

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATMOSFERİK PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ %6 – 8 YSZ  
TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN POROZİTESİNİN  
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Utku Orçun GEZİCİ**

**Metlaurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Malzeme Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İ. Yılmaz TAPTIK**

**HAZİRAN 2017**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**ATMOSFERİK PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ %6 – 8 YSZ  
TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN POROZİTESİNİN  
YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Utku Orçun GEZİCİ  
(506141426)**

**Metlaurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı**

**Malzeme Mühendisliği Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. İ. Yılmaz TAPTIK**

**HAZİRAN 2017**



İTÜ, Fen Bilimleri Enstitüsü'nün ..... numaralı Yüksek Lisans / Doktora Öğrencisi Adı SOYADI, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "TEZ BAŞLIĞI" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

**Tez Danışmanı :** **Prof. Dr. İ. Yılmaz TAPTIK** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Jüri Üyeleri :** **Prof. Dr. Servet Timur** .....  
İstanbul Teknik Üniversitesi

**Prof. Dr. Gökhan Orhan** .....  
İstanbul Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : **5 Mayıs 2017**  
**Savunma Tarihi** : **7 Haziran 2017**



*Babama,*

## ÖNSÖZ

Lisans eğitimimden bu yana gerek kişiliği gerek bilgi birikimiyle beni etkileyen, öğrencisi olmaktan gurur duyduğum sayın danışman hocam Prof. Dr. Yılmaz TAPTIK'a;

Bana olan desteği ve güveniyle sorumluluk almamı sağlayan, kendimi geliştirmem için beni zorlayan ve bunu söylemekten çekinmeyen değerli ablam Uzm. Yük. Müh. Ayşe KILIÇ'a;

Karakterizasyon çalışmalarında desteğini esirgemeyen sayın hocalarım Prof. Dr. Mustafa ÜRGEN ve Prof. Dr. Gültekin GÖLLER'e;

Çalışmalara başladığım andan itibaren özellikle termal bariyer kaplamalar konusundaki bilgisini benden esirgemeyip sorularıma sabırla cevap veren Yrd. Doç. Dr. Muhammet KARABAŞ'a;

Hem lisans hem de yüksek lisans hayatımda içtenliği ve paylaşımcılığıyla sevgi ve saygımı kazanan gerektiğinde kendi zamanından ayırıp, beni modelleme ve simülasyon konusunda cesaretlendiren kankam Araş. Gör. Şerzat SAFALTIN'a; Karakterizasyon çalışmalarında yardımını ve zamanını esirgemeyen aynı laboratuvarda çalıştığım Araş. Gör. Fatih KIRBIYIK'a; aynı çalışma odasını paylaştığım tecrübe ve bilgilerini paylaşmaktan hiçbir zaman çekince duymayan değerli çalışma arkadaşlarım Araş. Gör. Burcu APAK ve Dr. Meral Cengiz'e;

Gerek fikir gerek hayallerimi paylaştığım, varlığı gülümsememe neden olan bu tezin yazımı sırasında vatani görevini yerine getiren sevgili dostum Burhan ÖZEN'e;

Hazırlık sınıfından beri arkadaşım, destekçim, neşe kaynağım, dert ve hayat ortağım, müstakbel eşim, Dilara ÇOBAN'a;

Varlığı bana güç veren, güvenini her an hissettiğim, en zor günlerimin destekçisi annem, Ayşe GEZİCİ'ye;

Benim için en önemlisi; hayattaki duruşumu belirleyen, varlığımı ve kişiliğimi borçlu olduğum, bana hayat hakkında bildiğim her şeyi öğreten, daha öğretecek çok şeyi varken aramızdan erken ayrılan, babam Sebahattin GEZİCİ'ye

Teşekkür ederim.

Mayıs 2017

Utku Orçun Gezici  
(Metalurji ve Malzeme Mühendisi)





## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	v
İÇİNDEKİLER .....	vii
KISALTMALAR .....	ix
SEMBOLLER .....	x
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xi
ŞEKİL LİSTESİ.....	xiii
ÖZET.....	xv
SUMMARY .....	xvii
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Tezin Amacı .....	2
1.2 Literatür Araştırması .....	2
1.2.1 Malzeme Biliminde Yapay Sinir Ağları Uygulamaları .....	3
1.2.1.1 Kuartz ve ısıtıl işlemin seramik kaplamaların korozyon özelliklerine etkisi .....	3
1.2.1.2 İnce filmler ve süper iletkenler .....	4
1.2.1.3 Kompozit malzemeler .....	4
1.2.1.4 Seramiker .....	4
1.2.1.5 Atmosferik plazma sprej yöntemi ile üretilmiş kaplamalarda YSA uygulamaları.....	4
1.2.2 TBK'lar için Sonlu Elemanlar Metodu ile yapılmış çalışmalar .....	5
1.3 Tezin Özgün Yönü ve Kapsamı .....	6
<b>2. GAZ TÜRBİNLERİ VE TERMAL BARIYER KAPLAMALAR .....</b>	<b>9</b>
2.1 Gaz Türbinleri .....	9
2.1.1 Gaz türbin bıçaklarında soğutma .....	10
2.1.1.1 Soğutma avantajları.....	11
2.1.1.2 Soğutma dezavantajları .....	12
2.1.1.3 Soğutma yöntemleri .....	12
2.1.1.4 Film soğutma yöntemi .....	13
2.2 Termal Bariyer Kaplamalar.....	17
2.2.1 Atmosferik plazma sprej yöntemi (APS) .....	19
2.2.1.1 Plazma püskürtme sistemi.....	22
2.2.1.2 Kaplama prosesi .....	23
2.2.2 Termal bariyer kaplama sistemi .....	24
2.2.2.1 Altlık .....	24
2.2.2.2 Bağlanma katmanı.....	25
2.2.2.3 Isıl etkiyle büyüyen oksit tabakası .....	26
2.2.2.4 Seramik katman.....	27
2.2.3 Termal bariyer kaplamalarda kullanılan malzemeler.....	28
2.2.3.1 Müllit.....	28
2.2.3.2 Alümina.....	28

2.2.3.3 Yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya (YSZ) .....	29
2.2.4 Termal bariyer kaplamalarda hasar oluşumu .....	30
2.2.4.1 Sıcak korozyon .....	31
2.2.4.2 CMAS hasarı .....	31
2.2.4.3 Termal çevrim – termal şok .....	31
<b>3. TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI.....</b>	<b>33</b>
3.1 Yapay Sinir Ağları.....	33
3.1.1 Yapay sinir ağı ana öğeleri.....	34
3.1.1.1 Girdiler .....	35
3.1.1.2 Ağırlıklar .....	35
3.1.1.3 Toplama fonksiyonu.....	36
3.1.1.4 Aktivasyon fonksiyonu .....	36
3.1.1.5 Çıktı.....	36
3.1.2 Yapay sinir ağlarında öğrenme .....	36
3.1.3 Yapay Sinir Ağı Modelleri ve Yapıları .....	37
3.1.3.1 Tek katmanlı sinir ağları – perceptron .....	37
3.1.3.2 Çok katmanlı yapay sinir ağları .....	38
3.1.3.3 İleri beslemeli ağlar .....	39
3.1.3.4 Geri beslemeli ağlar .....	39
3.1.4 Bir yapay sinir ağının oluşturulması .....	40
3.1.4.1 Yapay sinir ağları örnek kodu .....	41
3.1.4.2 Yapay sinir ağı oluşturmak için kullanılan programlar.....	43
Knime Programı .....	43
Matlab Programı.....	43
H <sub>2</sub> O Programı .....	44
3.2 Sonlu Elemanlar Metodu .....	45
<b>4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRMELER.....</b>	<b>47</b>
4.1 Deneyin Yapılışı .....	47
4.2 Deneylerde Kullanılan Malzemeler.....	48
4.2.1 Metalik altlık malzeme.....	48
4.2.2 Kaplama tozları .....	49
4.3 Bağlanma Katmanın Üretilmesi .....	50
4.4 Üst Katman için Kaplama Tasarımı ve Tozların Hazırlanması.....	51
4.5 Seramik Üst Katman Üretimi .....	51
4.6 Termal Bariyer Kaplamalara Uygulanan Testler ve Karakterizasyonlar .....	52
4.6.1 Pürüzlülük ölçümü .....	52
4.6.2 Mikroyapı karakterizasyonu.....	53
4.6.3 Yüksek sıcaklık korozyon testi .....	54
4.6.4 Porozite Analizi.....	56
4.6.5 X- ışını difraktometresi analizi.....	59
4.6.6 Sonlu elemanlar analizi .....	60
4.6.7 Yapay sinir ağları analizi.....	63
<b>5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....</b>	<b>67</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>69</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>75</b>

## KISALTMALAR

<b>AISI</b>	: Amerikan Demir ve Çelik Enstitüsü
<b>APS</b>	: Atmosferik Plazma Sprey
<b>EB-PVD</b>	: Elektron Işın Fiziksel Buhar Biriktirme
<b>HVOF</b>	: Yüksek Hızlı Oksijen Yakıtlı
<b>SEM</b>	: Taramalı Elektron Mikroskobu
<b>TBK</b>	: Termal Bariyer Kaplama
<b>VPS</b>	: Vakum Plazma Sprey
<b>XRD</b>	: X-Işını Difraktometresi
<b>YSA</b>	: Yapay Sinir Ağları
<b>YSZ</b>	: İtريا ile kararlı hale getirilmiş zirkonya

## SEMBOLLER

$\rho_f$	: Film soğutma akışkanının yoğunluğu
$\rho_\infty$	: Yanmış gaz akışkanının yoğunluğu
$V_f$	: Film soğutma akışkanının hızı
$V_\infty$	: Yanmış gaz akışkanının hızı
$T_f$	: Film soğutma akışkanının sıcaklığı
$T_\infty$	: Yanmış gaz akışkanının sıcaklığı
$T_s$	: Soğutucu akışkanın sıcaklığı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

Çizelge 2.1 : YSZ'nin özellikleri.....	29
Çizelge 3.1 : XOR mantığı .....	38
Çizelge 3.2 : Örnek kod girdi ve çıktıları .....	42
Çizelge 4.1 : Altlık malzemenin kimyasal ve termal özellikleri .....	48
Çizelge 4.2 : Bağlanma katmanı ve seramik katman için kullanılan tozların kimyasal yapısı .....	50
Çizelge 4.3 : Bağlanma katmanın üretimi için proses parametreleri.....	50
Çizelge 4.4 : Eleme sonrası partikül boyut dağılımı .....	51
Çizelge 4.5 : Seramik üst katman üretimi için proses parametreleri. ....	52
Çizelge 4.6 : Örnek pürüzlülük değerleri ölçüm grafiği.....	53
Çizelge 4.7 : Pürüzlülük değerleri ortalama değerleri .....	53
Çizelge 4.8 : Sıcak korozyon hasar oranları .....	56
Çizelge 4.9 : Ölçülen porozite değerleri. ....	58
Çizelge 4.10 : Kullanılan geometriler ve kaplama özellikleri .....	61
Çizelge 4.11 : Porozite miktar ve dağılımı .....	64
Çizelge 4.12 : Oluşturulan YSA'nın özellikleri .....	65
Çizelge 4.13 : YSA analizi sonucunda yapılan deneme sonucu.....	66



## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Gaz türbinin şematik gösterimi .....	9
Şekil 2.2 : Gaz türbin bölgelelerinin şematik gösterimi .....	9
Şekil 2.3 : Türbin bıçağı film soğutma sistemi.....	13
Şekil 2.4 : Türbin bıçağının soğutulması.....	14
Şekil 2.5 : Tek ve çok sıralı film soğutmanın kullanıldığı türbin bıçaklarında akışın gösterimi .....	15
Şekil 2.6 : Film soğutma için tasarım parametreleri.....	16
Şekil 2.7:Çok sıralı film soğutmanın kullanıldığı türbin bıçağının ısı akışının şematik gösterimi .....	17
Şekil 2.8 : Modern bir gaz türbininde termal bariyer kaplama kullanımı .....	17
Şekil 2.9 : Termal bariyer kaplamaların şematik görünümü .....	18
Şekil 2.10 : Termal bariyer kaplamalarda sıcaklık düşüşü .....	19
Şekil 2.11 : Isıl kaplama tekniklerinin şematik gösterimi .....	20
Şekil 2.12 : Plazma Püskürtme yöntemi ile üretilmiş kaplamanın şematik görünümü.....	22
Şekil 2.13 : Atmosferik plazma sisteminin şematik gösterimi .....	23
Şekil 2.14 : Kaplama Prosesinin Şematik Görünümü .....	24
Şekil 2.15 : Bağlanma katmanında kullanılan malzemelerin korozyon – oksidasyon direnci .....	26
Şekil 2.16 : Isıl etkiyle büyüyen oksit tabakasının oluşumunun gösterimi .....	26
Şekil 2.17 : YSZ içinde oksijen boşluklarının oluşumu .....	30
Şekil 2.18 : YSZ'nin sıcaklığa göre faz dönüşüm oranları.....	30
Şekil 2.19 : Gaz türbinlerinde kullanılan TBK'ların hasarları .....	31
Şekil 2.20 : Termal çevrim sonucunda oluşan hasarların şematik görünümü .....	32
Şekil 3.1 : Biyolojik sinir ağının şematik gösterimi .....	34
Şekil 3.2 : Bir yapay sinir ağının şematik gösterimi.....	35
Şekil 3.3 : Tam bağlantılı ve kısmi bağlantılı yapay sinir ağları.....	37
Şekil 3.4 : Perceptronun şematik gösterimi .....	38
Şekil 3.5 : Çok katmanlı sinir ağının şematik gösterimi.....	39
Şekil 3.6 : Geri beslemeli sinir ağının şematik gösterimi.....	40
Şekil 3.7 : Bir yapay sinir ağının optimizasyon algoritması.....	41
Şekil 3.8 : Knime programı için oluşturulmuş akış şeması .....	43
Şekil 3.9 : Neural network toolbox arayüzünün görünümü.....	44
Şekil 3.10 : H <sub>2</sub> O programının arayüzü .....	44
Şekil 4.1 : Altlık malzemenin kumlama öncesi ve sonrasındaki görünümü.....	49
Şekil 4.2 : (a) kumlama öncesi ve (b) kumlama sonrası yüzey pürüzlülük profili ...	49
Şekil 4.3 : Pürüzlülük ölçüm bölgeleri .....	52
Şekil 4.4 : Farklı boyutlarda toz kullanılarak üretilmiş kaplamaların SEM görüntüleri.....	54
Şekil 4.5 : Sıcaklık – Zaman grafiği .....	54
Şekil 4.6 : Sıcak korozyon hasarları ve ikili görselleri.....	55
Şekil 4.7 : Mikroyapı ve aynı mikroyapıya sahip ikili görsel hali .....	57

<b>Şekil 4.8</b> : Mikroyapıların ikili görsel halleri .....	<b>57</b>
<b>Şekil 4.9</b> : Toz dağılımlarına göre XRD ölçümleri.....	<b>59</b>
<b>Şekil 4.10</b> : Sonlu elemanlar analizinde kullanılan geometrinin bölümleri.....	<b>60</b>
<b>Şekil 4.11</b> : Sonlu elemanlar için gerekli ağ yapısı.....	<b>61</b>
<b>Şekil 4.12</b> : Sonlu elemanlar metodu sonucunda sıcaklık ve akışkan hızı dağılımı ..	<b>62</b>
<b>Şekil 4.13</b> : Numunelere göre ortalama yüzey sıcaklığı grafiği .....	<b>63</b>
<b>Şekil 4.14</b> : Oluşturulan YSA'nın şematik gösterimi .....	<b>64</b>





# ATMOSFERİK PLAZMA SPREY YÖNTEMİYLE ÜRETİLMİŞ %6 – 8 YSZ TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN POROZİTESİNİN YAPAY SİNİR AĞLARI İLE MODELLENMESİ

## ÖZET

Bu çalışmada yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya (YSZ) termal bariyer kaplamalar (TBK) partikül boyutlarına göre sınıflandırılarak atmosferik plazma sprej (APS) yöntemiyle üretilmişlerdir. Bu çalışma sayesinde seramik üst katman malzemesi olarak ticari uygulamalarda oldukça yaygın kullanılan YSZ'nin mikroyapı farklılıklarının TBC özelliklerine etkisi incelenmiştir. Kaplama prosesinde, ticari YSZ (Sulzer Metco 204B-NS) elek yardımıyla üç sınıfa ayrılmıştır. Sınıflandırılan YSZ tozları önceden bağ katmanı HVOF prosesi ile üretilen altlık üzerine APS yöntemi ile kaplanmıştır. Aynı zamanda karşılaştırma amacıyla ticari YSZ ile de kaplama üretimi gerçekleştirilmiştir.

Kaplamaların mikroyapı analizlerinde taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılmıştır. SEM ile elde edilen kesit görüntülerinde APS yöntemi ile üretilen TBC'lerin karakteristik özelliklerine sahip olduğu ancak bu yapı içerisinde kullanılan toz boyut ve dağılımına göre farklılıklar gösterdiği gözlemlenmiştir.

Kaplama porozite oranı görsel işleme metodu ile yapılmıştır. Her bir grup kaplama kendi içinde tutarlı olarak %15 ile %23 arasında değişim göstermiştir. Bunun nedeni ince toz olarak sınıflandırılan grubun plazma alevi içinde daha hızlı bir şekilde ısınarak ergimesi ve mikroyapıyı oluşturan yassı tanelerin daha ince olması olarak açıklanmıştır. Bunun yanında toz boyut dağılımı göreceli olarak dar olan tozların porozite dağılımının lokal olarak kaldığı ancak geniş boyut dağılımına sahip tozların porozitelerinin küçük ve tüm kaplamaya yayılmış olduğu gözlemlenmiştir.

Kaplama özellikleri porozite oranı ve dağılımı ile ilişkilendirilmiştir. Bu amaçla sistematik olarak sıcak korozyon ve X-ışını difraktometresi analizi gerçekleştirilmiştir.

Sıcak korozyon deneyi 1200°C'de gerçekleştirilmiştir. Sıcak korozyon sonucunda elde edilen yapının ilerleme mekanizmasının porozite ile ilişkisi kurulmuştur. Sınıflandırılan tozların porozite ile orantılı şekilde, sıcak korozyona uğradığı ancak; ticari toz ile üretilen kaplamanın en düşük sıcak korozyon direncine sahip olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun açıklanabilmesi için porozite dağılımı da göz önüne alınmıştır. Küçük ve kaplama yapısına homojen dağılım gösteren porozitelerin sıcak korozyon sonucu oluşan kristallerin ilerlemesini engelleyemediği ancak; büyük porozitelerin lokal olarak olduğu kaplamalarda, porozitelerin kristallerin ilerlemesini engelleyici bir role sahip olabileceği fikrini oluşturmuştur.

X-ışını difraktometresi analizinde poroziteye bağı olarak pik şiddetlerinin farklılık gösterdiği gözlemlenmiştir. Sınıflandırılan tozların kendi içlerinde doğrusal bir şekilde davrandığı ve porozite oranı arttıkça pik şiddetinin düştüğü gözlemlenmiştir. Ancak; ticari tozun, sınıflandırılmış tozlardan farklı davrandığı ve en yüksek pik şiddetine ulaştığı görülmüştür. Bu durumun açıklanması için porozite dağılımının etkinliği düşünülmüştür ve tüm kaplamaya dağılmış porozitenin pik şiddetini arttırdığı ve belli bölgelerde yoğunlaşmış porozitenin pik şiddetini düşürdüğü sonucuna ulaşılmıştır.

Yüzey pürüzlülüğü ile porozite arasındaki ilişki incelenmiş ve yapay sinir ağı ile modellenmiştir. Literatür incelendiğinde TBK'ların özelliklerinin YSA ile modellenmesi noktasında genellikle proses parametrelerine odaklanılmaktadır. Bu noktada proses parametrelerinin fazlalığı ve kontrol edilebilirliğinin zorluğundan dolayı üretilen kaplamaya ait bir özelliğin ölçülmesi daha güvenilir bir YSA oluşturulmasına neden olacaktır. Bu nedenle kaplama porozitesinin modellenmesi için yüzey pürüzlülüğü verileri kullanılmıştır. Bu sayede kaplamaya zarar vermeden kaplama porozitesini daha güvenilir olarak tahmin edebilen bir yapay sinir ağı oluşturulmuştur.

TBK sisteminin yoğun olarak kullanıldığı gaz türbini uygulamalarındaki son gelişmeler incelenerek ana metale etki eden sıcaklığı düşürme yöntemleri araştırılmıştır. Film soğutma olarak bilinen ve TBK ile birlikte kullanılan soğutma yöntemi üzerinde durulmuştur. Gerçek SEM görüntüleri kullanılarak film soğutmanın yüzeydeki etkileri sonlu elemanlar metodu ile incelenmiş ve yüzey pürüzlülüğünün malzeme yüzeyine etki eden sıcaklığa etkisi incelenmiştir.

# **ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS MODELING OF POROSITY OF 6 - 8% YSZ THERMAL BARRIER COATINGS PRODUCED WITH ATMOSPHERIC PLASMA SPRAY METHOD**

## **SUMMARY**

It is aimed to determine the porosity of 6 - 8% YSZ thermal barrier coatings produced by atmospheric plasma spray coating method with the data that can be measured without damaging the coating in the works carried out within the scope of the thesis.

As a result of the investigations carried out for this reason, it is concluded that the surface roughness is related to the porosity and it is a value that can be used to determine the porosity contained in the coating without damaging it.

The lack of statistical methods for establishing the relationship between roughness values and porosity has led to modeling of the system by artificial neural networks. The geometry drawing programs required for the finite element method do not fully reflect the coating system created. For this reason, the secondary purpose of the thesis is to make SEM images usable in the finite element method.

Modeling and simulation studies for solving engineering problems have been investigated in the literature survey. As a result of the studies done, it has been observed that artificial intelligence applications which are able to give information by learning of the finite element method and complex systems which have resulted in using numerical methods and system-appropriate formulas have been observed.

In this context, in-depth research has been conducted in accordance with the aims of the thesis. Artificial neural networks, one of the artificial intelligence methods, have been shown to be suitable for the solution of the present problem (determination of coating porosity).

In this study, yttria stabilized zirconia (YSZ) thermal barrier coatings (TBC) were produced by atmospheric plasma spray (APS) classifying according to particle size. This study investigated the effect of YSZ, which is widely used in commercial applications as a ceramic top layer material, on the TB properties of microstructure differences. In the coating process, commercial grade YSZ (Sulzer Metco 204B-NS) was divided into three classes with the aid of a sieve. Classified YSZ powders were coated with APS method on the substrate which was pre-bonded with the HVOF process. At the same time, coating production was carried out with commercial YSZ for comparison purposes.

Scanning electron microscopy (SEM) was used in the microstructure analyzes of the coatings. It is observed that the TBCs produced by the APS method have

characteristic characteristics in the section images obtained by SEM but they show differences according to the powder size and distribution used in this structure.

Coverage porosity ratio was determined by visual processing method. Each group consistently varied from 15% to 23% within the coating itself. This is explained by the fact that the group classified as fine dust warms up more rapidly in the plasma flame and the fineness of splashes and splashes. However, it has been observed that the porosity of the powders having a relatively narrow size distribution is locally remained but the spreads of the powders having a large size distribution are small and spread over the coating.

