAY_PIN, HIGH);
}

void deactivatebackair() {
digitalWrite(BACK_AIR_RELAY_PIN, LOW);
}

void activateIgnitionFire() {
digitalWrite(IGNITION_FIRE_RELAY_PIN, HIGH);
}

void deactivateIgnitionFire() {
digitalWrite(IGNITION_FIRE_RELAY_PIN, LOW);
}

void diskmotorstart() {
digitalWrite(DISKMOTOR_START_RELAY_PIN, HIGH);
}

void diskmotorstop() {
digitalWrite(DISKMOTOR_START_RELAY_PIN, LOW);
}

```

Şekil A.3.(devamı) ESP32 Üzerine Yazılan Kod

ÖZGEÇMİŞ

Ad-Soyad : Murat Cihan ÇALIŞKAN

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2011, Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2013, Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Enerji

MESLEKİ DENEYİM:

- 2011-2012 yılları arasında özel bir firmada yetkili mühendis olarak çalıştı.
- 2012 yılında Sakarya Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği bölümünde Uzman/Öğretim Görevlisi olarak göreve başlamış ve halen devam etmektedir.

TEZDEN TÜRETİLEN ESERLER:

- 1) M. C. ÇALIŞKAN, Ü. Uysal ve F. Üstel, Dynamic thermal shock approach to YSZ coated materials for thermal barrier. Continuum Mech. Thermodyn. 37, 64 (2025). <https://doi.org/10.1007/s00161-025-01393-w>.
- 2) M. C. ÇALIŞKAN ve Ü. Uysal, Termal Bariyer Amaçlı YSZ Kaplamaların Termal Şok Davranışlarının Dinamik Olarak İncelenmesi, 6. Uluslararası Uludağ Bilimsel Araştırmalar Kongresi, 2025.

DİĞER ESERLER:

1. BAL vd., “Determining the minimum required number of throws for knot security indifferent diameters of polypropylene sutures an in-vitro study,” *Kocaeli Med J*, vol. 8, no. 1, pp. 35–39, Jan. 2019.
2. M. C. ÇALIŞKAN, “Termal Bariyer Kaplamalarda Korozyon Davranışının Kalınlığa Bağlı Olarak Değişimi”, The 2nd International Conference on Innovative Academic Studies, Konya, 2023.

3. M. C. ÇALIŞKAN, Ü. UYSAL, N. SÖZBİR, M. GOMES, ve M. GOMEZ-FLORIT, “Sürücü Koltuğu Simülatörü Mekanik ve Tahrik Sistemi Tasarımı ve Tahrik Sistemlerinin Ekonomik Karşılaştırılması”, MKT-2014 Proje Tabanlı Mekatronik Eğitimi Çalıştayı , 2014.
4. M. C. ÇALIŞKAN ve Ü. UYSAL, “Sürücü Koltuğu Simülatörü Tasarımı ve Sistem Bileşenlerinin Ekonomik Karşılaştırılması”, 1. Uluslararası Mühendislik ve Bilimde İnovatif Teknolojiler Sempozyumu , 2013.
5. A. KİRAZ, M. C. ÇALIŞKAN, O. CANPOLAT, ve E. F. ERKAN, “Modelling Stress Concentration Factor with Using Artificial Neural Networks”, The 4th International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering (ICCESEN 2017), Antalya, 2017.
6. F. E. BAŞTAN, A. KARABULUT, G. ERDOĞAN, M. C. ÇALIŞKAN, ve F. ÜSTEL, “Comparison of plasma spraying hollow and solid spherical hydroxyapatite particles”, The International Thermal Spray Conference & Exposition (ITSC 2014) , 2014.
7. M. C. ÇALIŞKAN, F. ÜSTEL, ve G. ERDOĞAN, “Characterization and Investigation of Abrasion Resistance of HVOF Sprayed CoCrW Based Powder”, The 4th International Conference On Computational and Experimental Science And Engineering(ICCESEN-2017), Antalya, 2017.