Up to 50 cycles could be applied in thermal shock tests. Coatings using coarse powders 10. Thin, medium and commercial coatings caused the substrate material to shrink and the test conditions to fail. However, no separation from the surface was observed. However, in accordance with the literature, it has been observed that the mechanism of damage starts from the edge. Early damage to coatings produced by coarse powder can be explained by the high porosity between the ceramic layer and the bond layer. Because of the test difference between the thermal shock and the thermal cycle, the number of cycles is low. In the thermal shock test, the material was released because the material was not compressed by external forces. Due to the difference in expansion between the ceramic upper layer and the substrate, the substrate material shrinks toward the upper ceramic layer.

The hot corrosion test was carried out at 1200 ° C. The relationship between porosity of the progressive mechanism of the structure obtained as a result of hot corrosion is established. Classified powders undergo hot corrosion in proportion to porosity; It has been observed that the coating produced by the commercial powder has the lowest thermal corrosion resistance. In order to explain this situation, the porosity distribution is taken into account. Small and uniformly distributed porosities can not prevent the progression of hot corrosion-causing crystals. It is believed that porosities have a role in preventing the progress of crystals in locally formed coatings of large porosities. In coatings made with classified dusts, the lowest damage rate was observed in coatings with fine powder, while the highest damage was observed in coatings where coarse dust was used.

It has been investigated whether there is a relationship between surface roughness and porosity ratios. Surface roughness values were measured with an optical profilometer. The relationship between surface roughness values and porosity is revealed by artificial neural networks (ANN). Since coarse powders with high roughness values have the highest porosity, it is thought to be effective in interpreting porosity-related properties. In the scope of the thesis, the studies done with artificial neural networks were examined in terms of material science and engineering applications. The focus is on ANN studies for thermal barrier coatings produced with APS.

Recent developments in the application of the gas turbine in which the TBC system is heavily used have been examined and methods of reducing the temperature that will affect the main metal have been investigated. The cooling method known as film cooling and used with TBC is emphasized. Thanks to the geometries prepared by the micrographs obtained, the effects of film cooling on the surface were investigated by the finite element method. At this point, the surface roughness was examined to see

if it affected the material temperature, but minor effects were observed. Within the scope of the thesis, the use of the last element method in TBC studies has been examined and suggested.





## 1. GİRİŞ

Termal bariyer kaplamalar(TBK), yüksek kullanım sıcaklığına sahip uygulamalarda ana malzemeyi korumak amacıyla kullanılan intermetalik, seramik ya da kompozit malzemelerden oluşan insülatör sistemleridir. TBK'ların en yaygın kullanımı, gaz türbin bıçaklarında termal ve çevresel etkiler ile oluşabilecek hasarları engellemek amacıyla yapılan uygulamalardır.

Termal bariyer kaplamalar EB-PVD, APS, HVOF, VPS gibi yöntemler ile üretilmektedir. APS yöntemi endüstride en yaygın kullanılan TBK üretim yöntemidir. Seramik malzeme olarak termal iletkenliği düşük, termal genleşme katsayısı ana metale yakın malzemeler kullanılmaktadır. Yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya (YSZ) TBK sistemlerinde uzun yıllardır kullanılan seramik malzemedir. YSZ'nin 1200°C'nin üstünde kullanılması durumunda oluşan faz dönüşümleri, daha yüksek sıcaklıklarda kullanılmasını engellemektedir.

Gaz türbinlerinde, ana malzemeyi yüksek sıcaklıklardan korumak için birçok soğutma yöntemi aynı anda kullanılmaktadır. Bu yöntemler ile birlikte kullanılan seramik termal bariyer kaplamalar, özellikle malzemeye dışarıdan etki edebilecek ve malzemenin hasara uğramasına neden olacak etmenleri engelleme görevi görür.

Atmosferik plazma sprey yöntemi ile üretilmiş bir kaplamanın kendine özgü bir mikroyapısı bulunmaktadır. Mikroyapı "splat" adı verilen, ergiyik ya da yarı ergiyik durumdaki toz taneciklerinin yassılaşılarak üst üste gelmesi ile oluşmaktadır. Bu şekilde oluşan bir mikroyapı içersinde yoğun miktarda porozite, boşluk, çatlak meydana gelmektedir ve mikroyapıyı etkileyen bir çok parametre bulunmaktadır; plazmayı oluşturan gaz akış hızı, koruyucu gaz (ikincil gaz) akış hızı, toz besleme hızı, akım, toz tane boyutu gibi başlıca parametreler kaplamanın mikroyapısal özelliklerini etkilemektedir.

Mikroyapısal ve kaplama özelliklerinin belirlenmesinde deneysel yaklaşımlar kadar bilgisayar destekli sistemlerin kullanılması da önem arz etmektedir. Bu nedenle sayısal sonuçlar verebilen ve bir sistemin belli sınır şartları altında nasıl çalışacağını

hesaplayabilen sonlu elemanlar analizi gibi yöntemler kullanılmaktadır. Aynı zamanda daha önce elde edilmiş sonuçlardan öğrenme yeteneğine sahip yapay sinir ağları gibi yöntemler ile kaplama ve mikroyapı özelliklerini önceden tahmin edebilmek mümkündür.

## **1.1 Tezin Amacı**

Tez kapsamında yapılan çalışmalarda, atmosferik plazma sprey kaplama yöntemi ile üretilmiş %6 – 8 YSZ termal bariyer kaplamaların içerdiği porozitenin, kaplamaya hasar vermeden ölçülebilecek bir veri ile belirlenmesi amaçlanmıştır.

Bu nedenle yapılan incelemeler sonucunda yüzey pürüzlülüğünün porozite ile ilişkili olduğu ve kaplamaya hasar vermeden ihtiva ettiği poroziteyi belirlemede kullanılabilecek bir değer olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Pürüzlülük değerleri ile porozite arasındaki ilişkinin kurulabilmesi için istatistiksel yöntemlerin eksik kalması, yapay sinir ağları yöntemiyle sistemin modellenmesi gereksinimini doğurmuştur.

Sonlu elemanlar metodu için gerekli olan geometrinin çizim programları ile oluşturulması kaplama sistemini tam olarak yansıtmamaktadır. Bu nedenle SEM görüntülerinin sonlu elemanlar metodunda kullanılabilir hale getirilmesi tezin ikincil amacını oluşturmaktadır.

## **1.2 Literatür Araştırması**

Literatür araştırması kapsamında mühendislik problemlerinin çözümü için başvurulan modelleme ve simülasyon çalışmaları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda sayısal yöntemler ve sisteme uygun formüllerin kullanılması ile sonuç veren sonlu elemanlar metodu ve karmaşık sistemleri öğrenerek bilgi verebilen yapay zeka uygulamalarının kullanıldığı gözlemlenmiştir. [1-12]

Bu kapsamda tez amaçlarına uygun olarak derinlemesine araştırma yapılmıştır. Yapay zeka yöntemlerinden biri olan yapay sinir ağlarının, mevcut problemin (kaplama porozitesinin belirlenmesi) çözümü için uygun olabileceği görülmüştür. Bu nedenle yapay sinir ağlarının metalurji ve malzeme mühendisliği alanında kullanılması ile ilgili literatür çalışması yapılmıştır. Yapay sinir ağlarının malzeme



bilimi problemleri için uygun sonuçların verdiğinin anlaşılması sonrasında APS yöntemi özelinde yapılan YSA çalışmaları incelenmiştir.

Sayısal sonuçlara gereksinim duyulan problemlerin çözümü için başvurulan sonlu elemanlar metodu için yapılan literatür çalışmasında TBK özelindeki uygulamalar incelenmiş ve analizlerin gerçek geometrilerin kullanılmadığı bunun yerine çizim programları yardımı ile oluşturulan geometrilerin kullanıldığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle SEM görüntülerinin sonlu elemanlar metodunda kullanılabilecek formata dönüştürülerek uygulaması yapılmıştır.

### **1.2.1 Malzeme Biliminde Yapay Sinir Ağları Uygulamaları**

Yapay sinir ağları, malzeme bilimi ve mühendisliği ve ilgili proseslerin gelişimi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bunun nedeni malzeme biliminde sıklıkla karşılaşılan problemleri ele alabilen şeffaf ve nicel bir yöntem olmasıdır. Aşağıda yapay sinir ağlarının kullanılarak çözüme gidilen bazı malzeme bilimi ve mühendisliği konularından örnekler verilmiştir.

#### **1.2.1.1 Kuartz ve ısıtılmanın seramik kaplamaların korozyon özelliklerine etkisi**

Elmabrouk ve Kankali [1], kuvars ve ısıtılmanın sinir ağı kullanarak seramik kaplamanın korozyon özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Yapay sinir ağları kullanarak elde ettikleri sonuçları doğrusal regresyon ile bulunan ve daha önceden kullandıkları sonuçlar ile karşılaştırmışlardır. Araştırmacılar, ısıtılma sıcaklıklarının (500, 550 ve 600 °C) farklı zaman aralıklarında (60 ve 120 dak.) kuars katkı oranı ile (% 0 – 15) korozyon arasındaki ilişkiyi yapay sinir ağları kullanarak incelemişlerdir. Çalışmada iki farklı sayısal yöntem kullanılmıştır. Bunlardan ilki çoklu lineer regresyon diğeri ise yapay sinir ağlarıdır. Yapay sinir ağına girdi olarak ısıtılma sıcaklığı, ısıtılma süresi ve kuars katkı oranı verilmiştir. YSA'nın çıktısı olarak da asit korozyon oranı alınmıştır. Yapay sinir ağı olarak çok katmanlı ileri beslemeli bir mimari kullanılmıştır. Sonuç olarak lineer regresyon ve yapay sinir ağlarının verdiği korozyon oranları incelenmiş ve YSA'nın regresyona göre daha doğru sonuç verdiği ortaya konulmuştur.

### 1.2.1.2 İnce filmler ve süper iletkenler

İnce filmlerde malzeme bilimi ve mühendisliğinin temel meselesi, biriktirme işlemi ve karakterizasyondur. Biriktirme prosesinin kontrol edilmesi çok karmaşık olabilmektedir. Bu nedenle sinir ağları uygulamaları için idealdir. Biriktirme işlemi sırasında malzeme tasarımı konusuna giren bir çalışma Asada ve arkadaşları [2] tarafından yapılmıştır.  $(Y_{1-x}Ca_x)Ba_2Cu_3O_z$  ve  $Y(Ba_{2-x})Cu_3O_z$  süper iletken malzemelerin süper iletkenlik geçiş sıcaklığı  $x$  ve  $z$  değişkenlerinin fonksiyonu olarak yapay sinir ağları kullanılarak tahmin edilmiştir. Sonuç olarak Ca katkılı YBCO'nun süper iletkenlik geçiş sıcaklığının en yüksek olduğu noktanın  $(Y_{1-x}Ca_x)Ba_2Cu_3O_2$  için  $x=0,3$  ve  $z=6,5$  olarak tahmin edilmiştir.

### 1.2.1.3 Kompozit malzemler

Hwang ve arkadaşları karbon fiber kompozit malzemenin kopma dayanımı tahmini için kullanılan üç yöntemi karşılaştırmıştır. Karşılaştırılan modeller Tsai-Wu teorisi, yapay sinir ağları ve alternatif hibrit modeldir. Karşılaştırma sonucunda YSA'nın en düşük hata oranına sahip olduğu ortaya konulmuştur [3].

### 1.2.1.4 Seramiker

Ezuguwu ve arkadaşları [4] oksit seramik kesme uçlarının kullanım ömürlerini ilerleme hızı, dönme hızı ve kesme derinliğine bağlı olarak YSA yardımıyla tahmin etmişlerdir.

### 1.2.1.5 Atmosferik plazma sprey yöntemi ile üretilmiş kaplamalarda YSA uygulamaları

Guessasma ve arkadaşları atmosferik plazma sprey yönteminin yapay sinir ağları yardımıyla modellenmesi konusunda çalışmalar yapmışlardır. İlk olarak yapılan çalışmada modelleme konusunda gerekli olan temel yaklaşımlar gereklilikler ve örnekler verilmiştir [5]. Modelleme gerekli değişkenleri proses parametreleri, havadaki partikül karakteri, mikroyapı, mekanik özellikler olarak belirlemiştir. Yapılan çalışmada akım yoğunluğu, toplam plazma gaz akış oranı, hidrojen miktarı, taşıyıcı gaz akış oranı, nozül iç çapı parametrelerine göre bir pasodaki birikme oranını modellemiştir. Yapılan ikinci çalışmada  $Al_2O_3$  - %13 ağırlıkta  $TiO_2$  kompozit kaplamanın APS yöntemi ile üretilmesi ve maksimum birikme oranının akım yoğunluğu, toplam plazma gaz akış oranı, hidrojen miktarı, taşıyıcı gaz akış oranı,

nozül iç çapı parametrelerine göre yapay sinir ağı yaklaşımı ile modellemiştir [6]. Yapılan diğer çalışmada APS ile üretilen  $Al_2O_3$  - %13 ağı  $TiO_2$  kaplamanın aşınma direnci disk üzeri aşınma testi yardımıyla ölçülmüş ve proses parametrelerinin değişimi ile sürtünme katsayısı değişimindeki ilişki YSA ile ortaya konulmuştur[7]. Diğer bir çalışmada ise proses parametreleri ile kaplama porozite oranı arasındaki ilişki belirlenmiştir[8]. Guessasma ve arkadaşlarının yaptığı diğer bir çalışmada ise akım yoğunluğu, plazma gazı içindeki hidrojen oranı, toplam gaz akış miktarı ile mikro yapıdaki ergimiş  $Al_2O_3$ ,  $TiO_2$ , ergimemiş partikül ve porozite oranı YSA ile belirlenmiştir [9].

Malzeme bilimindeki bir çok problem gibi söz konusu çalışmalarda da lineer olmayan durumlar söz konusudur. Bu nedenle tüm çalışmalarda çok katmanlı yapay sinir ağı kullanılmıştır. Aynı zamanda problemin çıktılarını girdilerini etkilemediği için diğer bir değişle anlık kararlar verilmediği için ileri beslemeli sinir ağı modeli kullanılmıştır.

Guessasma ve arkadaşlarının yapmış olduğu bu çalışmalara W. Sha tarafından eleştiriler getirilmiştir [10]. Eleştirilerin kayda değer kısmı veri azlığıdır. Bu yaklaşım genel kapsamda doğru bir eleştiridir. Ancak çalışmalar ayrıntılı olarak incelendiğinde ve APS prosesi göz önüne alındığında verilerin 10 adet numune içeren setler olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durumda bir sinir ağını eğitmek ve test etmek için yeterli sayılabilecek sayıda (260 adet) numuneye ulaşılmıştır.

Yukarıda kısaca ifade edilen kullanım alanlarının yanında literatürde yapay sinir ağlarının kullanıldığı ve malzeme bilimi ve mühendisliğinin konuları arasında olan bir çok örnek bulunmaktadır.

### **1.2.2 TBK'lar için Sonlu Elemanlar Metodu ile yapılmış çalışmalar**

Marcin Bialas, “*Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings*”, çalışmasında APS yöntemiyle üretilen termal bariyer kaplamaların çatlak oluşumunu sonlu elemanlar yöntemini kullanarak modellemiştir [11]. Çalışmada TGO tabakasının kalınlaşması ve sürtünme deformasyonu da modellenmiştir. Model oluşturulurken iki boyutlu (2-D) bir geometri oluşturulmuştur. Çalışma TGO ve bağlanma katmanındaki pürüzlülük ile termal gerilim dağılımına odaklanmaktadır. Bunun nedeni bağlanma katmanı ve TGO'nun seramik katmana göre daha elastik yapıya sahip olmasıdır.

Termal çevrim sırasında TGO ve bağlanma katmanı arasında oluşacak gerilmelerin ölçülebilmesi için termal çevrim sıcaklıkları ve süresi de önemlidir. Model 1050°C’de 2 saat bekleme – soğuma olarak kurulmuştur. Çalışma 100 çevrim sonucunda oluşacak TGO ve gerilmeleri vermektedir.

W.Zhu ve çalışma arkadaşları, *Modeling and Simulation of the temperature and stress fields in a 3D turbine blade coated thermal barrier coatings*, çalışmasında termal bariyer kaplama uygulanmış bir türbin bıçağının üç boyutlu olarak ısı transferi ve termal gerilim analizini sonlu elemanlar metodu ile çalışmışlardır [12]. Çalışmada türbin bıçağının maruz kaldığı akış için üç farklı türbülans modeli üzerinde çalışılmış ve deneysel çalışmalar ile en uyumlu sonucu veren modelin “k-e Turblance Modeli” olduğu ifade edilmiştir. Türbin bıçağında hasarın başlayacağı bölgeler sayısal ve deneysel olarak çalışılmıştır.

Çalışma sonucunda bıçağın homjen bir sıcaklık dağılımına sahip olmadığı ve farklı bölgelerde 210 K sıcaklık farkları olduğu ifade edilmiştir. TBK sisteminin bıçağın farklı bölgelerinde 45 ile 72 K gradyan oluşturduğu ve bu değişimin basıncın yüksek olduğu bölgelerde daha az, basıncın az olduğu bölgelerde ise daha fazla olduğu ifade edilmiştir. Hasarın başlayacağı noktalar sıcak havanın girdiği ve çıktığı bölgeler olarak ifade edilmiştir.

### **1.3 Tezin Özgün Yönü ve Kapsamı**

Yapılan çalışma, termal bariyer kaplamaların yüzey pürüzlülük ölçüm sonuçlarından kaplama içindeki porozitenin boyut ve dağılım şeklini belirlemektedir. Hazırlanan yapay sinir ağı sayesinde malzemeye hasar vermeden, yüksek doğrulukta sonuçların alınması sağlanmıştır. Bu kapsamda literatürde birebir karşılaştırma yapılabilecek çalışma bulunmamakta ve ilk kez bu kapsamda bir araştırma yapılıyor olmasından dolayı özgün bir nitelik taşımaktadır

Yapılan çalışma kapsamında YSZ tozları partikül boyutlarına göre sınıflara ayrılarak APS yöntemi ile AISI 321 çeliği üzerine kaplanmıştır. Aynı zamanda ticari YSZ (Sulzer Metco 204B-NS) karşılaştırma yapmak amacıyla kullanılmıştır. Yapılan kaplamaların yüzey pürüzlülük değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. SEM görüntüleri alındıktan sonra porozite değerleri belirlenmiştir. Malzemenin porozitesine bağlı olarak gösterdiği değişiklikler; termal şok, yüksek sıcaklık korozyonu ve XRD analizleri ile ortaya konulmuştur.

Tez çalışması toplam 5 bölümden oluşmaktadır. “1. Bölüm” ile tezin amacı, yapılan literatür çalışmaları ve kapsamı ifade edilmiştir. “2. Bölüm” kapsamında temel olarak; gaz türbinleri, gaz türbinlerinde kullanılan soğutma yöntemleri ve TBKların gaz türbinleri açısından öneminden bahsedilmiştir. “3. Bölüm” de termal bariyer kaplamaların modelleme ve simülasyonunda kullanılacak yöntemler incelenmiştir. Deneysel çalışmaları ve sonuçları içeren “4. Bölüm” içeriğinde, tez kapsamında kullanılan üretim ve karakterizasyon süreci anlatılmıştır. “5. Bölüm” kapsamında ise elde edilen sonuçlar değerlendirilmiş ve önerilerde bulunulmuştur.

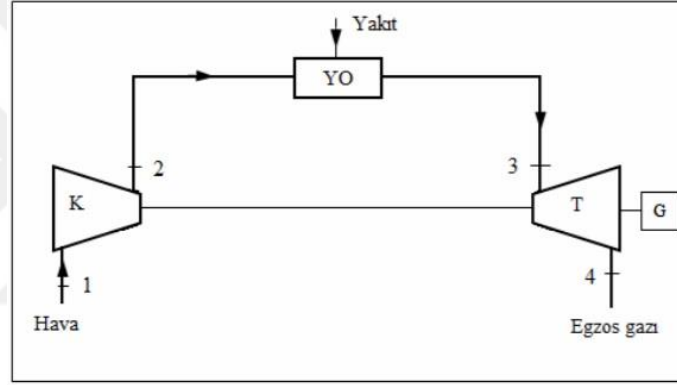




## 2. GAZ TÜRBİNLERİ VE TERMAL BARIYER KAPLAMALAR

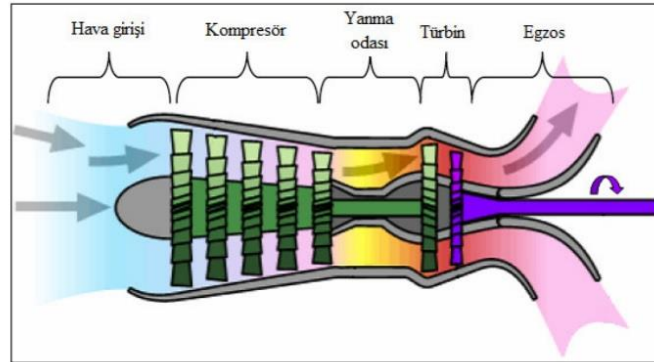
### 2.1 Gaz Türbinleri

Açık çevrimli gaz türbin sistemini oluşturan ana elemanlar, Şekil 2.1'deki şemada gösterildiği gibi; kompresör (K), yanma odası (YO), gaz türbini (T) ve jeneratördür (J). Ancak uygulamada verim artışı ve kapasite artışı sağlayabilmek için kompresör ve türbinler, ara ısıtıcılar, ara soğutucu ve yakıt ön ısıtıcı elemanları da kullanılabilir.



Şekil 2.1 : Gaz türbinin şematik gösterimi [13].

Gaz Türbinleri, güç kaynağı olarak kullanılan pistonlu içten yanmalı motorlarla karşılaştırıldığında, salınım yapan parçaların olmayışı nedeniyle yüksek dönme hızlarına ulaşılabilen, özgül kütle ve boyutlar bakımından daha küçük sistemlerdir.



Şekil 2.2 : Gaz türbin bölgelerinin şematik gösterimi [13].

Gaz türbinleri genellikle itici güç oluşturma (uçak motorları) ve elektrik enerjisi üretimi (elektrik üretim santralleri) alanlarında kullanılmaktadır. İtme gücü, yüksek hızda türbinden çıkan egzoz gazlarının bir lüleden geçerek genişlemesiyle sağlanır. Bu türbinler genelde havacılıkta kullanılır. Günümüz modern gaz türbinlerinin teorik çevrimi Brayton Çevrimidir. Bu termodinamik çevrime göre çalışan bir gaz türbini kesiti Şekil 2.2’de gösterilmektedir. Gaz Türbininin çalışma prensibi aşağıdaki gibidir;

- a) Kompresör, atmosferden filtreleyerek çektiği havayı basınçlandırarak yanma odasına gönderilir
- b) Yanma odasında hava ile karışan yakıt yanar ve oluşan yanmış gazlar türbine gönderilir
- c) Yanma odasından türbine gelen sıcaklığı ve basıncı yüksek gazların türbinden geçerken ısı enerjisi, mekanik enerjiye dönüşür. İş biten gazlar egzozla verilir [13].

### **2.1.1 Gaz türbin bıçaklarında soğutma**

İleri teknoloji gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklığının yanısıra verim ve çıkış gücünü arttırabilmek amacıyla kompresör sıkıştırma oranı da yüksek tutulmaktadır. Yanma odası içerisindeki yanma sonrası gazlar, kompresörden gelen hava ile soğutulmakta ve türbine soğutulmuş olarak gönderilmektedir. Bunun sebebi ise, yaklaşık 1800 °C’ye ulaşan gazın soğutulmadan gönderilmesi halinde türbin sıcak gaz yolu üzerindeki parçaların eriyebilecek olmasıdır.

Gaz türbinlerinde kullanılan hava, temel olarak üç ana görevi vardır. Bunlardan birincisi yanma için gerekli oksijeni sağlamaktır. İkinci olarak ise yüksek sıcaklıklara maruz kalan parçaların bu sıcaklıklar nedeniyle zarar görmesini önlemek için soğutma görevi yapmaktır. Son olarak ise türbinin belirli bölümleri arasında sızdırmazlığın sağlanması için sızdırmazlık havası olarak kullanılır. Gaz türbinlerinin ısı verimi ve çıkış gücü, türbin giriş sıcaklığı ile doğru orantılı olarak artar. Bu nedenle ısı verim ve çıkış gücü önemli ölçüde gaz türbini giriş sıcaklığına bağlı bir fonksiyondur. Diğer bir deyişle, türbin giriş sıcaklığının arttırılması, gaz türbini performansını arttırmadaki anahtar teknolojilerden biridir.

Gaz türbini çevrimindeki en yüksek sıcaklık, yanma işlemi sonucunda oluşan türbin giriş sıcaklığıdır. Bu sıcaklık, türbin kanat malzemelerinin dayanımıyla sınırlıdır. Sınırlanan bu sıcaklık değeri aynı zamanda çevrimin basınç oranını da



sınırlamaktadır. Türbin giriş sıcaklığı ve çevrim basınç oranı değişiminde güç ve verim artışı için optimum bir çalışma noktası bulunmaktadır. Yüksek yanma odası çıkış sıcaklıkları ile gaz türbini veriminin geliştirilmesi ve böylece yakıt/hava oranının düşürülmesi sağlanabilir. Benzer olarak, havacılık uygulamalarında yüksek sıcaklık itme kuvvetinin artırılmasını sağlar. Gelişmiş gaz türbinlerinde türbin giriş sıcaklıkları, kanat malzemesinin erime noktası sıcaklığından çok yüksektir. Bu durumda türbin kanatlarının ve diğer sıcak gaz yolu ekipmanlarının zarar görmemesi ancak uygun bir yöntemle ve gereken miktarda soğutulmasıyla sağlanabilmektedir.

### 2.1.1.1 Soğutma avantajları

Yukarıda bahsedildiği gibi gaz türbini giriş sıcaklığı, gerek türbin parçalarının ömrü gerekse türbin verimi ve çıkış gücü üzerinde en etkili parametredir. Türbin giriş sıcaklığının artması veya azalması ise türbin parçalarının dayanımı ile doğru orantılı olarak gelişmektedir. Türbin parçalarının dayanımı ise, kullanılan malzeme bileşimine, imalat yöntemine ve maruz kaldıkları sıcaklığın azaltılabilmesine bağlıdır. Türbinde kullanılan parçalardan olan türbin bıçakları ise hem mekanik hem de ısı zorlanmalarına maruz kaldıklarından en kritik parçalar olmaktadır. Özellikle rotor kanatları hem basınçlı gazın oluşturduğu mekanik zorlamaya maruz kalmakta hem de yüksek hızda dönmenin etkisiyle oluşan merkez kaç ivmesinin etkisi altında bulunmaktadır. Bu nedenle en kritik parçalar olarak kabul edilmektedir. Bu parçaların maruz kaldığı sıcaklık etkisiyle oluşan ısı zorlanmaları en aza indirmenin yolu ise türbin kanatlarının soğutulmasıdır. Türbin kanatlarının soğutulması ile aşağıda belirtilen avantajlar sağlanabilmektedir.

**Malzeme ömrü:** Aynı yanma odası giriş sıcaklığına sahip türbinlerde türbin kanatlarında uygulanacak doğru bir soğutma yöntemi ile türbin kanadının ömrü çok daha uzun olacaktır.

**Kapasite kullanım faktörü:** Türbin kanatlarının soğutulması ile türbin periyodik bakımlarının ve kanatların değiştirme sürelerinin daha uzun aralıklarla gerçekleştirme imkanı doğacağından bakım süreleri kısalmaya ve dolayısıyla ünitelerin çalışma süresi ve kapasite kullanım faktörleri arttırılabilecektir.

**Bakım maliyetleri:** Türbin kanatlarının soğutulması sayesinde hem malzeme ömrünün uzaması hem de çalışma sürelerinin artması sayesinde bakım maliyetleri hem zaman, hem malzeme hem de işçilik açısından ciddi oranda düşecektir.

**Türbin çıkış gücü:** Türbin kanatlarının uygun bir yöntemle soğutulması ile istendiği takdirde daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarında türbinin çalışmasına imkan sağlanabilir. Daha yüksek sıcaklıklarda ise gazın iş görme potansiyeli ve türbine verilen ısı enerjisi artacağından türbin çıkış gücünde buna bağlı olarak artacaktır.

**Türbin verimi:** Daha önceki konularda türbin giriş sıcaklığı ile verim arasındaki ilişki teorik formülasyonlarla açık bir şekilde gösterilmişti. Buna göre türbin kanatlarının soğutulmasıyla daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarında çalışması doğal olarak türbin veriminin de artmasını sağlayacaktır.

**İşletme birim üretim veya hizmet maliyetleri:** Gaz türbin kanatlarının soğutulması ile sağlanan tüm bu avantajlar doğal olarak türbinlerin kullanım amacına bağlı olarak sunulan hizmetin (havacılık vb.) veya yapılan üretimin (elektrik santrali, güç üretim türbinleri vb.) birim maliyetlerinin düşmesini sağlayacak ve işletmenin piyasa koşullarında rekabet etmesinde ciddi avantajlar sağlayacaktır.

#### **2.1.1.2 Soğutma dezavantajları**

Soğutma için kompresörden çekilen hava nedeniyle türbin çıkış gücünde bir miktar düşüş yaşanmaktadır. Soğutma amacıyla kullanılan hava, yanmış gazla karıştığında yanmış gazın entalpi ve basınç değerinde küçük de olsa bir düşüşe neden olmakta, bu da çıkış gücünü olumsuz yönde etkilemektedir. Kompresörden soğutma için çekilen hava bazen yanma odasına giren akışın değişmesine neden olduğu için yanma odasındaki akışın bozulmasına yol açabilmektedir.

Yukarıda sayılan dezavantajlar, soğutmada kompresör havası yerine egzoz gazının kullanılması ile belli ölçüde giderilebilir, ancak bu uygulamanın da bazı dezavantajlar doğuracağı muhakkaktır. Türbin kanatlarında soğutma yöntemlerinin uygulanması yatırım maliyetlerinde de artışa sebep olmaktadır. Bu dezavantajlar göz önüne alınarak yapılacak olan bir soğutma dizaynı ile en optimum sonuçlara ulaşılmasını mümkün olacaktır.

#### **2.1.1.3 Soğutma yöntemleri**

Gaz türbin kanatlarında kullanılan soğutma teknolojileri literatürde, açık sistem ve kapalı sistem soğutma olarak iki farklı şekilde sınıflandırılmıştır. Bu iki ayrı sınıflandırma aşağıdaki gibi açıklanmaktadır.

### **Açık sistem soğutma**

Açık sistem soğutmada, soğutucu akışkan ısıyı kendi üzerine aldıktan sonra kanattan çıkar ve yanmış gaz akışına karışır.

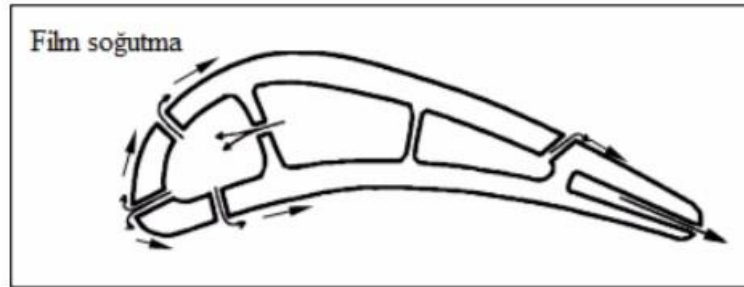
### **Kapalı sistem soğutma**

Kapalı sistem soğutmada ise soğutucu akışkan, kanatların içinden geçerken ısıyı kendi üzerine alır ve kanatlardan çektiği ısıyla kanat dışına çıkararak yoğuşturucuda dışarı atar. Yoğuşturucudan alınan ısı enerjisi sistem içerisinde kullanılacağı için çevrim veriminin artışı yönünde bir katkı sağlar.

Tez kapsamında açık sistem soğutma yöntemlerinden biri olan film soğutma yöntemi ayrıntılı olarak incelenmiştir.

#### **2.1.1.4 Film soğutma yöntemi**

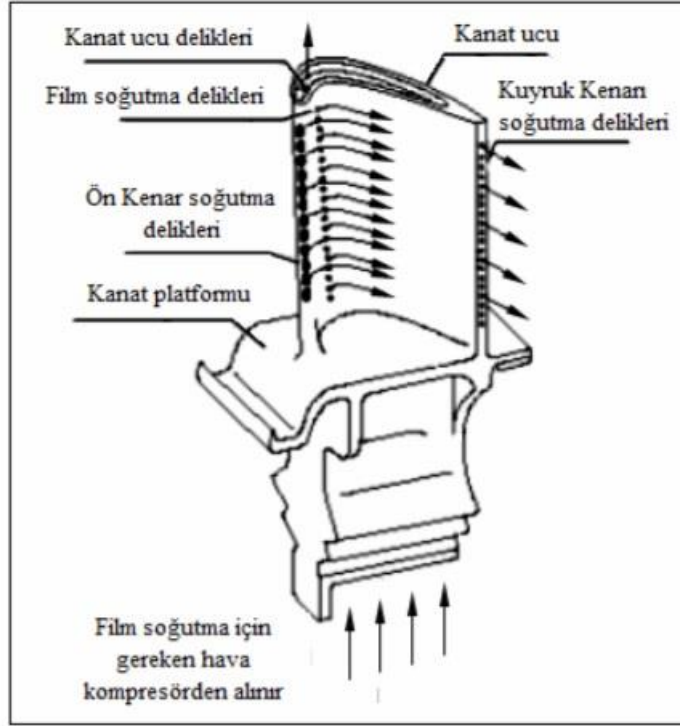
Film soğutma, sıcak gazlarla çevrelenen kanat yüzeyini korumak için verimli bir yoldur. Soğutma havası kanat yüzeyindeki deliklerin içinden geçer ve kanadın üzerinde nispeten düşük sıcaklıklı bir koruma filmi şeklini alır. Film soğutma yöntemi, günümüz yüksek sıcaklık gaz türbinlerinin gelişimine imkan sağlamıştır. Film soğutma, genellikle birinci kademe hareketli ve sabit kanatlar gibi gaz türbininin en sıcak parçalarında uygulanır.



**Şekil 2.3 :** Türbin bıçağı film soğutma sistemi [13].

Kanat yüzeyinde, soğutma havası hem koruyucu bir film tabakası oluşturur hem de kanada geçmesi muhtemel ısıyı üzerine alarak ortamdan uzaklaştırmaya çalışır. Şekil 2.3'te gösterildiği gibi, film soğutması için gerekli soğutucu akışkan, önce kanadın içindeki kanallardan geçer ve içten soğutma görevini yapar. Yani bu soğutma yöntemi aslında iki yöntemin birleşiminden oluşmaktadır. Kanat yüzeyleri, kanat uçları ve kanat platformlarının soğutulmasında özellikle film soğutma yöntemi kullanılır. Film soğutmada kullanılan akışkanın sıcaklığı, gaz türbininden geçen

yanmış gaz akış sıcaklığından oldukça düşüktür. Kanat üzerinde oluşturulan ince bir film tabakası ile kanada ısı transferi azaltılır ve böylece kanadın ömrü artar. Eğer kanadın işletme sıcaklığı, maksimum dizayn sıcaklığının 10°C üzerinde ise, bu kanadın ömrünü yaklaşık %50 azaltabilir [14]. Film soğutma performansı, çeper eğriliği, üç boyutlu dıştan akış yapısı, serbest akış türbülansı, sıkıştırılabilirlik, akış kararsızlığı, delik ölçüsü, şekli, yeri ve enjeksiyon açısı tarafından etkilenir [15].



Şekil 2.4 : Türbin bıçağının soğutulması [13].

Genelde, soğutma verimi ve ısı transfer katsayısı çalışma ortamındaki bir çok parametrelerin fonksiyonlarıdır. En etkili parametreler aerodinamik ve geometrik olarak iki katogoride gruplandırılabilir. Özellikle soğutma verimi ve ısı transfer katsayısı soğutma geometrisi ve aerodinamik özelliklerin bir fonksiyonudur. Film soğutma yönteminde etkili olan parametreler Şekil 2.4'te gösterilmiştir.

- Kanat üzerinde oluşan soğutucu film tabakasının uzunluğunun, delik çapına oranı  $x/D$
- Soğutucu akışkan delik geometrisi (delik uzunluğu, delik aralığı, üfleme açısı gibi)
- Yanmış gaz akışı mach sayısı yani, akışkan için bölgesel ses hızı,  $Ma = \text{ses hızı} / \text{akışkanın hızı}$
- Yanmış gaz akış türbülansının durumu,

- Film soğutma akışkanını üfleme oranı,  $M$

Enjekte edilen soğutucu akışkan hızının, yanmış gaz akışkan hızına oranına üfleme oranı denir. Üfleme oranının hesaplanması denklem 2.1'e göre yapılmaktadır.

$$M = \frac{\rho_f V_f}{\rho_\infty V_\infty} \quad (2.1)$$

$\rho_f$  : film soğutma akışkanının yoğunluğu

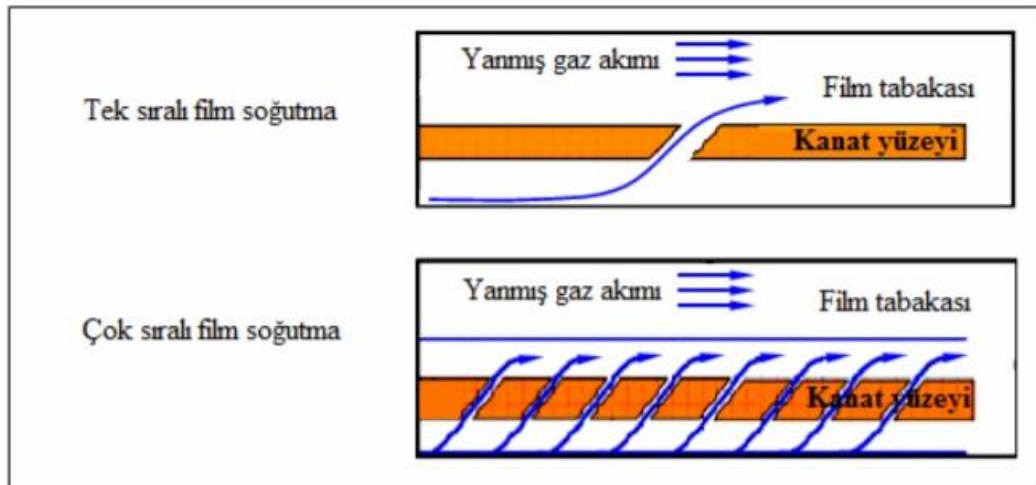
$\rho_\infty$  : yanmış gaz akışkanının yoğunluğu

$V_f$  : film soğutma akışkanının hızı

$V_\infty$  : yanmış gaz akışkanının hızı

Şekil 2.5'de gösterildiği gibi film soğutma yöntemi kanat yüzeyi ve kanat platformunda iki değişik şekilde uygulanabilmektedir :

- Tek sıralı (Ayrık) film soğutması
- Çok sıralı (Düzgün) (Uniform) film soğutması



**Şekil 2.5 :** Tek ve çok sıralı film soğutmanın kullanıldığı türbin bıçaklarında akışın gösterimi [13].

### **Tek sıralı film soğutma**

Soğutucu akışkan filmi kanadın dış yüzeyinde koruyucu bir tabaka oluşturmak için soğutucu akışkanın soğutma kapasitesinden yararlanır. Bir film soğutma işlemi birçok parametreye bağlıdır. Film soğutmaya etkileyen ilk fiziksel özellikler, yanmış gaz akışına göre soğutucu akışkanın üfleme oranı, sıcaklık oranı, yoğunluk oranı ve türbülans yoğunluğudur. Ayrıca, geometrik karakteristiklerin film soğutma üzerinde

etkisi vardır. Bu yüzden kanadın geometrisi ve film soğutma delikleri dağılımı ve yeri üzerinde geniş çaplı çalışmalar yapılmaktadır. Soğutucu akışkanın, soğutma filmi etkinliği denklem 2.2 ile ifade edilmektedir;

$$\varepsilon = \frac{T_{\infty} T_f}{T_{\infty} T_s} \quad (2.2)$$

$T_f$  : film soğutma akışkanının sıcaklığı

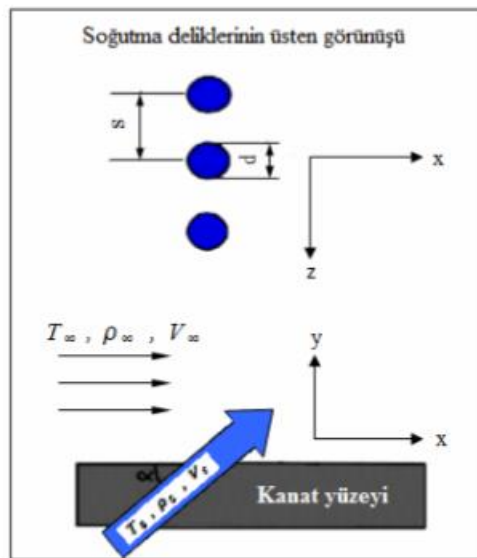
$T_{\infty}$  : yanmış gaz akışkanının sıcaklığı

$T_s$  : soğutucu akışkanın sıcaklığı

Soğutmanın etkinliğini belirleyen faktörler aşağıdaki gibidir;

- Soğutma havasının yanmış gaz akış hacmine oranı
- Film tabakası oluşturacak akışkanın, deliklerden püskürtme açısı
- Film tabakası oluşturacak soğutma havasının deliklerden çıktıktan sonraki yayılımı
- Kanat üzerindeki film soğutma deliklerinin sayısı ve birbirine olan mesafesi
- Yanmış gaz ve film soğutma akışkanında oluşan türbülanslar
- Kanat yüzeylerinin eğimleri

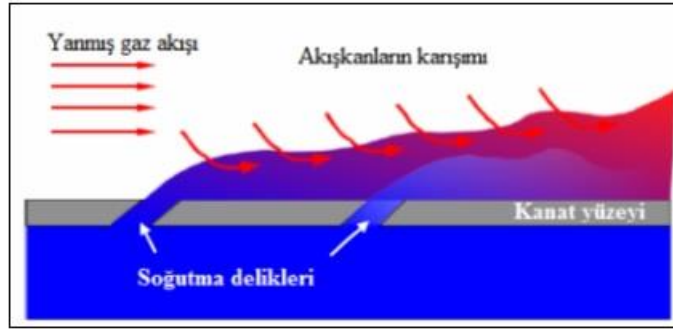
Tüm bu parametreler uygun seçildiğinde, en iyi soğutmayı yapmak mümkün olmaktadır. Bunlara ek olarak soğutma havasının üfleme oranı soğutma için uygun seçilmesi gereken parametrelerden birisidir. Tek sıralı film soğutma yönteminde, Şekil 2.6'da görülebileceği gibi tek sıra deliklerin içinden geçen hava kanat yüzeyinden geçerken soğutucu bir film tabakası oluşturmaktadır.



Şekil 2.6 : Film soğutma için tasarım parametreleri [13].

### Çok sıralı film soğutma

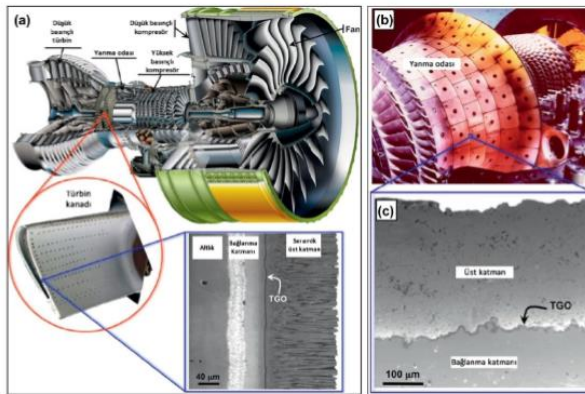
kanat yüzeyinde film soğutma uygulaması için yanmış gazın akış yönünde birden fazla sıralı delikler bulunmaktadır. Kanat üzerindeki çok sıralı film tabakasının oluşması ile yanmış gaz akışının davranışını Şekil 2.7’de gösterilmiştir. Bu durumda soğutma filminin etkinliği kanat yüzeyi boyunca düşmekle birlikte bir sonraki soğutma deliklerinin bulunduğu bölgede tekrar artırılarak kanat yüzeyinin yüksek sıcaklıktan korunması süreklilik kazanmaktadır. Bu şekilde daha iyi bir soğutma elde etmek mümkün olmaktadır.



Şekil 2.7 : Çok sıralı film soğutmanın kullanıldığı türbin bıçağının ısı akışının şematik gösterimi [13].

## 2.2 Termal Bariyer Kaplamalar

Termal bariyer kaplamalar; Şekil 2.8’de görüldüğü gibi, gaz türbin motorlardaki ana metalik malzemenin özellikle termal dayanım sınırlarının zorlandığı türbin kanadı, yanma odası, nozül gibi çeşitli bölümlerde kullanılır. Üzerine kaplandıkları metalik parçaları sıcak gazların ve çevresel diğer etmenlerin olumsuz etkilerinden korumaktadır [16].



Şekil 2.8 : Modern bir gaz türbininde termal bariyer kaplama kullanımı [17].

TBK'larda kullanılan bileşenlerin yüksek sıcaklıkta meydana gelen gerilme koşullarına, korozif ortam ve sıcaklık değişimlerine dayanabilmeleri gerekmektedir. İhtiyaç duyulan bu özelliklerin tek başına bir katman ile karşılanabilmesi güç olduğu için kompleks TBK sistemleri geliştirilmiştir [18]. Tipik bir TBK sistemi Şekil 2.9'da gösterilmiştir.



**Şekil 2.9 :** Termal bariyer kaplamaların şematik görünümü [17].

Bir TBK sistemi birbirlerinden farklı malzeme özelliklerine (mekanik, kimyasal, termal) sahip olan en az dört katman halinde değerlendirilebilir. Bunlar; (1) metalik altlık, (2) bağ katmanı, (3) ısı etkiyle büyüyen oksit katmanı ve (4) seramik üst katmandır. Seramik üst katmanın düşük termal iletkenliğe sahip olması maruz kalınan yüksek sıcaklığın alt katmanlara iletilmesini zorlaştırmakta ve bu sayede ana metalin daha uzun süre kullanılmasını sağlamaktadır [19].

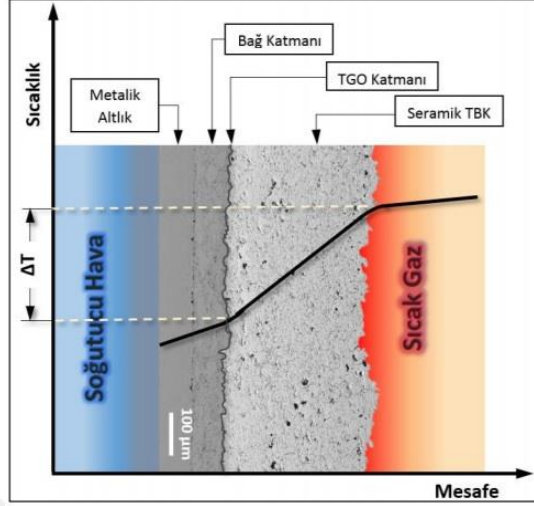
Metalik bağlanma katmanı ise altlık ve seramik üst katman arasındaki termal genleşme katsayısı farkını kompanse ederek üst seramik katman ile alt metalik katmanın bağlanma mukavemetini artırır. Bunun yanında bağlanma katmanı, üst seramik katmanın oksijen geçirgenliğinden dolayı oluşabilecek korozyondan alt malzemeyi korur.

Isıl etkiyle büyüyen oksit (TGO) katmanı ise kaplama prosesinde uygulanmaz; yüksek sıcaklıktaki operasyon koşullarında kendiliğinden meydana gelir. Seramik katmanın oksijen geçirgenliğinden dolayı bağlanma katmanı – seramik arayüzünde bulunan oksijen ve bağlanma katmanında bulunan alüminyum birleşerek seramik üst katman ve bağlanma katmanı arasında koruyucu bir alümina ( $Al_2O_3$ ) tabakası oluşturur [20].

Seramik üst katman sayesinde metalik altlığa etki eden sıcaklığın düşmesi ve bu sayede kullanım ömrünü artırması yanında türbin motorunun daha yüksek sıcaklıklarda çalışmasını da sağlayarak motorun verimini arttırmaktadır [19]. Seramik üst katmanın düşük termal iletkenliğe sahip olması nedeniyle metalik altlığa doğru 100-150°C'lik bir ısıl gradyan oluşmaktadır [20]. TBK sistemi içinde



sıcaklık düşüşü Şekil 2.10'da gösterilmiştir. Ana metalik malzemeye etki eden 10 – 15 °C'lik bir artışın malzemenin sürünme ömrünü yarıya indirdiği bilinmektedir. Bu nedenle metalik malzemeye etki eden sıcaklığın neden hassas bir şekilde kontrol edilmesi gerektiği ve bu durum TBK sisteminin önemini ortaya koymaktadır [21].



**Şekil 2.10** : Termal bariyer kaplamalarda sıcaklık düşüşü [17].

Termal bariyer kaplamalar EB-PVD, APS, VPS, HVOF gibi yöntemler ile uygulama alanına göre seçilecek yöntemler ile üretilebilir. Herbir kaplama prosesinin kendine özgü özellikleri bulunmaktadır. Termal bariyer kaplama üretim yöntemlerinden endüstride en çok kullanılan yöntem APS yöntemidir.

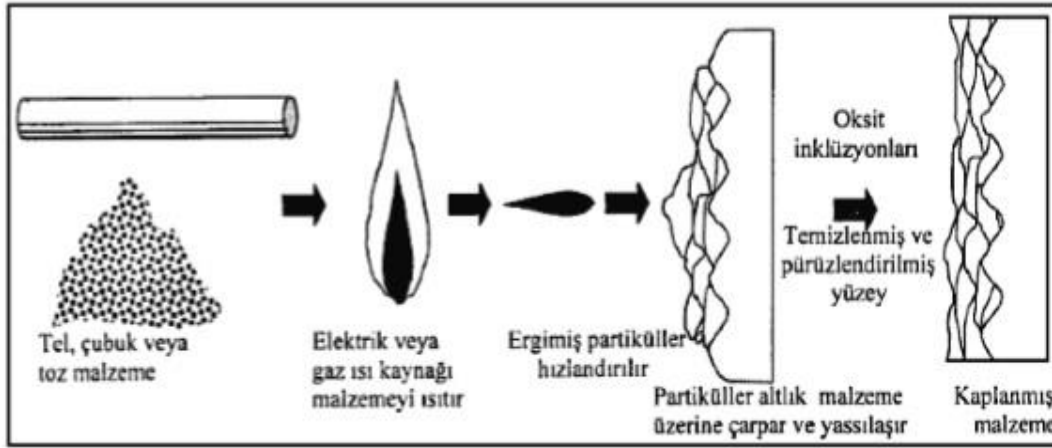
### 2.2.1 Atmosferik plazma sprey yöntemi (APS)

Atmosferik plazma sprey prosesi ısı püskürtme yöntemlerinden biridir. Yöntemin daha iyi anlaşılabilmesi için ısı püskürtme yöntemlerinin incelenmesi gerekmektedir.

Isıl püskürtme yöntemi yüzeylerin aşınma ve korozyona karşı korunmasında endüstride geniş bir kullanım alanına sahip bir işlemdir [22 – 24]. Bu yöntemin en geniş kullanım alanı, makine parçalarıdır. Yöntem, süper alaşımların özel kaplamalarında ve gaz tribün mühendisliğinde kullanılmaktadır [25]. Aşınmış veya hatalı işlenmiş parçalar, söz konusu olan probleme göre seçilmiş metal püskürtülerek eski ya da gerekli ölçülerine getirilebilir. Isıl püskürtme cihazındaki işlem parametrelerindeki ve kullanılan malzeme bileşimindeki teknolojik ilerlemeler, yeni ve potansiyel uygulamaların çeşitliliğini de beraberinde getirmiştir. Ergitilmiş metalle yapılan kaplama, aşınmanın sorun olduğu her yerde geniş uygulama alanı bulur. Isıl püskürtme işlemi; ince öğütülmüş metal, metal oksit veya plastikleri,

ergimiş veya yarı ergimiş durumda, uygun bir alt malzeme üzerine tutunarak kaplanma veya bir yapısal şekil oluşturmak üzere yapılan bir dolgu yöntemidir.

Isıl püskürtme kaplama teknikleri, tel veya toz halindeki kaplama malzemelerinin bir püskürtme tabancasında taşıyıcı, yanıcı ve yakıcı gazların eşliğinde püskürtülerek altlık üzerinde biriktirilmesi ve koruyucu tabakanın elde edilmesi esasına dayanan işlemlerdir. Isıl püskürtme torcu; yanıcı gazlar elektrik arkı veya plazma arkı ile kaplama malzemesini ergetmek için gerekli olan sıcaklığı elde eder [26]. Toz püskürtmede ince parçacıklar yüksek ısı kaynağının içinden geçerek ergimiş ya da yarı ergimiş duruma gelirler. Ergiyen kaplama malzemesi kaplanacak olan parçanın soğuk olan yüzeyine püskürtülür. Yüzeye darbe etkisiyle çarpan tanecikler, düzleşmekte ve alt malzemeye olan ısı transferi ile soğuyarak katılaşmaktadır. Birbirleri ile temas haline gelen bu tanecikler malzeme yüzeyinde kaplama tabakasını meydana getirmektedirler. Kaplama işleminin şematik görünümü Şekil 2.11’de verilmiştir. Kaplama genellikle mekanik bağlanma ve bölgesel olarak çeşitli sınıflarda kimyasal bağ kuvvetleri ile oluşmaktadır [27]. Bağlanmanın daha iyi olması için malzeme yüzeyi kaplama öncesinde yüzey pürüzlendirme işlemine tabi tutulur.



Şekil 2.11 : Isıl kaplama tekniklerinin şematik gösterimi [28].

Isıl püskürtme işleminin diğer kaplama yöntemlerinden farklı bazı özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Alt tabakaya tutunma: Malzemeye uygulanan yöntemle ilgili olarak, kaplama ve alt tabaka arasındaki bağın kuvvetli olması çok önemlidir.
- Bileşim ve distorsiyondan dolayı kaynak yolu ile kaplama işlemine uygun olmayan yüzeye kaplama yapılmasına olanak sağlar.

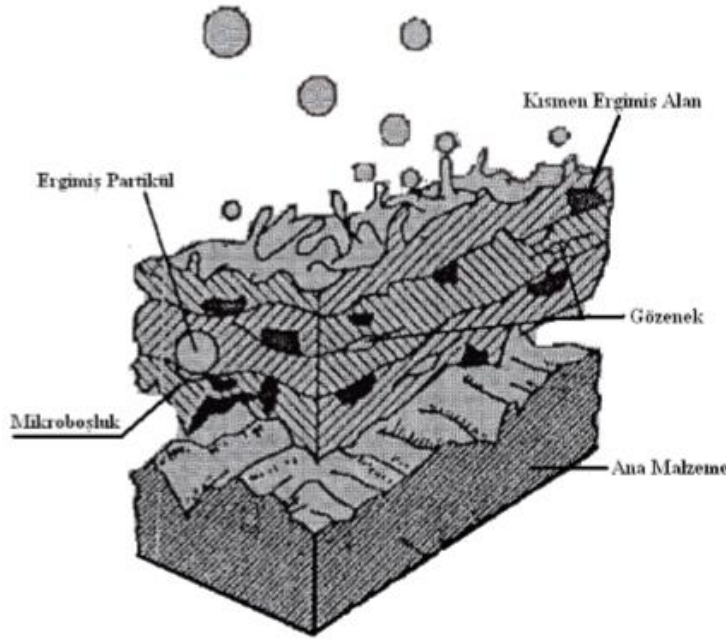
- Püskürtülen dolgu, kaynak yöntemiyle kaplamaya göre daha ince tabakalar halinde uygulanabilir.
- Çoğunlukla kararlı sıvı faz içeren malzemelere; metallere, seramiklere, karbürlere, kompozitlere ve plastiklere bu yöntem uygulanabilir.

Isıl püskürtme yöntemlerinin çeşitli özellikteki kaplamaların gerçekleştirilmesi amacıyla farklı ısıl püskürtme yöntemleri geliştirilmiştir. Sıcaklık, partikül hızı, kullanılan gaz gibi kaplama tabakasının özelliklerini etkileyecek parametrelerin değiştiği bu yöntemler; alevle püskürtme, yüksek hızlı oksî-yakıtlı (HVOF), plazma püskürtme, patlamalı püskürtme, ark püskürtme vb. yöntemlerdir [29 – 31].

Plazma, ilk kez 1929'da Langmuir tarafından iyonlarına ayrıışmış, aynı sayıda serbest elektron ve pozitif iyon içeren yoğunlaştırılmış bir gaz olarak ifade edilmiştir. Yüksek sıcaklıkta ısıtılan gaz molekülleri önce atomlarına ayrılır, sonra atomlardan dış yörünge elektronlarının kopması sonucu pozitif yüklü iyonlar oluşur [32]. İyonlarına ayrıışmış gaz olan plazma; iyon, elektron, uyarılmış atom, foton, nötr atom veya molekül içeren bir karışımdır. Plazma maddenin katı, sıvı ve gaz hallerinden oldukça farklılık göstermesinden dolayı maddenin dördüncü hali olarak kabul edilir. Sıcaklık 8000 K üzerinde bulunursa, madde katı ve sıvı halini koruyamaz. Sıcaklığın 10000 K'in üzerine çıkmasıyla da bütün atomlar ve moleküller iyonlaşır. Plazma haline geçiş için gaz halindeki maddeye enerji vermek gerekir. Gerekli olan bu enerji; ısı, ışın, manyetik ve elektrik enerjisi şeklinde verilebilir [33].

Plazma püskürtme, 1960'lı yılların ortasından bu yana endüstriyel uygulamalarda kullanılan bir yöntemdir ve modern endüstri tarafından ihtiyaç duyulan yüksek performanslı yüzeylerin üretimi için faydalanılan en önemli teknolojilerden birisidir [34]. Isıl püskürtme yöntemlerinden bir tanesi olan plazma püskürtme yöntemi, alevle püskürtme yönteminin gelişmiş halidir. Alevle püskürtmede kullanılan oksî-asetilenin, ark püskürtmede ise elektrik arkın düşük sıcaklıklara sahip olmasından dolayı bu yöntemlerde bazı sınırlamalar gelmiştir. Örneğin alevle püskürtme yönteminde 2700 °C'nin üstünde ergime derecesine sahip bir malzeme ergitilemez. Bu aşamada plazma püskürtme sistemi devreye girmektedir. Plazma püskürtme sisteminde alevle püskürtme sistemi ile gerçekleştirilen kaplama tabakalara göre daha yoğun kaplama tabakaları elde edilmektedir [35]. Plazma püskürtme sisteminde koruyucu gaz altında püskürtme yapılmasından dolayı, hava ile ergiyen patiküllerin

teması ile oluşabilecek oksitlenmeler oldukça azalmıştır. Ticari plazma torçları ile 17000 °C'ye kadar ulaşan sıcaklıklar elde edilebilmektedir. Bu sıcaklık malzemenin ergime derecesinden çok yüksek olan bir sıcaklıktır. Yapılan bir çok püskürtme uygulamasında, optimum sıcaklık değeri 6500-11000°C aralığında seçilmektedir [36]. Seramik ve yüksek ergime sıcaklığına sahip metal ve alaşımlarının kaplanabilmesine olanak sağlayan bu sistem uluslararası teknikler içerisinde önemli bir paya sahiptir. Sistemde kaplama tabakasının özellikleri çeşitli parametrelerin değiştirilmesine bağlı olarak değişmektedir. Bu parametreler; gaz akış oranları, elektrik akımı, gerilim ve toz besleme ayarları gibi çeşitli değişkenlerdir. Alt malzeme yüzeyinde oluşturulan kaplamaların yaklaşık olarak % 90'ı önemli ölçüde aşınma direnci sağlamaktadır [21,37]. Şekil 2.12'de plazma püskürtme sistemi ile gerçekleştirilen kaplamaların genel yapısını ifade eden sistematik bir şekil görülmektedir.



**Şekil 2.12 :** Plazma püskürtme yöntemi ile üretilmiş kaplamanın şematik görünümü [28].

### 2.2.1.1 Plazma püskürtme sistemi

Plazma püskürtme sistemi çeşitli kısımlardan oluşan kompleks bir sistemdir; güç kaynağı, toz besleme ünitesi, gaz tüpleri ve kontrol paneli, soğutma sistemi ve plazma torcundan oluşmaktadır [28].



**Şekil 2.13** : Atmosferik plazma sisteminin şematik gösterimi [28].

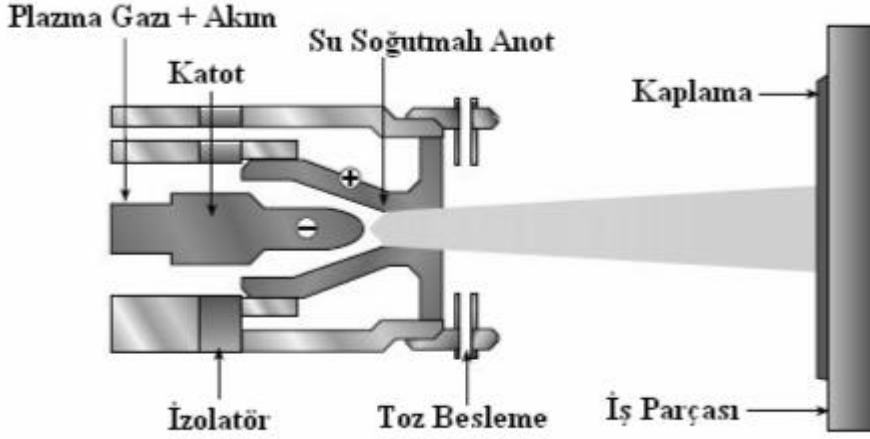
Şekil 2.13’de şematik gösterimi verilen plazma kaplama sisteminin çalışabilmesi için gerekli olan elektrik enerjisini sağlayan güç kaynağı, uygulanan kaplamaların özelliklerine etki etmektedir. Başlarda 40 kW gücünde olan güç kaynaklarının zamanla değerleri yükseltilerek 80, 120 ve 220 kW gücünde güç kaynakları kullanılmıştır. Güç kaynaklarının değerlerindeki bu artış ile anot ile katot arasındaki potansiyel farkı artar. Dolayısıyla katottan yayılan ve anoda doğru yönelen serbest elektronların hızında bir artış söz konusu olur. Bu artış püskürtme hızına etki eder. Kaplanacak tozların alt malzeme yüzeyine hızla çarpması daha yoğun kaplamaların üretilmesini sağlamaktadır[38].

Kaplama esnasında malzeme yüzeyine kaplanacak tozların taşınmasını toz besleme ünitesi sağlamaktadır. Farklı ebat ve şekle sahip tozların belirlenmiş olan oran ve hızlarda, malzeme yüzeyine püskürtme işlemini gerçekleştiren plazma tabancasına taşınmasını sağlamaktadır. Toz besleme ünitesinin parametreleri, en uygun sonucu elde etmek amacıyla tozları üreten firmanın belirlediği şekilde ayarlanıp uygulanmaktadır.

### 2.2.1.2 Kaplama prosesi

Plazma püskürtme sisteminde katot ve anot arasındaki ark ile  $Ar + H_2$  gazının iyonize olması sonucu elde edilen plazma ışınının 6500 – 10000K değerlerine ulaşmaktadır. Bu sıcaklık değerlerine ulaşan plazma, genişlemenin yarattığı basıncın da etkisi ile alt malzeme yüzeyine doğru itilir. Kaplanacak olan toz malzeme, plazma ışını içerisine gönderilerek yüksek sıcaklıkta ergimesi sağlanır ve alt malzeme yüzeyine püskürtülür. Püskürtme esnasında tozların hızı yaklaşık 300 ile 550 m/s arasındadır. Taneciklerin ulaştığı yüksek sıcaklık ve hız sayesinde, yüksek

yoğunlukta alt malzemeye tutunan yüksek dayanımlı kaplamalar elde edilebilmektedir. Plazma püskürtme işleminin şematik olarak gösterilişi Şekil 2.14'de verilmiştir.



**Şekil 2.14 :** Kaplama Prosesinin Şematik Görünümü [28].

Plazma püskürtme sisteminde kaplama kalınlıkları genellikle 0.05 ile 0.50 mm (0.002 ile 0.020 inç) arasında, kaplamaların yapışma mukavemeti de 34 MPa (5000 psi) ile 69 MPa (10.000 psi) arasında değişmektedir. Ergimiş damlaların büyük miktarı alt malzeme yüzeyine çarparak yassılaşır ve hızlı bir şekilde katılarak ( $\approx 106$  K/s) katmanlı tabaka şeklinde bir yapı halini alır. Kaplama tabakası çok katmanlı yapıdan meydana gelmektedir. Bu özel yapıda katmanlı tabakalar arası ara yüzeyde zayıf bir bağlanma meydana gelmektedir. Tabakalar arası boşluklar ve ara yüzeyde meydana gelen çatlamlar, kaplama tabakasının karakterini oluşturur[39].

## 2.2.2 Termal bariyer kaplama sistemi

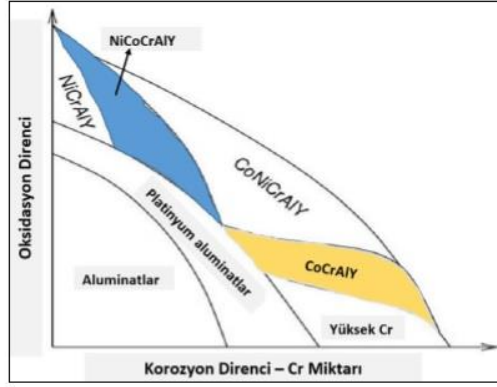
### 2.2.2.1 Altlık

Genellikle nikel ve demir-nikel esaslı süper alaşımlar, gaz türbin motorlarının türbin bıçaklarında; nikel ve kobalt esaslı süper alaşımlar, yanma odalarında ve kobalt esaslı alaşımlar ise nozüllerde kullanılmaktadır. Uçaklarda kullanılan bir gaz türbin motoru ağırlığının yaklaşık %50'sini Nikel esaslı süper alaşımlardan üretilen parçalar oluşturmaktadır [40]. Süper alaşımlar ergime noktalarına yakın sıcaklıklarda dahi mekanik özelliklerini koruyabilmektedirler. Ancak yüksek sıcaklık koşullarında bağ katman ve metalik altlık arasında difüzyon meydana gelmektedir. Difüzyon sonucunda malzemenin kimyasal yapısı bozulur [41].

Termal bariyer kaplamanın uygulamalarında metalik altlık yüzeyinin hazırlanması, kaplama mukavemeti açısından son derece önemlidir. Bu işlemler sırasıyla kumlama, temizleme, ön ısıtma ve bağlanma katmanının uygulanması adımlarını içerir. Kumlama işlemi ile metalik malzemenin yüzeyi pürüzlendirilir. Bu sayede spreylene malzemenin altlık malzemeye iyi yapışabilmesi sağlanır. Yüzeyin temizlenmesindeki amaç kumlama prosesi sonrasında yüzeyde kalan tozların ve yabancı maddelerin yüzeyden uzaklaştırılmasıdır. Ön ısıtmadaki amaç ise yüzeydeki nemi uzaklaştırarak, ilk kaplama parçacıklarının kuru bir yüzey ile temas etmesini sağlamaktır. Ancak ön ısıtmanın uzun süre yapılması, oksidasyona neden olacağından yapışmayı olumsuz etkilemektedir [42].

#### **2.2.2.2 Bağlanma katmanı**

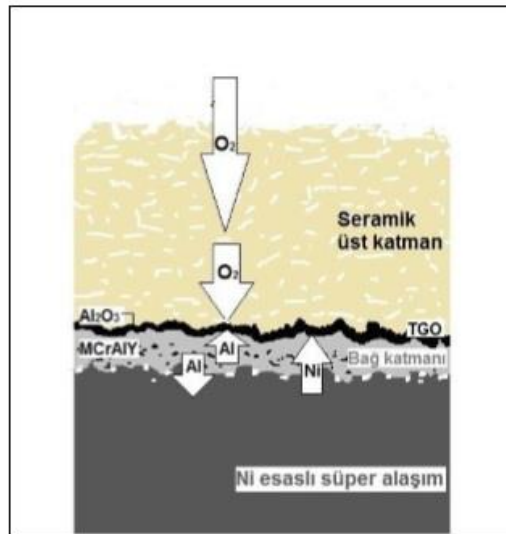
MCrAlY bağlanma katmanı üretimi için EB-PVD (elektron beam-fiziksel buhar biriktirme), APS, LPPS (düşük basınç plazma spreyleme) ve HVOF teknikleri uygulanabilir. Şekil 2.15'te bağlanma katmanı üretimi için kullanılacak malzemelerin korozyon – oksidasyon direnci grafiği gösterilmiştir. Her bir yöntem bazı avantaj ve dezavantajlara sahiptir. EB-PVD'nin yüksek maliyetine rağmen bu yöntem ile iyi bir yapışma mukavemeti ve düşük pürüzlülükte bir bağlanma katmanı elde edilir. APS yöntemiyle ince eşeksiz ve homojen bir kaplama elde edilir. Ayrıca, eğer atmosferik plazma spre yöntemi kullanılırsa bağ katmanı bileşimindeki reaktif elementler oksitlenecek ve kaplama yoğun porozite içerecektir. HVOF yönteminde spreyleme esnasında düşük toz sıcaklığı ve yüksek partikül kinetik enerjisi diğer yöntemlere göre avantajlı özelliklerdendir. Ayrıca yoğun bir kaplama yapısı elde edilir ve katmanın mukavemeti yüksektir [43]. Mekanik kilitleme ve füzyon-difüzyon olayları bağlanma katmanının altlık malzemeye bağlanma mekanizmalarıdır. Yüzeye çarpan parçacıkların sıcaklığı, altlık malzemesini ergetebilecek kadar yüksek ise parçacık ile birleşme (füzyon) söz konusudur ve mikroskobik boyutta bir alaşım katmanı oluşur. Ergime mümkün olmadığında ise parçacık ile yüzey arasındaki etkileşim katı-hal difüzyonu ile açıklanabilmektedir. Difüzyon sonucunda da yüzey üzerinde alaşım katmanı oluşabilir. Füzyon ya da difüzyon oluşma derecesi kaplamaya, altlık malzemesinin metalurjik yapısına bağlıdır [42].



Şekil 2.15 : Bağlanma katmanında kullanılan malzemelerin korozyon – oksidasyon direnci [44].

### 2.2.2.3 Isıl etkiyle büyüyen oksit tabakası

Şekil 2.16’da görüldüğü gibi, yüksek sıcaklıktaki servis şartlarında bağ katmanının oksidasyonu seramik üst katman – bağ katmanı arayüzeyinde  $\alpha$ - $Al_2O_3$  katmanının oluşumunu sağlar. MCrAlY formundaki bağ katmanında bulunan alüminyum, seramik üst katman – bağ katman ara yüzeyine difüze olur. Aynı zamanda yüksek sıcaklıkta seramik üst katmanın sahip olduğu oksijen geçirgenliği ile seramik katman – bağ katman arasına iletilen oksijenler alüminyum ile buluşur ve  $Al_2O_3$  formunda TGO tabakasını meydana getirir [45]. TBK kullanım sıcaklıklarında, seramik katmandan sürekli oksijen ve bağ katmandan ise alüminyum difüzyonu gerçekleşir ve bu nedenle TGO kalınlığı zamanla artar. Uygulamada kalınlığın 1-10  $\mu m$  arasında değiştiği görülmekle beraber, 6  $\mu m$ ’den daha kalın TGO katmanına sahip kaplamaların termal çevrim ömründe belirgin bir düşüş olduğu bildirilmektedir [46].



Şekil 2.16 : Isıl etkiyle büyüyen oksit tabakasının oluşumunun gösterimi[17].



TGO katmanı olan  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, diğer oksit formlarının oluşmasını baskılayan bir bariyer görevi yapar. Buna bağlı olarak altlık malzemesinin ömrü uzar [46]. Ancak TGO katmanı, kaplamanın tabaka halinde seramik üst katman – bağ katmanı arayüzeyinden kopmasına neden olur. Bunun nedeni termal genleşme katsayısı; bağ katman ve seramik üst katmanınkinden farklı olan TGO tabakasının kalınlık artışıyla meydana gelen gerilmelerdir.

#### 2.2.2.4 Seramik katman

TBK sisteminde seramik üst katman, doğrudan doğruya sıcak akışkana temas halinde bulunan katmandır ve en önemli görevi ısı geçirgenliğini düşürerek metalik altlık malzeme üzerine etki eden sıcaklığı düşürmektir. Isıl yalıtım özelliğinin yanı sıra seramik üst katmandan beklenen bir diğer önemli özellik de altlık malzemeyi korozyon, erozyon ve diğer çevresel zararlardan korumaktır. Bu nedenlerle seramik üst katmanın sahip olması gereken temel özellikler şu şekilde sıralanabilir;

- Yüksek ergime sıcaklığı (>2173K)
- Düşük termal iletkenlik ( $10 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ )
- Altlık malzemeye yakın termal genleşme katsayısı
- Düşük sıcaklıklardan (25°C) yüksek sıcaklıklara (~1200°C) kadar faz dönüşümü oluşmaması
- Bağlanma katmanına iyi yapışabilme
- Poroz mikroyapı
- Korozyon, erozyon ve oksitlenmeye karşı yüksek direnç

Söz konusu özelliklere ulaşabilmek için gerekli parametreler; seramik malzeme cinsi, üretim yöntemi ve dizayndır [47– 49].

Bu malzeme özelliklerinden en kritik olanları; termal iletkenlik, termal genleşme katsayısı ve yüksek ergime sıcaklığıdır. Düşük termal iletkenlik; termal bariyer kaplama malzemesinden beklenen en temel özelliktir ve TBK'nın ısı iletiminin yavaş olması korunan malzeme açısından önem taşır. Düşük termal iletkenliğe sahip bir malzeme, daha yüksek sıcaklıklarda çalışma imkanı sağlar. Seramik üst katman malzemesinden beklenen temel özelliklerden bir diğeri altlık malzemeye yakın termal genleşme katsayısına sahip olmasıdır. Bunun sebebi, taban malzeme olarak kullanılan metalik malzeme ile ısıl çevrim süreci içerisinde termal genleşme farklılığından kaynaklanan gerilmeleri ve bu nedenle oluşacak hasarı azaltmaktır

[50]. Ergime noktasının yüksek olması ise daha yüksek türbin giriş sıcaklıklarında çalışmaya imkan tanıyarak motor verimliliğini arttırmıştır.

Bu özelliklere sahip ve uzun süredir ticari uygulamalarda kullanılan İtريا ile kararlı hale getirilmiş zirkonya (YSZ) üzerine bir çok çalışma yapılmış olup geliştirme süreci devam etmektedir. YSZ'ye alternatif malzeme üretim ve kullanım açısından bir çok çalışma yapılmaktadır [51]. Malzeme ve proses geliştirme süreci için YSZ'nin incelenmesi önemlidir.

### **2.2.3 Termal bariyer kaplamalarda kullanılan malzemeler**

#### **2.2.3.1 Müllit**

Düşük yoğunluğu, yüksek termal kararlılığı, düşük termal iletkenliği, yüksek sürünme dayanımı ve mukavemeti sebebiyle müllit önemli bir seramik malzemedir. Müllit,  $\text{SiO}_2$  ve  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 'ün bir bileşimidir. Oksitlenmeye karşı direnci YSZ'den çok daha fazla olsa da, daha düşük termal genleşme katsayısına ve daha yüksek termal iletkenliğe sahiptir. Müllit, gaz türbinlerinden daha düşük sıcaklıklarda çalışan dizel motorlar gibi sistemler için iyi bir kaplama malzemesidir. Müllit kaplamaların düşük sıcaklıklarda ömrü, YSZ ile oluşturulan kaplamalardan daha uzundur. Ancak;  $1000^\circ\text{C}$ 'nin üzerindeki sıcaklıklarda termal çevrim ömrü, faz dönüşümü sonucu ortaya çıkan hacim daralması sebebiyle çok daha kısadır [42, 45, 47].

#### **2.2.3.2 Alümina**

Alüminyum oksit'in tek kararlı fazı  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 'dür.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  son derece sert ve kararlıdır.  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  fazının YSZ kaplamalara yeterli miktarda eklenmesiyle, bu kaplamaların sertlik ve bağlanma mukavemeti değerlerinde artış görülür. Ancak plazma sprey yöntemiyle kaplanmış alümina katmanı genel olarak  $\gamma$  ve  $\delta\text{-Al}_2\text{O}_3$  gibi kararlı olmayan bir çok faz içerir. Kararlı olmayan bu fazlar termal çevrim sırasında  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  kararlı fazına dönüşler ve bu dönüşümü takiben %15 oranına kadar hacim değişikliğine uğrarlar.  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  gibi geçiş metal oksitlerinin katkılarıyla  $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$  fazı ancak yarı kararlı faza dengelenir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , YSZ'ye göre daha düşük termal genleşme katsayısı ve yüksek termal iletkenliğe sahip olduğundan dolayı TBK için tek başına yeterli değildir. Ancak ilave olarak YSZ'ye katıldığında kaplamanın sertliğini ve oksitlenme direncini artırma potansiyeli vardır [42, 45, 47].

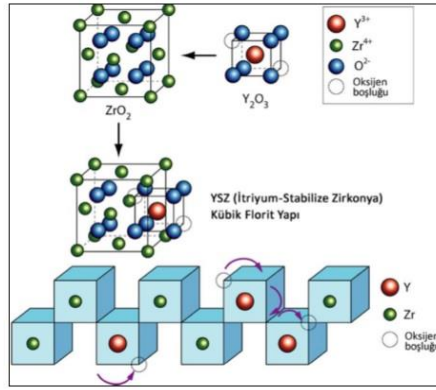
### 2.2.3.3 Yitriya ile kararlı hale getirilmiş zirkonya (YSZ)

Saf haldeki zirkonya ( $ZrO_2$ ), yüksek ergime sıcaklığına ( $2680\text{ }^\circ\text{C}$ ) ve düşük termal iletkenliğe ( $1,6\text{ W/mK}$ ) sahiptir. Ancak oda sıcaklığı ile çalışma sıcaklıkları arasında faz dönüşümleri meydana gelmesi, zirkonya ile ilgili karşılaşılan en büyük sorundur. Oda sıcaklığında monoklinik yapıda olup  $1170\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin üzerinde tetragonal faza dönüşüm göstermektedir.

Zirkonyanın tetragonal – monoklinik faz dönüşümü martenzitiktir. Bu faz dönüşümü yüksek sıcaklıklardan düşük sıcaklıklara inildiğinde oluşur ve %3-5 oranında hacim artışına neden olur. Hacim artışının sonucunda malzeme bünyesinde iç gerilmeler meydana gelir ve çatlak oluşumuna neden olur. Bu sebeple,  $ZrO_2$ 'nin kullanılabilmesi için uygun elementlerle stabilize edilmesi gerekmektedir.  $ZrO_2$ 'nin stabilize edilmesinde en yaygın olarak kullanılan malzeme yitriyadır ( $Y_2O_3$ ). Üretilen alaşımdaki  $Y_2O_3$  oranı malzemenin kullanılacağı yere ve uygulama yöntemine göre değişebilir. Ağırlıkça %6 – 8 oranında  $Y_2O_3$  içeren kısmi stabilize zirkonya, hem termal iletkenlik hem de termal genleşme özellikleri bakımından uçak motorlarında TBK uygulaması için elverişlidir [52]. Yitriya ile kısmi stabilize zirkonya termal bariyer kaplama uygulamalarında yüksek termal çevrim dayanımına sahip olması nedeniyle tercih edilmektedir. YSZ'nin özellikleri Çizelge 2.1'de verilmiştir. Kısmi kararlı zirkonya, kübik (k) ve yarı kararlı tetragonal (t') fazlarından oluşmaktadır.  $ZrO_2$ 'nin  $Y_2O_3$  ile stabilizasyonu sonucunda oluşan kararlı kübik florit yapısı Şekil 2.17'de verilmiştir.  $Y_2O_3$ 'ün saf  $ZrO_2$ 'ye ilavesi sonucunda  $Y^{3+}$  iyonları  $ZrO_2$  kafesindeki  $Zr^{4+}$  iyonlarının yerini alır. Bu durumda  $Y_2O_3$ 'ün sahip olduğu üç  $O^{2-}$  iyonu  $ZrO_2$ 'nin sahip olduğu dört  $O^{2-}$  iyonlarının yerini alır. Bunun sonucunda oksijen boşlukları oluşur. Bu nedenle YSZ yüksek oksijen geçirgenliğine sahiptir [42, 45, 53].

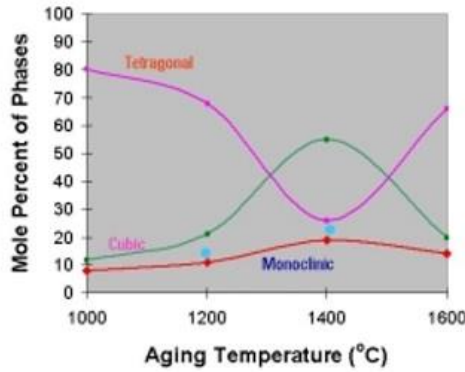
Çizelge 2.1 : YSZ'nin özellikleri

Özellik	Değer
Ergime Sıcaklığı	$2700\text{ }^\circ\text{C}$
Termal İletkenlik	$2,3\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$
Termal Genleşme Katsayısı	$11 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$
Yoğunluk	$6,4\text{ g/cm}^3$



Şekil 2.17 : YSZ içinde oksijen boşluklarının oluşumu [54].

YSZ'nin en büyük dezavantajı uzun süreli uygulamalarda maksimum kullanım sıcaklığının  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında tutulması gerekliliğidir. Şekil 2.18'de YSZ'nin sıcaklıklara göre faz dağılımı verilmektedir. Şekil 2.18'de görüldüğü gibi  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  üzerinde faz dönüşüm oranları artmaktadır. Bu nedenle YSZ çalışma sıcaklığının  $1200\text{ }^\circ\text{C}$ 'nin altında tutulması gerekmektedir. Eğer  $1200\text{ }^\circ\text{C}$  ve üzeri çalışma koşullarında YSZ kullanılırsa yarı kararlı tetragonal fazdan; tetragonal ve kübik (t+c) faza ve ardından da monoklinik (m) faza dönüşüm meydana gelir [47]. Sonuç olarak malzemede hasar oluşur.



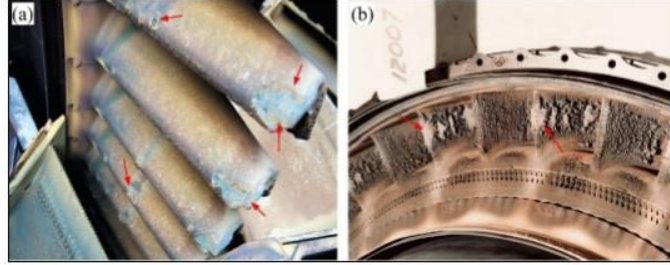
Şekil 2.18 : YSZ'nin sıcaklığa göre faz dönüşüm oranları [55].

Türbin motorlarındaki gelişmelerle daha yüksek gaz sıcaklıklarına çıkılmaktadır. Bu nedenle YSZ kullanım kısıtlamalarının üstesinden gelebilecek seramik malzemelerin TBK olarak kullanılması amacıyla çalışmalar yoğunlaştırılmıştır [51].

#### 2.2.4 Termal bariyer kaplamalarda hasar oluşumu

Birbirinden oldukça farklı fiziksel, mekanik ve termal özellikleri bulunan ve altlık, bağ katmanı, TGO tabakası ve seramik üst katmandan oluşan TBK sistemi; çalışma koşulları altında özellikle yüksek sıcaklığın da etkisiyle TBK yapısını zorlayıcı şartlar altında çalışır. Bu yüzden türbin motorlarının bıçakları ve yanma odası gibi

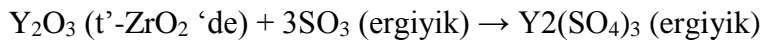
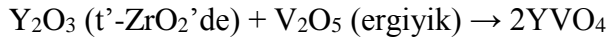
yüksek sıcaklığa maruz kalan bölgelerinde TBK sisteminde katmanların ayrılması ve dökülme ile sonuçlanan hasar mekanizmaları mevcuttur (Şekil 2.19). Bunlardan, sıcak korozyon, kalsiyum – magnezyum – alüminyum – silikat hasarı, termal şok/ termal çevrim hasarı alt başlıklar halinde özetlenmiştir [56].



Şekil 2.19 : Gaz türbinlerinde kullanılan TBK'ların hasarları [17].

#### 2.2.4.1 Sıcak korozyon

Türbin yakıt kirliliklerinden kaynaklı metal tuzları TBK ile reaksiyona girerek sıcak korozyon ortamında YSZ'nin kararlılığını olumsuz etkilemektedir. Özellikle kalitesiz yakıtta bulunan Na, S ve V gibi elementlerin, türbin bıçağı yüzeyinde düşük sıcaklıklarda (950 °C) eriyen Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tuzlarını oluştururlar. Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ve V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tuzları TBK yüzeyinde eriyerek, porozitelere penetre olur ve yitriya ile reaksiyon 1 ve 2'ye göre tepkimeye girer. Sonuç olarak YVO<sub>4</sub> ve Y<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> camı yapılarını oluşturarak TBK'nın hasara uğramasına neden olur.



#### 2.2.4.2 CMAS hasarı

CMAS, silika içeren toz, kum veya volkanik küller olarak ifade edilir. Genel olarak silika oranınca zengin olmakla beraber bileşimleri farklılık gösterir. Bu küller TBK'ların hasara uğramasına neden olmaktadır. Türbin motoruna havadan çekilen CMAS, motorun yüksek sıcaklık bölgelerinde (>1000 °C) eriyerek kaplamaların poroz yapısı içine penetre olurlar [57 – 61]. Sıcaklığın düşmesiyle katılaşırlar, termal genişleme katsayısının düşük olması nedeniyle kaplamada yüksek oranda gerilmeye ve sonuç olarak hasara neden olur.

#### 2.2.4.3 Termal çevrim – termal şok

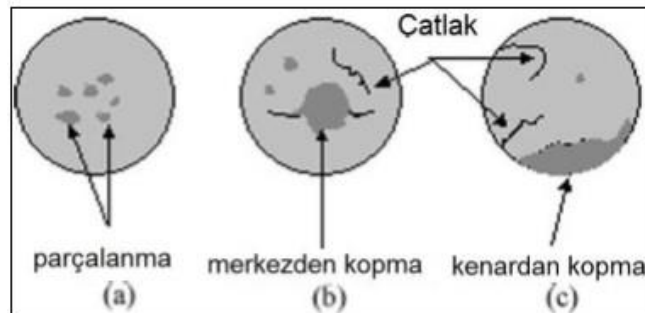
Genellikle termal çevrim, TBK'ların hasarında en etkin olan mekanizmadır. Aynı malzemenin termal çevrim hasarında;

- Üretim yöntemi
- Bağ katmanı malzemesi
- TBK'nın kullanım yeri

gibi parametreler de söz konusudur. Örneğin uçak jet motorlarında kullanılan TBK'lar daha fazla sayıda termal çevrime uğrarken güç üretim sistemlerinde kullanılan türbin motorları daha az sayıda termal çevrim şartlarında çalışır. Üretim yöntemi olarak APS ve EB-PVD; mikroyapı, morfoloji ve fiziksel özellikler bakımından farklılıklar gösterir. Bağ katman malzemesi olarak kullanılabilen MCrAlY ve Pt-alüminat esaslı malzemeler ile üretilmiş kaplamalarda TGO farklı karakteristik özellikler gösterir [51].

TBK'daki termal çevrim hasar prosesi; çatlak oluşumu, çatlakların ilerlemesi ve çatlakların birleşmesi olmak üzere üç adımda gerçekleşir. İlk olarak küçük çatlaklar TGO bölgesine yakın yerlerde çekirdeklenir. Bu bölgelerde yükselen çekme gerilmesi nedeniyle çekirdeklenen küçük çatlaklar ilerler ve birleşir. Devam eden termal çevrim koşullarında kaplamada ayrılmalar meydana gelir [41].

Literatürde [62], termal şokun TBK'larda oluşturduğu hasar üç farklı sistem Şekil 2.20'de gösterilmiştir. Bunların ilki küçük parçalar halinde kaplamamın orta kısımlarının ayrılmasıdır. Bu şekilde gerçekleşen bir hasarın derinliği yaklaşık 50µm olmaktadır. Merkezden ayrılma, yüzey çatlakları ve büyük parçaların merkezden kopması olarak açıklanmaktadır. Kenardan ayrılma ise seramik üst katmanın kenar bölgelerinden büyük parçaların koparak hasarın iç kısımlara doğru ilerlemesi şeklinde meydana gelir. TBK'ların termal şok ile hasara uğramasında sıklıkla "kenardan kopma" mekanizması ile karşılaşmaktadır.



**Şekil 2.20** : Termal çevrim sonucunda oluşan hasarların şematik görünümü [63].

### 3. TERMAL BARIYER KAPLAMALARIN MODELLEME VE SİMÜLASYON ÇALIŞMALARI

#### 3.1 Yapay Sinir Ağları

Yapay sinir ağları, istatistiksel olarak belirlemenin zor olduğu, doğrusal bir yapıya sahip olmayan sistemlerin analiz ve benzetimi için bir çok alanda kullanılan sayısal bir yöntemdir. Mühendislik yaklaşımı açısından bir yapay sinir ağının kullanımı bir sonucun tahmin edilmesi, sınıflandırılması, ilişki kurulması, yorumlanması gibi alanları kapsamaktadır. [64 – 66]

Yapay sinir ağlarının kullanım alanlarından tahmin etme, henüz gerçekleşmemiş olayların nasıl sonuçlanacağını öngörmektedir. Örneğin bir alaşımın Cr oranının değişmesi ile ne kadar korozyona uğrayacağı ya da sistemde ne zaman kullanılamaz hale geleceğini tahmin etme bu sınıfa girmektedir.

Sınıflandırmanın kullanımı, özellikle istatistiksel olarak yorumlamanın yetersiz kaldığı ve sonucun gruplara ayrılmış olarak sunulabileceği sistemlerde yapay sinir ağlarının kullanım alanıdır. Örneğin bir kaynak hatasının, hangi hata gruba gireceğinin belirlenmesi sınıflandırma uygulaması olarak verilebilir.

İlişki kurma, bir sistemin deneysel olarak sonuçlarının belirlenmesinin uzun zaman alacağı problemlerin çözümünde kullanılmaktadır. Örneğin bir süper iletken alaşımının süper iletkenlik geçiş sıcaklığının element oranlarına göre belirlenmesi yapay sinir ağlarında ilişki kurma alanına uygun bir örnektir.

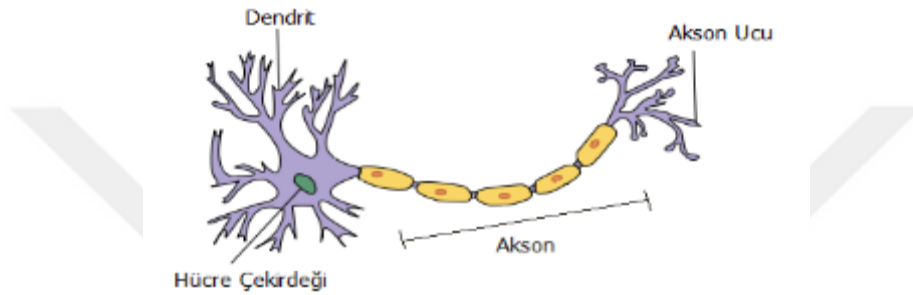
Yorumlama, özellikle bir problemin çözümü için izlenebilecek yolların belirlenmesinde kullanılabilir. Örneğin bir malzemeye uygun sertleştirme işlemlerinin maliyet ve süre açısından ele alınarak en uygun çözümün sunulması yapay sinir ağlarının yorumlama alanında kullanımına bir örnektir.

Yapay sinir ağları adından da anlaşılacağı gibi beynin çalışma ve en önemli özelliği olan öğrenmenin benzetimine dayalı bir sayısal yöntemdir. YSA'ların kullanımına ve örneklere geçilmeden önce YSA'ların çalışma mantığı anlaşılmalıdır. [64 – 66]

Yapay sinir ağları (YSA), yapay zeka yöntemlerinden biri olarak insan beyninin benzetimiyle çalışmaktadır. Benzetim sırasında insan beynini oluşturan sinir

hücreleri (nöronlar) temel alınmaktadır. Bilgisayarlar işlem gücü, hızı ve doğruluk açısından insandan daha yetkin olmalarına rağmen öğrenme gibi bir yeteneğe sahip değildir. YSA öğrenme kabiliyetini bilgisayarlara kazandırmayı amaçlamaktadır. Öğrenebilme kapasitelerinden dolayı klasik yöntemlerle çözümü zor olan problemler için kullanılabilir. [64 – 66]

Yapay Sinir Ağları biyolojik sinir hücrelerinin benzetimi ile oluşturulduklarından dolayı öncelikle biyolojik sinir ağları incelenmelidir. Şekil 3.1’de görüldüğü gibi bir nöron dört kısımdan oluşmaktadır. Bunlar dentrit, çekirdek, akson ve sinapstır (akson ucu ya da bağlantılar).



Şekil 3.1 : Biyolojik sinir ağının şematik gösterimi [67].

**Dentrit:** Sinir hüresinin ucunda bulunur. Dentritin hücre içindeki görevi bağlantılı olduğu sinir hücrelerinden gelen sinyalleri çekirdeğe iletmektir.

**Çekirdek:** Dentrit tarafından iletilen sinyalleri bir araya toplar ve aksona iletir.

**Akson:** Çekirdekten gelen toplanmış sinyalleri diğer sinir hücrelerine aktarmaktadır. Akson gelen sinyallerin ön işlemden geçmeden iletilmesine engel olur.

**Sinaps:** Aksondan gelen toplanmış sinyalleri ön işlemden geçirdikten sonra diğer sinir hücrelerine aktarmaktadır.

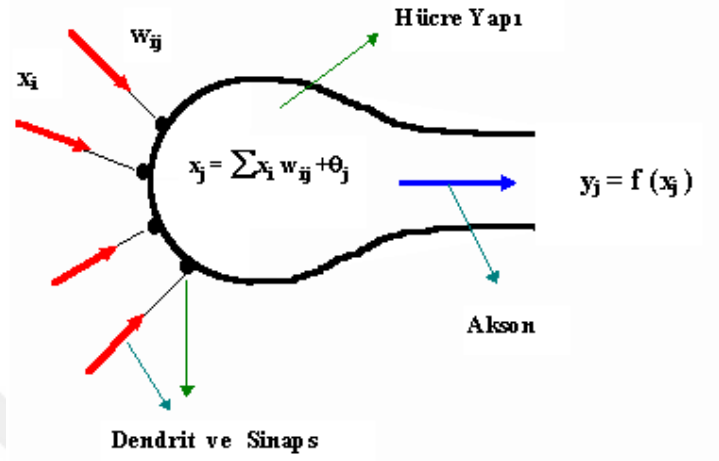
Ön işlem, gelen sinyalin belli bir eşik değerine göre değiştirilmesine verilen isimdir. Böylece, gelen toplam sinyal ile dendrite iletilen sinyal arasında ilişki kurulur. Öğrenme işleminin sinapsiste gerçekleştiği düşünülmektedir ve bu yaklaşım benzetilerek YSA’lar için teori haline getirilmiştir. YSA’lar için öğrenme akson ucu ve dentrit arasındaki ağırlık katsayısının güncellenmesidir.

### 3.1.1 Yapay sinir ağı ana öğeleri

Yapay nöronlar biyolojik nöronlar temel alınarak oluşturdukları için giriş sinyallerini aldıkları, bu sinyalleri toplayarak işlem yaptığı ve çıktıları ilettiği birimler bulunmaktadır. Bu birimlere proses elemanı denilmekte ve her bir YSA beş temel elemandan oluşur.



- Girdiler
- Ağırlıklar
- Toplama Fonksiyonu
- Aktivasyon Fonksiyonu
- Çıktılar



Şekil 3.2 : Bir yapay sinir ağının şematik gösterimi [68].

Şekilde 3.2’de girdiler  $x_i$ , ağırlıklar  $w_i$  ile gösterilmiştir. Toplama fonksiyonu ağırlıkların girdiler ile çarpılması ve varsa bir sapma değerinin eklenmesi ile elde edilir. Sonrasında ise aktivasyon fonksiyonu uygulanır. Sonuç olarak  $y$  çıktısı elde edilir. Tüm yapay sinir ağları bu prensibe göre çalışmaktadır. Öğrenme işlemi ağırlıkların en uygun değere gelene kadar değiştirilmesi olarak ifade edilir. Öğrenme işlemi bir sonraki bölümde ayrıntılı olarak incelenmiştir.

### 3.1.1.1 Girdiler

YSA’ya gelen ve işlem yapılması istenen bilgilerdir. Bu bilgiler üzerinde işlem yapılmaktadır. İşlem yapmak için biyolojik sinir hücrelerinde olduğu gibi toplanarak çekirdeğe iletilir.

### 3.1.1.2 Ağırlıklar

Bir bilginin önemini ve sonuca etkisini gösterir. Diğer bir deyişle girdilerin ağ üzerindeki etkisini belirleyen katsayıya ağırlık denilmektedir. Ağırlık pozitif, negatif ya da sıfır olabilir. Ağırlığın değeri ne kadar büyükse ağ üzerinde o kadar etkiye sahip olduğu söylenebilir.

### **3.1.1.3 Toplama fonksiyonu**

Yapay sinir hücresine gelen tüm girdilerin ağırlıklarıyla çarpılıp toplayarak o hücrenin net girdisini hesaplayan bir fonksiyondur. Bu fonksiyon probleme göre farklılıklar gösterebilir.

### **3.1.1.4 Aktivasyon fonksiyonu**

Toplama fonksiyonundan gelen net girdinin işlenerek çıktının oluşturulacağı fonksiyondur. Aktivasyon fonksiyonu problemin çözümü için gerekli yapıda olmalıdır. Doğrusal sonuçların gerektiği çözümlerde doğrusal aktivasyon fonksiyonları seçilirken doğrusal olmayan çözümler için doğrusal olmayan fonksiyonlar seçilir. Yapay sinir ağlarının güçlü özelliklerinden biri olan doğrusal olmayan çözümlerin üretilebilmesi aktivasyon fonksiyonu özelliğinden gelmektedir.

### **3.1.1.5 Çıktı**

Aktivasyon fonksiyonun sonuç olarak dış dünyaya ya da başka bir yapay sinir hücresine gönderilmesini sağlayan birimdir. Her hücrenin birçok girdisi olabilir ancak tek çıktısı vardır. Bu çıktı birden çok sinire iletilebilir.

## **3.1.2 Yapay sinir ağlarında öğrenme**

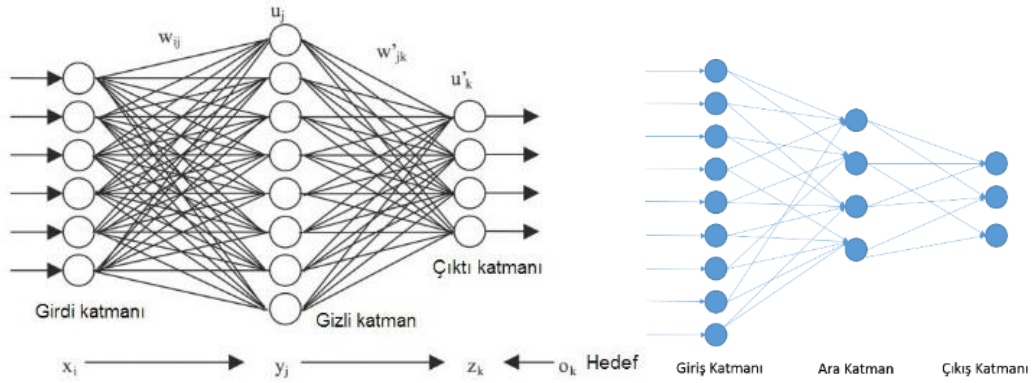
Öğrenme işlemi hatanın düzeltilmesi ve bir daha tekrarlanmaması olarak ifade edilebilir. Yapay sinir hücresinde elde edilen çıktı ile beklenen çıktı arasındaki farkın düşürülmesi öğrenme sürecidir. Öğrenme işlemi için farklı öğrenme algoritmaları kullanılarak hata minimize edilir. Hata küçültmede önemli olan hedef değere yaklaşma derecesidir. Hatanın ne kadar olacağı kullanıcı tarafından kararlaştırılır. Hata düşürülme işlemi ağırlıkların değiştirilmesi ile yapılmaktadır. Hatanın belirlenen değere kadar düşürülmesi süresince ağırlıklar değiştirilir.

Yapay sinir ağının eğitim sürecinden sonra daha önce verilmeyen girdiler YSA'ya sunulur. Bu işlem test aşamasıdır. Bu süreçten beklenen yapay sinir ağının daha önce karşılaşmadığı değerlere de aynı hata oranı ile tepki verebilmesidir. Eğer bu girdilere de istenen aralıkta cevap verebiliyorsa Yapay sinir ağı öğrenmiş olarak kabul edilir.

Yukarıda ifade edildiği gibi öğrenme için iki aşama bulunmaktadır. Bu nedenle elde edilen verilerin de eğitim seti ve test seti olarak iki sınıfa ayrılması gerekmektedir. Bu iki setin de girdileri ve çıktıları bilinmelidir. Eğitim setinin hem girdileri hem de çıktıları yapay sinir ağına verilir. Test setinin ise sadece girdileri YSA'ya verilerek YSA çıktıları gerçek değer ile karşılaştırılarak öğrenme doğrulanır.

### 3.1.3 Yapay Sinir Ağı Modelleri ve Yapıları

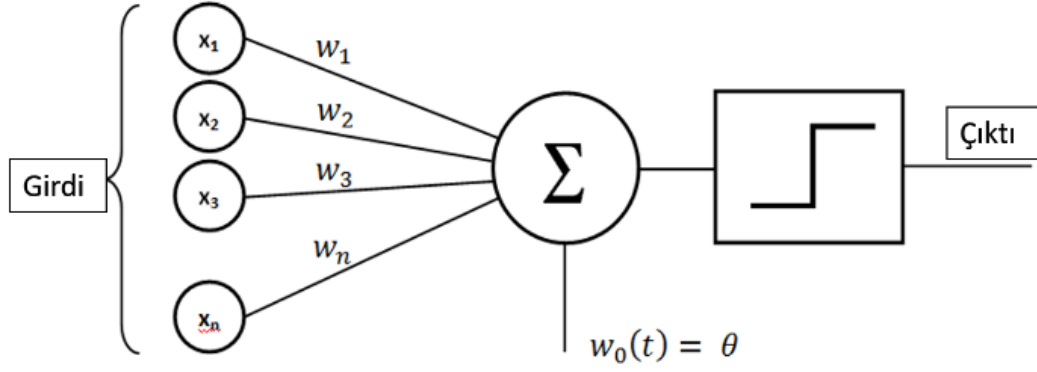
Yapay sinir ağlarının birbirleriyle bağlantıları ve düğüm noktaları farklı şekillerde bir araya getirilebilir. Sinir ağları bu bağlantı farklılıklarına göre adlandırılır. Yapay sinir ağı mimarileri bağlantılarının yönlerine ya da ağın işaretinin akış yönüne göre değişiklik gösterir. İleri beslemeli ve geri beslemeli olarak iki ana YSA mimarisi mevcuttur. Ağ mimarisinin daha iyi anlaşılabilmesi için öncelikle YSA katmanlarından bahsedilmelidir. Yapay sinir ağları temelde giriş ve çıkış katmanı olarak iki katmana sahiptir. Bu yapıdaki sinir ağlarına tek katmanlı sinir ağları ya da perceptron denilmektedir. Ancak; yalnızca giriş ve çıkış katmanı bulunan yapay sinir ağları, doğrusal olmayan problemlerin çözümünü gerçekleştiremez. Bu nedenle giriş ve çıkış katmanının arasına ara katman(lar) eklenmektedir. Ara katmanın mevcut olduğu yapay sinir ağlarına ise çok katmanlı yapay sinir ağları denilmektedir. Bu ara katman ile doğrusal olmayan problemlerin çözümü mümkün olmaktadır. Ara katman bazen gizli katman ya da yanlış bir ifade olarak kara kutu denilmektedir. Katmanlar arasında bağlantı çeşitleri de farklılık gösterebilmektedir. Eğer bir katmandaki her hücre sonraki katmandaki her sinire bağlanmışsa buna **tam bağlantılı** denir. Eğer katmandaki hücreler bir sonraki katmandaki her hücreye bağlanmıyorsa buna **kısmi bağlantılı** denir. Şekil 3.3’de tam bağlantılı ve kısmi bağlantılı yapay sinir ağlarının şematik gösterimi verilmiştir.



Şekil 3.3 : Tam bağlantılı ve kısmi bağlantılı yapay sinir ağları.

#### 3.1.3.1 Tek katmanlı sinir ağları – perceptron

Sadece girdi ve çıktı katmanı bulunan ağlara tek katmanlı sinir ağları denilmektedir. Perceptron, Rosentblatt sinir ağları olarak önerilmiştir. Ancak karmaşık ve doğrusal olmayan problemlere cevap verememesi nedeni ile ilgi görmemiştir. Ancak tek katmanlı sinir ağları eşik değeri önemli bir özelliktir bu sayede sınıflandırma işlemleri için elverişlidir. Şekil 3.4’de tek katmanlı bir yapay sinir ağı gösterilmiştir.



**Şekil 3.4 :** Perceptronun şematik gösterimi [69].

Tek katmanlı yapay sinir ağları doğrusal ilişkileri öğrenebilir. Bir sistemin doğrusal olmayan problemleri çözümü için sistemin XOR (exclusive or – dışlamalı ya da ) işlemini gerçekleştirebilmesi gerekmektedir. XOR mantığı Çizelge 3.1’de verilmiştir. Tek katmanlı bir sinir ağı XOR işlemini gerçekleştiremediğinden dolayı karmaşık problemlerin çözümü için ara katman(lar)a ihtiyaç duyulmuştur.

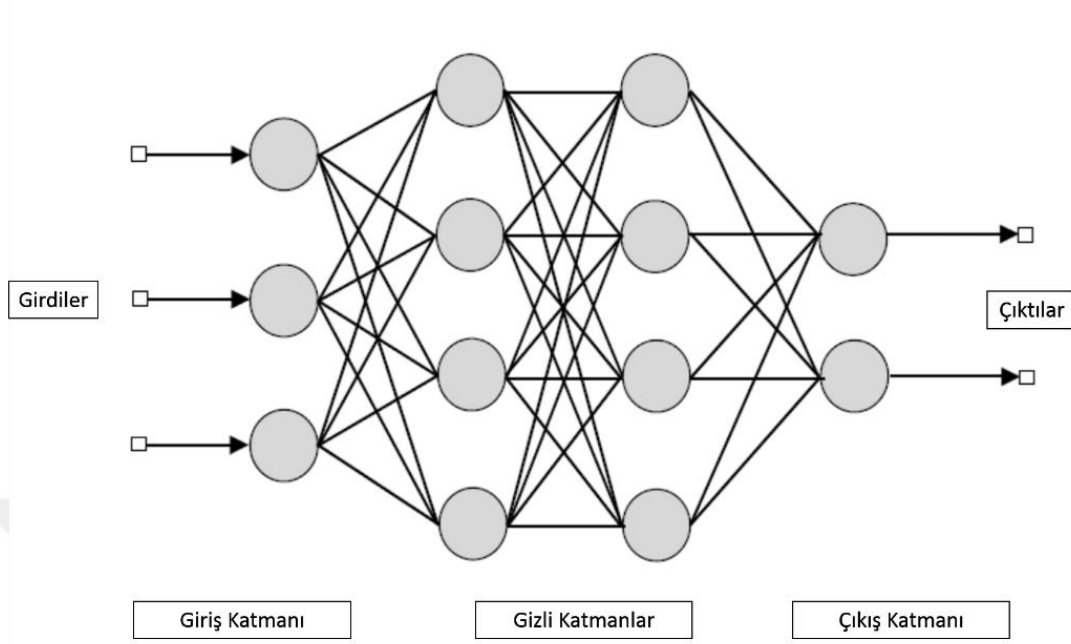
**Çizelge 3.1 :** XOR mantığı.

Girdiler		Çıktı
A	B	
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

### 3.1.3.2 Çok katmanlı yapay sinir ağları

Doğrusal olmayan problemlerin çözümü için geliştirilen çok katmanlı YSA’lar Rumelhart ve arkadaşları [70] tarafından geliştirilmiştir. Bu modele aynı zamanda hatayı geri yayma (backpropagation) modeli de denilmektedir. Bu model sayesinde yapay sinir ağları kendine geniş bir kullanım alanı bulabilmiştir. Çok katmanlı yapay sinir ağlarında giriş katmanı dışarıdan verilen verileri alır ve ara katman(lar)a iletir ara katma(lar) bu veriyi işleyerek çıkış katmanına iletir ve çıkış katmanından dış

dünyaya iletilir. Çok katmanlı bir YSA'nın şematik gösterimi Şekil 3.5'de bulunmaktadır.



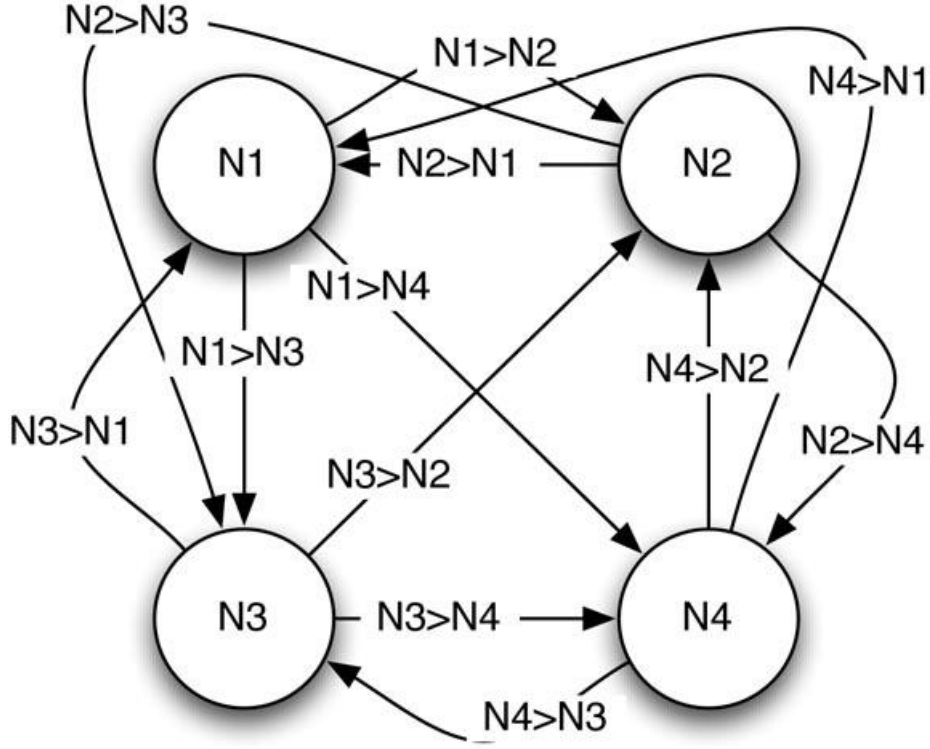
Şekil 3.5 : Çok katmanlı sinir ağı'nın şematik gösterimi.

### 3.1.3.3 İleri beslemeli ağlar

İleri beslemeli ağlar adını bilginin akış yönünden almaktadır. Her katmanda bulunan hücreler bir sonraki katmana tam bağlıdır. İleri beslemeli ağlarda geriye dönük bilgi akışı bulunmamaktadır. Giriş katmanındaki hücre sayısı problemde sunulan değişken sayısı kadardır. Ara katmanda bulunan hücre sayısı ise probleme bağlıdır ve deneme yanılma yöntemi ile bulunur. Çıkış katmanındaki hücre sayısı ise beklenen çıktı sayısı kadar olmalıdır. İleri beslemeli ağlar sınıflandırma, genelleme, tanıma gibi problemlere cevap verebilmektedir.

### 3.1.3.4 Geri beslemeli ağlar

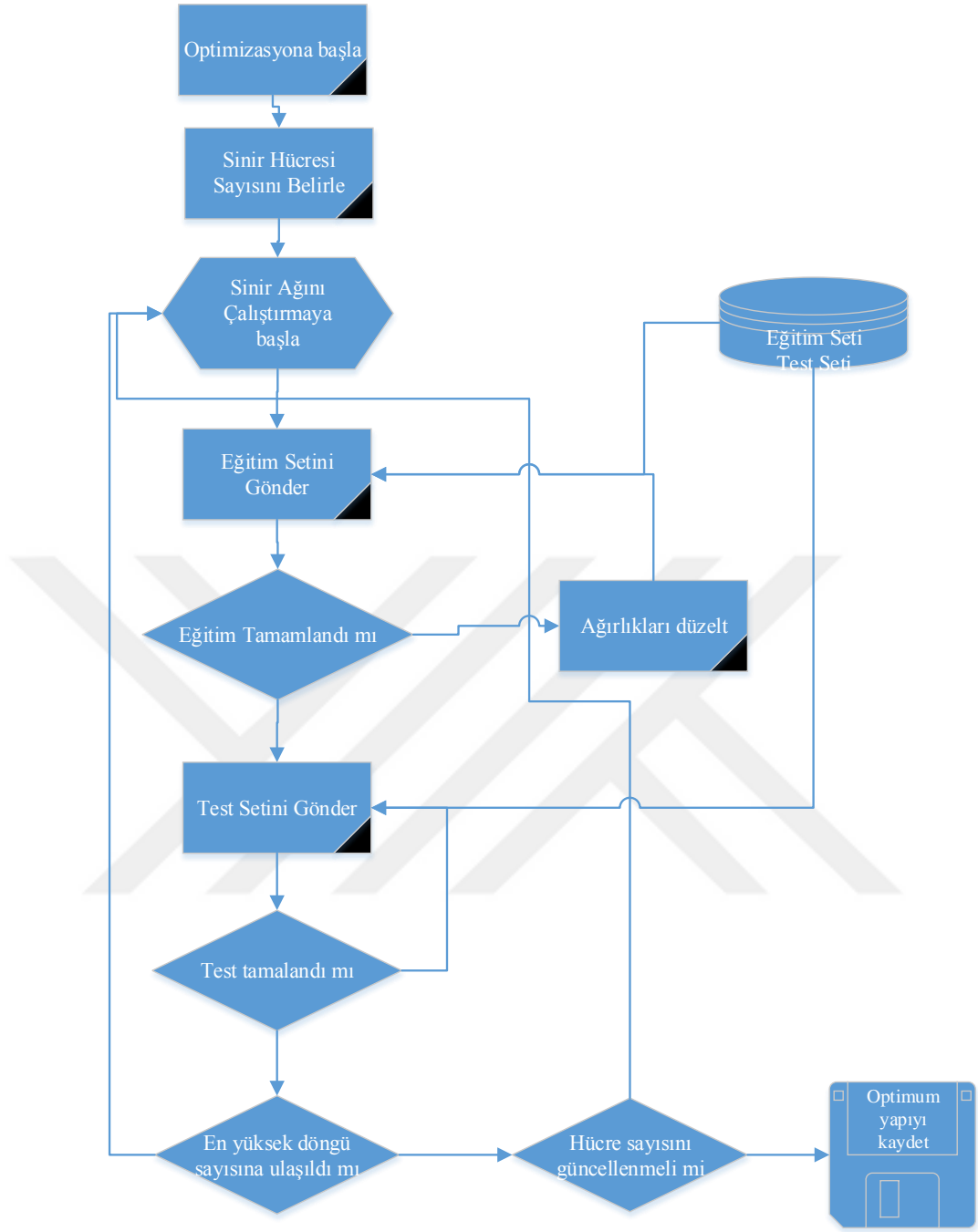
Geri beslemeli ağlarda çıkış ve ara katmandaki çıktıların bir önceki katmana geri gönderilmesi ve yeniden işlenmesi söz konusudur. Bu nedenle özellikle tahmin ve algılama uygulamalarında kullanılmaktadır. Geri beslemeli bir YSA'nın şematik gösterimi Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6 : Geri beslemeli sinir ağının şematik gösterimi [71].

### 3.1.4 Bir yapay sinir ağının oluşturulması

Önceki bölümlerde açıklanan yapay sinir ağlarının daha iyi anlaşılabilmesi ve görselleştirilmesi için ileri beslemeli bir yapay sinir ağının akış diyagramı Şekil 3.7'de verilmiştir. Akış diyagramına uygun olacak şekilde kısa bir kod yazılmıştır. Kodun verilmesinin nedeni ilerki bölümlerde anlatılan ve yapay sinir ağı oluşturmak için yaygın olarak kullanılan programların arka planındaki çalışma mantığının açıklığa kavuşturulmasıdır. Yoğun bir ilgi gören yapay sinir ağları bazı kaynaklarda kara kutu olarak ifade edilmektedir. Bu bakış açısının yanlış olduğu ve arka planda çalışan kodların gösterilmesi ile kullanıcının da sıfırdan bir yapay sinir ağı oluşturabileceği gösterilmek istenmiştir.



**Şekil 3.7 :** Bir yapay sinir ağının optimizasyon algoritması.

### 3.1.4.1 Yapay sinir ağları örnek kodu

Aşağıdaki kod ileri beslemeli basit bir yapay sinir ağını ifade etmektedir. Kod Microsoft Visual Studio programı ile Python 3.4 programlama dilinde yazılmıştır. Aşağıdaki koddan beklenen işlem ve kodun çıktısı Çizelge 3.2’de belirtilmiştir.

Çizelge 3.2 : Örnek kod girdi ve çıktıları.

Girdiler	Beklenen Çıktı	Program Çıktısı
0,0,1	0	0,0096
0,1,1	0	0,0078
1,0,1	1	0,9935
1,1,1	1	0,9921

```
import numpy as np
# sigmoid fonksiyonun tanımlanması
def nonlin(x,deriv=False):
    if(deriv==True):
        return x*(1-x)
    return 1/(1+np.exp(-x))
# giriş bilgileri
X = np.array([ [0,0,1],
               [0,1,1],
               [1,0,1],
               [1,1,1] ])
# çıkış bilgileri
y = np.array([[0,0,1,1]]).T
# hesaplama yapılabilmesi için rastgele sayılar belirle
np.random.seed(1)
# 3 sinir hücresi için ağırlıkları belirle
syn0 = 2*np.random.random((3,1)) - 1
def xrange(a):
    return iter(range(a))
for iter in xrange(10000):
# ileri beslemeli mimarinin tanımlanması
    l0 = X
    l1 = nonlin(np.dot(l0,syn0))
# hata oranının belirlenmesi
    l1_error = y - l1
#sigmoid fonksiyonun l1'deki eğimi ile hata oranı çarpılır
    l1_delta = l1_error * nonlin(l1,True)
# ağırlıklar güncellenir
    syn0 += np.dot(l0.T,l1_delta)
print('Egitim Sonucunda Ciktılar')
print (l1)
```

Kod çıktısı:

```
Egitim Sonucunda Ciktılar
[[ 0.00966449]
 [ 0.00786506]
 [ 0.99358898]
 [ 0.99211957]]
```



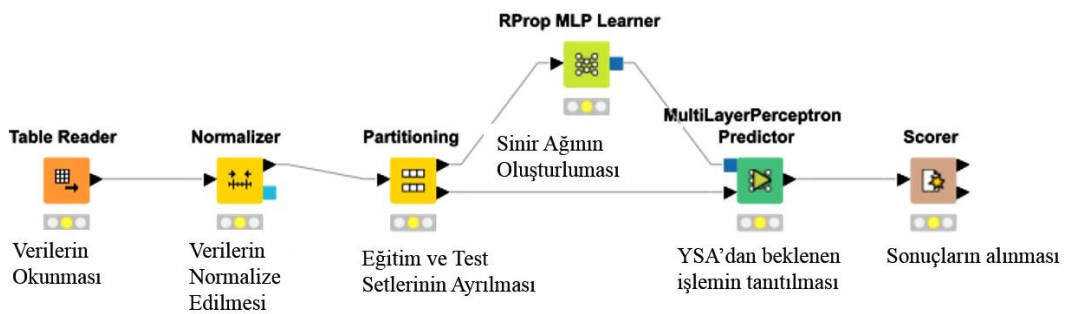
### 3.1.4.2 Yapay sinir ağı oluşturmak için kullanılan programlar

Karmaşık bir sistemin çözümü için kod yazmak uzun süre alacağı ve yapay sinir ağları kullanımını yaygınlaştırmak için bir yapay sinir ağının basit bir şekilde oluşturulduğu sistemler geliştirilmiştir. Bu programlar, açık kaynak ya da ticari olabilmektedir. Aynı zamanda lokal ya da web tabanlı sistemler de bulunmaktadır. Bu şekildeki paket programların kullanılması özellikle kullanıcı arayüzüne sahip olması nedeniyle kullanıcı için YSA oluşturmayı kolaylaştırmaktadır.

Tez kapsamında programların nasıl kullanılacağından ziyade programların tanıtılması amaçlanmıştır. Ancak programların kullanılması için faydalanılabilecek kaynaklar referanslarda verilmiştir [64 – 66].

#### Knime Programı

Knime programı GNU lisansı ile kullanılabilen açık kaynak kodlu bir yazılımdır. Websitesinden ücretsiz olarak indirilerek kullanılabilir [78]. Knime, Konstanz Üniversitesi'nde (Almanya) veri madenciliği üzerine geliştirilmiştir. Adını Konstanz Information Miner tümcesinden almaktadır. Yazılımın amacı, veri madenciliği başta olmak üzere yapay zekanın bilgi işleme ile ilgili olduğu alanlarına yoğunlaşmaktadır. Knime programında temel olarak iş akış diyagramları oluşturulur ve her bir kademede yapılacak işler, düğümler yardımı ile tanımlanır. Düğümler arasında veri akışı sağlanırken her bir düğümden tanımlanmış işlemler gerçekleştirilerek bir sonraki kademeye iletilir. Knime içerisinde veriler tablo olarak saklanır ve tablo olarak sunulur. Knime programı ile oluşturulmuş bir yapay sinir ağı şekil 3.8'de gösterilmiştir.

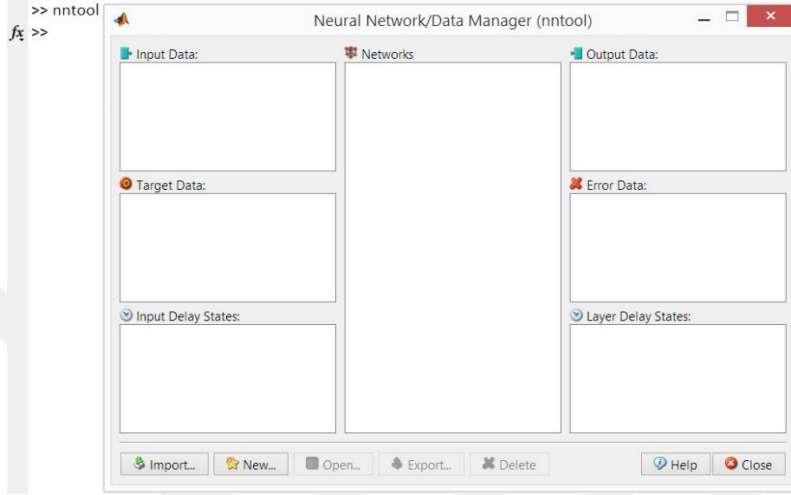


Şekil 3.8 : Knime programı için oluşturulmuş akış şeması.

#### Matlab Programı

MATLAB adını Matrix laboratuvarı adından almaktadır. MATLAB programı ile temel nümerik hesaplamalar, grafiksel gösterim, programlama gibi mühendislik hesaplamaları yapılabilmektedir. Paket program olarak sunulan MATLAB aynı zamanda bir programlama dilidir. Mühendislik hesaplamaları için oldukça geniş

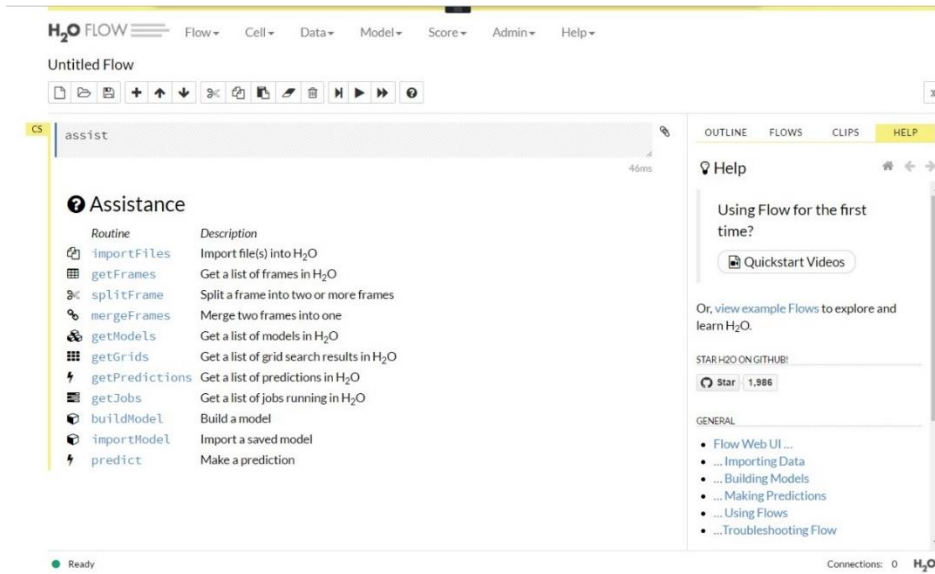
kullanım alanı bulunmaktadır. MATLAB hem programlama hem de kullanıcı arayüzüyle YSA oluşturulmasına imkan vermektedir. Neural Networks Toolbox olarak isimlendirilen arayüz ile bir YSA oluşturulur, eğitilir, test edilir ve sonuçlar alınabilir. MATLAB içinde bu arayüzü açmak için komut satırına `nntool` komutu girilmelidir. Şekil 3.9’da MATLAB Neural Networks Toolbox arayüzü görülmektedir.



Şekil 3.9 : Neural network toolbox arayüzünün görünümü.

### H<sub>2</sub>O Programı

H<sub>2</sub>O programı tarayıcı tabanlı ücretsiz bir programdır. Aynı zamanda Python programlama dili için bir kütüphanedir. Temelde YSA oluşturmak için geliştirilmiştir. Bir yapay sinir ağı oluşturmak için gerekli adımlar listelenmiştir. Bu adımlar izlenerek YSA oluşturulur, eğitilir, test edilir ve sonuçlar alınabilir. Şekil 3.10’da H<sub>2</sub>O programının arayüzü gösterilmiştir.



Şekil 3.10 : H<sub>2</sub>O programının arayüzü.

### 3.2 Sonlu Elemanlar Metodu

Sonlu elemanlar metodu, karmaşık mühendislik problemlerinin basitleştirerek, hassas olarak çözülmesinde etkin olarak kullanılan bir sayısal metottur. Sonlu elemanlar metodu, analitik olarak modellenmesi zor ve karmaşık olan problemlerin aynı özellikleri taşıyan basit parçalara bölünerek, her bir parçanın kendi içerisinde çözülmesiyle genel problemin çözümünün bulunduğu bir analiz metodudur.

Sonlu elemanlar yönteminde elde edilen sonuçlar yaklaşık sonuçlardır. Problemlerin analitik olarak çözülmesini zor kılan parametreler analiz edilecek modelin her zaman düzgün sınırlara sahip olamayışı ve malzemelerin her zaman lineer davranış gösterememesidir. Sonlu elemanlar metodunun üç temel özelliği vardır [79]:

- Geometrik olarak karmaşık olabilecek çözüm bölgesi, her birisi sonlu elemanlar olarak adlandırılan basit alt geometrik bölgelere ayrılır.
- Her bir elemandaki sürekli fonksiyonlar cebirsel polinomların lineer kombinasyonları olarak tanımlanabileceği kabulü yapılır.
- İstenen değerler, problemi oluşturan sürekli denklemlerin elemanlar içinde belirli düğüm noktalarında bulunması ile elde edilir.

Bu değerlerin bulunmasında yaklaşım fonksiyonları kullanılır. Yaklaşım fonksiyonları, interpolasyon teorisi temel alınan polinomlardan seçilir. Seçilecek yaklaşım fonksiyonunun derecesi kullanılacak eleman düğüm sayısına bağlıdır. Sürekli bir ortamda problemin içerdiği fiziksel alana göre birçok alan değişkeni bulunur. Örneğin, termal ve mekanik alanda gerilme, yer-değiştirme ve sıcaklık başlıca alan değişkenleridir. Bunlar çözüm yapılacak düğümdeki serbestlik dereceleri olarak adlandırılır. Sürekli ortamın sonlu elemanlara ayrılmış alt bölgeleri de aynı karakteristik özellikleri gösterdiğinden her eleman için elde edilen denklem takımı birleştirildiğinde bütün sistemi ifade eden global denklem takımı elde edilecektir. Denklem takımının çözümü ile sürekli ortam alan değişkenleri düğüm noktalarında elde edilecektir. [80]

Sonlu elemanlar metodunu diğer sayısal yöntemlere göre üstün kılan başlıca unsurlar aşağıdaki gibidir [79]:

- Kullanılan sonlu elemanların boyutlarının ve şekillerinin değişebilirliği özelliği ile ele alınan çözüm geometrisi küçük miktarda hatalar ile ifade edilebilmektedir.
- Değişik geometrilere ve farklı malzeme özelliklerine sahip parçalar diğer sayısal analiz yöntemlerine göre daha kolay incelenebilir.

- Problemi oluşturan modelin sonlu sayıda elemanlara ayrılmasından sonra, her eleman için eleman rijitlik matrisi oluşturulur ve daha sonra bu eleman rijitlik matrisleri birleştirilerek bütün problemi ifade eden global rijitlik matrisi oluşturulur. Sonlu elemanlar yönteminde kullanılan eleman tiplerinden bazıları aşağıda gösterilmiştir.

Sonlu elemanlar metodunda ilk basamak, yapıyı veya çözüm bölgesini alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayırmaktır. Bu ayırımında uygun sonlu elemanlar kullanılmalı, elemanların cinsi, sayısı ve düzeni tespit edilmelidir. Sonlu elemanlar metodunda ilk basamak, yapıyı veya çözüm bölgesini alt bölümlere yani sonlu elemanlara ayırmaktır. İlk olarak problem çok sayıda elemana ayırıp, düğüm noktaları (nods) oluşturularak, tüm problem bir büyük ağ (mesh) halinde modellenmelidir. Sonrasında model üzerinde etkisi bulunan girdi verileri; yükler ve deplasmanlar; tanımlanmaktadır. Bu tanımlama işlemlerine ilk işlem (preprocessor) adı verilmektedir. Karmaşık bir problemin herhangi bir yük altındaki deplasmanının kesin olarak tahmin edilmesi mümkün olmadığından, bir eleman için, bilinmeyen çözümü yaklaşık olarak ifade edilebilecek uygun bir deplasman modeli seçilmelidir. Bu model hesaplamalar açısından basit olmalı, ancak problem çözümünde etkin olmalıdır. Denge denklemleri veya varyasyonel prensipler ve yaklaşık deplasman modeli kullanılarak eleman katılık matrisleri ve yük vektörleri bulunmalıdır. Genellikle matris denklemleri şeklinde olan bu denge denklemlerin çözülmesi ile de değişkenlerin düğüm noktalarındaki değerleri elde edilmektedir. Bu denge denklemlerinin her bir eleman için çözülmesi ile elemanların davranışları elde edilmektedir. Bu işleme çözüm (post-process) denmektedir. Sonuçlar kullanıcıya çözüm işlemi ile problem üzerinde grafiksel ve sayısal sonuçlar halinde verilmektedir. Yapılan analiz sonuçları eleman sayısı artıkça gerçek sonuçlara en yakın değerini almaktadır.

## 4. DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

### 4.1 Deneyin Yapılışı

Tez kapsamında yapılan çalışmalar; kaplama öncesi işlemler, kaplama üretimi, karakterizasyon çalışmaları ve sayısal analizler olarak sıralanabilir. Yapılan çalışmaların amacı farklı toz boyutlarındaki YSZ'den üretilmiş TBK'ların üretimi, karakterizasyonu ve sayısal olarak kaplama yapısı hakkında ayrıntılı bilgi sahibi olmak şeklinde tanımlanabilir. Kaplama öncesi işlemler olarak altlık malzemenin ve kullanılan tozların hazırlanması işlemlerini içerir. HVOF prosesi ile bağlanma katmanının ve APS prosesi ile ise seramik üst katman üretimi gerçekleştirilmiştir. Üst katman üretiminde farklı toz partikül boyutları kullanılmış aynı zamanda karşılaştırma amacıyla da ticari YSZ tozlarından da kaplama üretilmiştir. Kaplamalar AISI 321 paslanmaz çelik üzerine üretilmiştir. Taramalı elektron mikroskobu kullanılarak kaplamaların mikroyapıları, kalınlıkları belirlenmiş olup. SEM mikrografları sayesinde görsel işleme metodu kullanılarak porozite oranı belirlenmiş ve sonlu elemanlar analizi için gerekli çizimler elde edilmiştir. Kaplamaların sıcak korozyon davranışı için yine 1200 °C'de kül fırın içerisinde 12 saat boyunca üzerine V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> tozları bulunur şekilde bekletilmesi şeklinde yapılmıştır. Devamında hasarlı yüzeyler fotoğraflanmış ve görsel işleme yöntemiyle hasar oranı belirlenmiş ve sayısal olarak karşılaştırması yapılmıştır. Üretilen kaplamaların XRD ile faz analizleri yapılmış ve XRD sonuçları karşılaştırılmıştır. Farklı mühendislik yaklaşımları ile ana malzemenin sıcaklıktan korunma yöntemleri incelenmiş olup gaz türbinleri için kullanılan soğutma işlemlerine yoğunlaşmıştır. Film soğutma olarak ifade edilen yöntemin TBK ile temas halinde olduğu gözlemlenmiş ve bu nedenle film soğutma üzerinde durulmuştur. Sonlu elemanlar metodu kullanılarak kaplama parametrelerinin film soğutma üzerine etkileri incelenmiştir. Yapay sinir ağı yöntemi kullanılarak kaplamaların pürüzlülük değerleri ile poroziteleri arasındaki ilişki ortaya konulmuş bu sayede pürüzlülük değerleri sonucunda porozite ile ilgili kaplama özellikleri tahmin edilebilir hale getirilmiştir. Kaplamaların üretimi, termal şok deneyleri, sıcak korozyon, görsel işlemler, yapay sinir ağı analizi, sonlu

elemanlar metodu ile analiz İTÜ Plazma Sprey Kaplama laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Yüzey pürüzlülük ölçümleri İTÜ Sert Kaplama Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

## 4.2 Deneyleerde Kullanılan Malzemeler

### 4.2.1 Metalik altlık malzeme

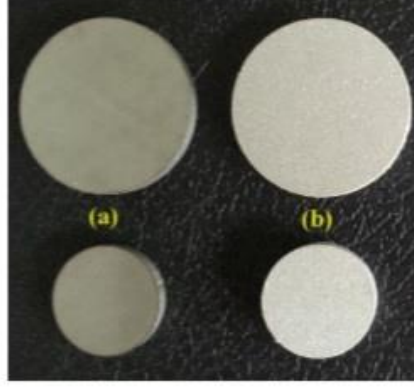
Metalik altlık olarak AISI 321 kalite östenitik paslanmaz çelik kullanılmıştır. Altlık malzemenin XRF analizleri sonucu Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

**Çizelge 4.1 :** Altlık malzemenin kimyasal ve termal özellikleri.

Altlık	Kimyasal Bileşim (ağ. %)	Termal İletkenlik (W/mK)	CTE $10^{-6} K^{-1}$
AISI 321	C 0,08, Cr 18, Fe 68, Mn 2, Ni 11, Si 1	16,1	18,0

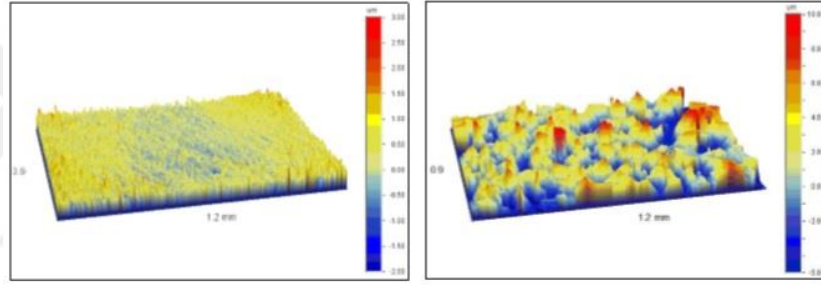
Altlık malzemeler 25.4 mm (1 inç) ve 2 mm kalınlığa sahip olacak şekilde levha üzerinden laser kesim yöntemiyle alınmıştır. Uçak kanatlıklarında çeşitli INCONEL alaşımları kullanılmasına karşın AISI 321 çeliğinin daha düşük oksidasyon direnci ve yüksek sıcaklık mekanik özelliklerinin INCONEL’e göre zayıf kalması nedeni karakterizasyon işlemlerinde TBK kaplama karakterini daha iyi yansıtacağı düşünülerek AISI 321 paslanmaz çelik tercih edilmiştir.

Altlık malzeme levhadan laser kesim ile elde edilmiştir ve parlak bir yüzeye sahiptir. Bunun nedeni ise düşük yüzey pürüzlülüğüdür. Düşük yüzey pürüzlülüğü bağlanma katmanının metal ile füzyon ve difüzyon şeklinde meydana gelen bağlanma mekanizmasını olumsuz etkilemektedir. Bu nedenle malzeme yüzeyi kumlama işlemine tabi tutularak pürüzlendirilmiştir. Kumlama işlemi İTÜ Plazma Sprey Laboratuvarı bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Kumlama altlık malzemeye dik şekilde 30 – 35 cm uzaklıktan her numune için 60 sn süreyle uygulanmıştır. Kumlama öncesi ve sonrası altlık malzemenin görüntüsü Şekil 4.1’de belirtilmiştir.



**Şekil 4.1 :** Altlık Malzemenin Kumlama öncesi ve sonrasındaki görünümü.

Altlık malzemenin yüzey pürüzlülük değerlerinin belirlenebilmesi amacıyla optik profilometre cihazı kullanılmıştır. Altlıkların kumlama öncesi ve sonrası yüzey profilleri Şekil 4.2’de belirtilmiştir.



**Şekil 4.2 :** (a) kumlama öncesi ve (b) kumlama sonrası yüzey pürüzlülük profili.

Kumlama öncesi ortalama yüzey pürüzlülük değeri (Ra) 0,5 um iken kumlama sonrası bu değer 2,3 um olarak kaydedilmiştir.

#### **4.2.2 Kaplama tozları**

Kaplama tozlarının morfolojisi, tane boyut aralığı, kaplama prosesleri gereği önem arz etmektedir. Uygun morfoloji ve akıcılıkata olan tozlar HVOF ve APS sistemleri için bir gerekliliktir.

Bağ katman (NiCoCrAlY) ve seramik üst katman (YSZ) tozları Sulzer Metco (ABD) firmasından temin edilmiştir. Kullanılan tozların kimyasal bileşimi Çizelge 4.2’de belirtilmiştir.

**Çizelge 4.2 :** Bağlanma katmanı ve seramik katman için kullanılan tozların kimyasal yapısı.

Malzeme	Üretici	Kimyasal Yapısı
NiCoCrAlY (AMDRY997)	Sulzer Metco	Ni, 23Co, 20Cr, 8,5Al, 4Ta, 0,6Y
YSZ (Metco 204 B-NS)	Sulzer Metco	ZrO <sub>2</sub> 8Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

### 4.3 Bağlanma Katmanın Üretilmesi

Metalik altlık ile seramik üst katman arasında; metali oksidasyondan korumak, termal genleşme farklılığından dolayı oluşacak gerilmeleri azaltmak ve seramik üst katmanın ana metale daha iyi yapışabilmesi için üst katman ve altlık arasında bağlanma katmanı üretimi gerçekleştirilir. Özellikle YSZ gibi oksijen geçirgenliği bulunan seramik üst katmanların kullanıldığı sistemlerde bağ katmanında bulunan Cr, Al ve Y elementleri oluşturdukları kararlı oksit tabakası sayesinde altlık malzemesinin oksitlenmesini engeller. Yapılan çalışmada bağlanma katmanı üretimi için Sulzer Metco AMDRY 997 tozu kullanılmıştır. Bağlanma katmanı üretimi HVOF prosesi ile gerçekleştirilmiştir. Proses İTÜ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Termal Sprey Laboratuvarı bünyesinde (Sulzer Metco DJ-2700) gerçekleştirilmiştir.

HVOF prosesi döner tablaya bağlı 16 numune ile CNC tezgahına bağlı HVOF torçu sayesinde gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar kontrollü sistem ve döner tabla sayesinde kaplamaların özellikleri birbirine en yakın olacak şekilde üretilmektedir.

HVOF sisteminde hava, propan ve oksijen gaz karışımı yüksek hızdaki alevi oluşturmaktadır. Bağlanma katmanı için belirlenen kalınlığa (90 um) ulaşması için numune yüzeyi 12 kez (paso) yüksek hız ve sıcaklıktaki toza tabi tutularak kaplama işlemi gerçekleştirilmiştir. HVOF sistemine ait parametreler Çizelge 4.3'de verilmiştir.

**Çizelge 4.3 :** Bağlanma katmanının üretimi için proses parametreleri.

Parametre	HVOF için değeri
Propan Akış Hızı (scfh)	40
Oksijen Akış Hızı (scfh)	24
Hava Akış Hızı (scfh)	50
Toz Besleme Hızı (lb/dak)	7,4
Sprey Mesafesi (cm)	25
Tabla Dönüş Hızı (Hz)	50
Spreyleme Açısı (°)	90



Bağlanma katmanı üretiminden sonra yüzey pürüzlülük değerleri tekrar ölçülmüştür. Bağ katman yüzey pürüzlülük değeri 6,1um olarak kaydedilmiştir. Bu pürüzlülük değeri üst katman üretimi için yeterli seviyede olarak değerlendirilmektedir.

#### 4.4 Üst Katman için Kaplama Tasarımı ve Tozların Hazırlanması

Üst katman üretimi için YSZ tozları kullanılmıştır. YSZ (Sulzer Metco 204 B-NS) farklı partikül boyutlarına göre sınıflara ayrılmıştır. Bu ayırım elek yardımıyla 45um'den küçük 45 – 75 µm arasında ve 75 µm'den büyük partiküller olarak yapılmıştır. Aynı zamanda ticari YSZ de karşılaştırma amacıyla kullanılmıştır. Kapalamalarda farklı toz partikül boyutunun kullanılması mikroyapısal farklılığa neden olacağı öngörülmüş ancak sayısal veriler ile kanıtlanması ve gelecek çalışmalar ve kaplama tasarımları için kaynak oluşturması hedeflenmiştir.

Tozların elenmesinden sonra toz partikül ölçüm işlemi İTÜ Toz Malzeme Laboratuvarında ölçülmüştür. Partikül dağılımı Çizelge 4.4'de verilmiştir.

**Çizelge 4.4 :** Eleme sonrası partikül boyut dağılımı.

<b>Toz Tipi</b>	<b>Yüzey alanına göre ortalama</b>	<b>Hacimsel ortalama</b>	<b>d(0.5)</b>
Kaba Toz	78.090	82.970	80.134
Orta Toz	57.208	60.518	58.208
İnce Toz	46.638	52.280	49.650

#### 4.5 Seramik Üst Katman Üretimi

Tüm seramik kaplamalar APS prosesi ile üretilmiştir. Bu proseste plazmayı oluşturmak için argon destekleyici gaz olarak hidrojen gazı kullanılmıştır. Sulzer Metco 9MCE plazma sistemi, bağlanma katmanı için kullanılan CNC ve tabla sistemi, 9MB plazma tabancası ve nozülü kullanılmıştır. APS sisteminde kullanılan parametreler Çizelge 4.5'de verilmiştir.

**Çizelge 4.5 : Seramik üst katman üretimi için proses parametreleri.**

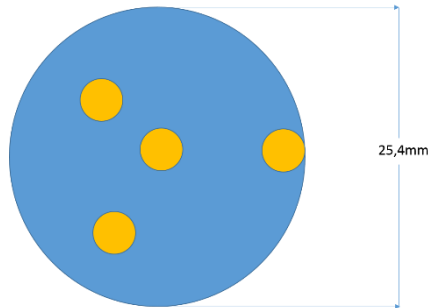
Parametre	APS için değeri
<b>Hidrojen Akış Hızı (scfh)</b>	15
<b>Argon Akış Hızı (scfh)</b>	90
<b>Taşıyıcı Gaz Akış Hızı (scfh)</b>	13,5
<b>Amper (A)</b>	600
<b>Voltaj (V)</b>	63
<b>Sprey Mesafesi (mm)</b>	65
<b>Sprey Açısı (°)</b>	90
<b>Toz Besleme Hızı (lb/dak)</b>	6,5

#### **4.6 Termal Bariyer Kaplamalara Uygulanan Testler ve Karakterizasyonlar**

Bağlanma katmanı ve seramik üst katman üretiminin ardından elde edilen TBK'lara sistematik bir şekilde testler ve karakterizasyon işlemleri uygulanmıştır. Öncelikle tüm numunelerin yüzey pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Akabinde sırasıyla, mikroyapı analizi, faz analizi, termal şok, sıcak korozyon testleri ve yapışma mukavemeti ölçümleri yapılmıştır. Test ve analizlerin ardından görsel işlem yöntemlerine geçilmiş ve sonuçlar sayısal olarak ortaya konulmuştur. Mikrograflar sayesinde sonlu elemanlar analizi için gerekli çizim görsel işlemler kullanılarak elde edilmiştir. Porozite oranı yine görsel işlemler kullanılarak tayin edilmiştir.

##### **4.6.1 Pürüzlülük ölçümü**

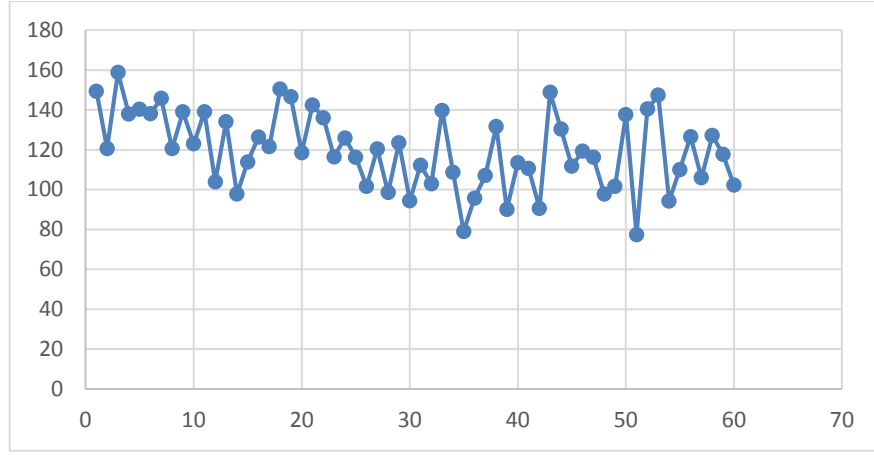
Üretilen tüm kaplamaların pürüzlülükleri optik profilometre yardımıyla ölçülmüştür. Üretilen her numune için ayrı ayrı dört adet ölçüm yapılmıştır. Örnek ölçüm bölgeleri Şekil 4.3'de belirtilmiştir.



**Şekil 4.3 : Pürüzlülük ölçüm bölgeleri.**

Pürüzlülük ölçümlerinde Ra, Rq, Rt, Rz değerleri elde edilmiştir. Çizelge 4.4'de örnek ölçüm grafiği verilmiştir.

**Çizelge 4.6 : Örnek pürüzlülük değerleri ölçüm grafiği.**



Elde edilen tüm pürüzlülük değerlerinin ortalaması Çizelge 4.7’de belirtilmiştir.

**Çizelge 4.7 : Pürüzlülük değerleri ortalama değerleri**

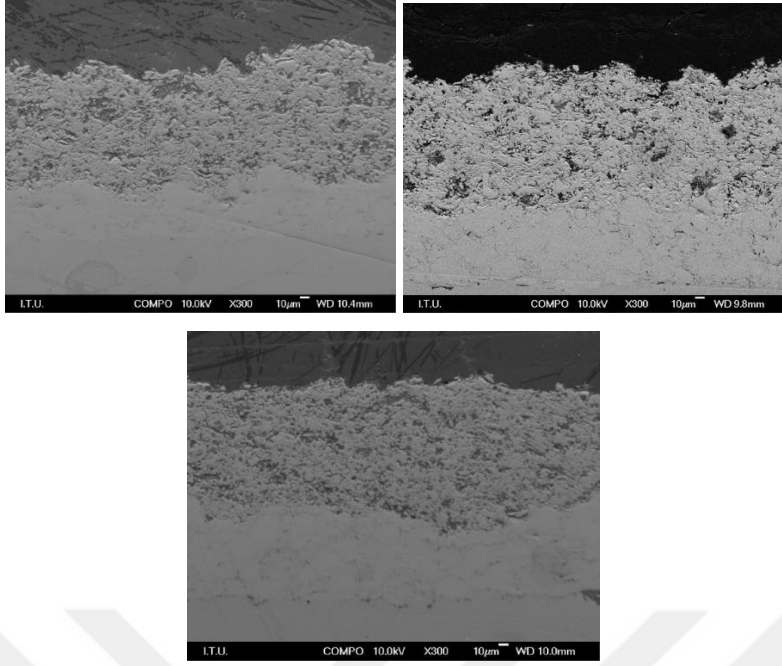
Numune	En yüksek (Ra)	En düşük (Ra)	Ortalama (Ra)	En yüksek yükseklik Farkı (Rt)	En düşük yükseklik farkı (Rt)	Ortalama Yükseklik Farkı (Rt)
İnce	9,5	7,29	8,13	171	71	120
Orta	10,93	8,56	9,78	200	77	110
Kaba	12,73	9,32	10,79	172	82	120
Ticari	9,6	7,27	8,18	158	77	119

#### 4.6.2 Mikroyapı karakterizasyonu

Mikroyapı karakterizasyonu için metalografik numune hazırlama aşamaları uygulanmıştır. Öncelikle numunler soğuk bakalite alınmıştır. Sonrasında elmas disk ile hassas kesilmiştir. Parlatma cihazı yardımıyla kaplama kesitleri parlatılmıştır.

Üretilen kaplamaların mikro yapısı Taramalı Elektron Mikroskobu yardımıyla analiz edilmiştir.

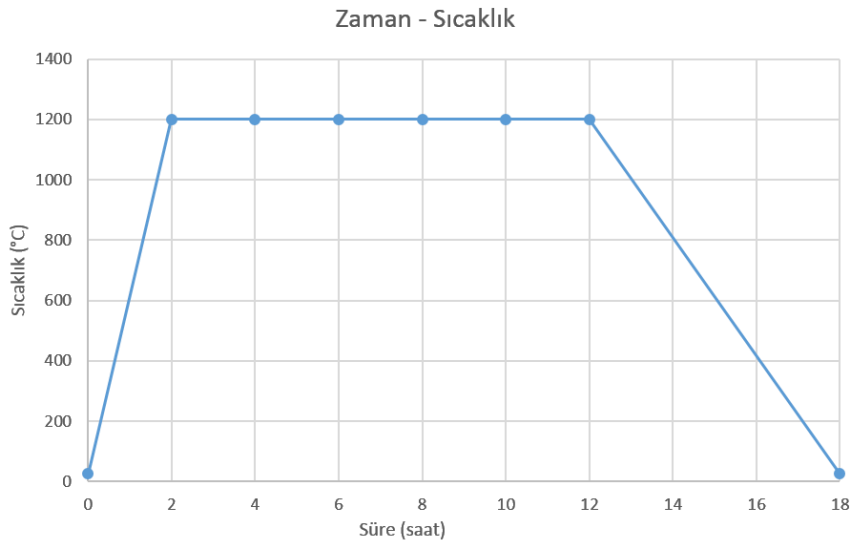
İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Biyomalzeme Laboratuvarı bünyesinde bulunan Taramalı Elektron Mikroskobu yardımıyla 300 – 650 – 1500 büyütmede görüntüler alınmıştır. Alınan örnek SEM görüntüleri Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



**Şekil 4.4 :** Farklı boyutlarda toz kullanılarak üretilmiş kaplamaların SEM görüntüleri.

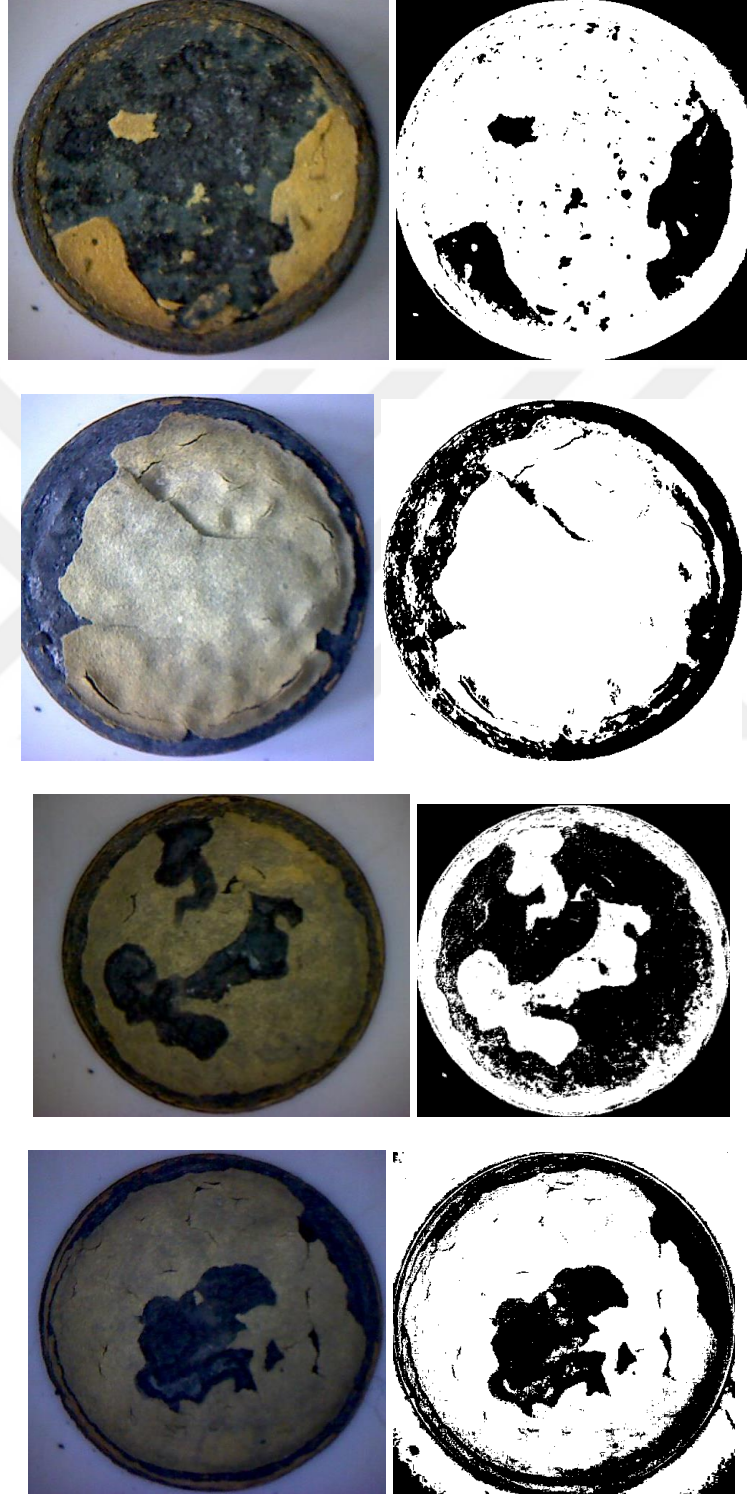
#### 4.6.3 Yüksek sıcaklık korozyon testi

Üretilen kaplamalar üzerine  $V_2O_5$  tozu konarak  $1200^{\circ}C$ 'de 12 saat boyunca kül fırında bekletilmiştir. Testte kullanılan sıcaklık - zaman grafiği Şekil 4.5'de verilmiştir.



**Şekil 4.5 :** Sıcaklık – Zaman grafiği.

Analiz sonunda elde edilen numuneler görsel işleme uygulanarak korozyon sonundaki hasar oranı belirlenmiştir. Şekil 4.5’de verilen görseller sıcak korozyon sonucunda kaplamada oluşan hasarı ve hasar oranı belirlemek için kullanılan ikili görselleri vermektedir.



Şekil 4.6 : Sıcak korozyon hasarları ve ikili görselleri.

Görsellerde belirtilen hasarları sayısal değerlere dönüştürmek için hasar oranları belirlenmiştir. Bu işlem hasarlı görüntünün ikili görsele dönüştürülmesi ve siyah – beyaz bölgelerin kapladığı alanların birbirine oranı hesaplanarak yapılmıştır. Bu işlem için imagej programı kullanılmıştır. Hasar oranları Çizelge 4.8’da verilmiştir.

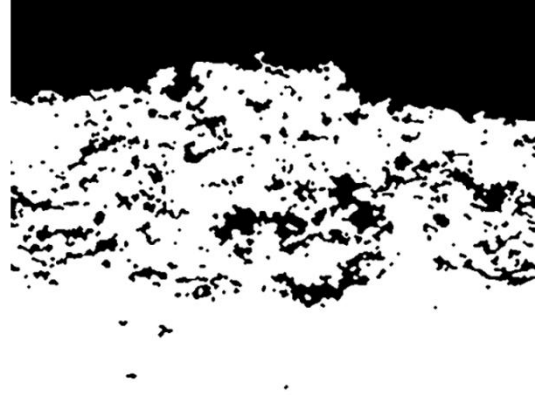
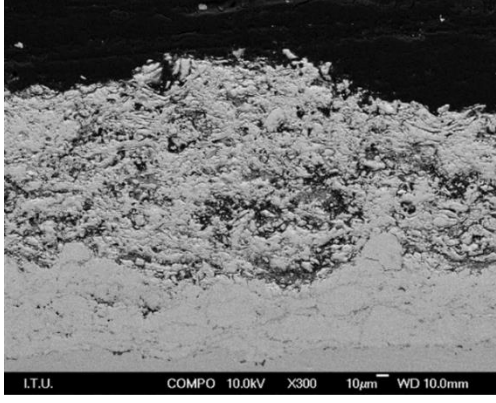
**Çizelge 4.8 : Sıcak korozyon hasar oranları.**

	<b>Numune1</b>	<b>Numune 2</b>	<b>Numune 3</b>	<b>Numune 4</b>
Kullanılan Toz	Ticari	Kaba	Orta	İnce
Hasar Oranı	%82,38	%51,04	% 35,67	%24,01

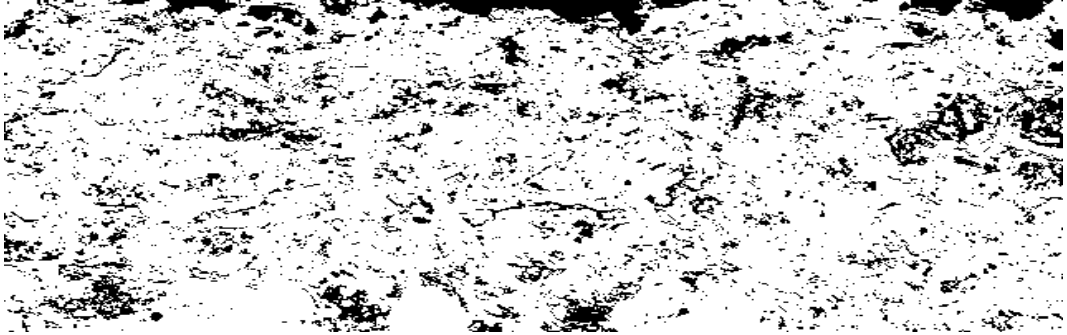
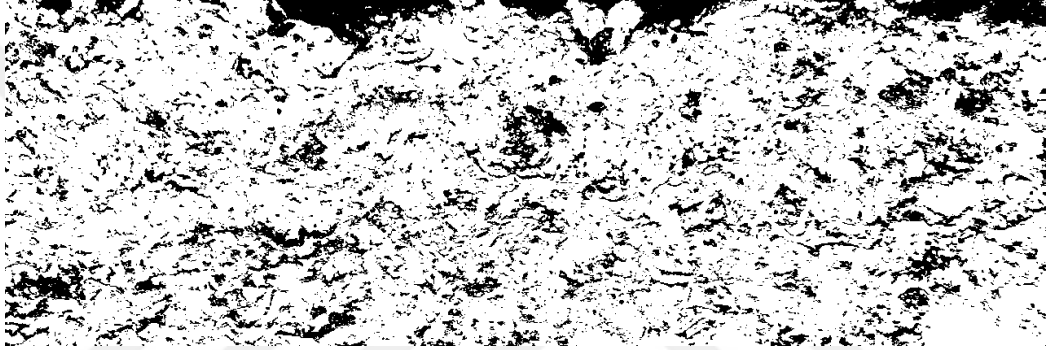
Çizelge 4.9’den de anlaşıldığı gibi kaplama hasarı sınıflandırılmış tozlar içinde en çok kaba tozun kullanıldığı numunelerde gözlemlenmiştir. En az hasarın olduğu kaplama ise ince tozun kullanıldığı kaplamalarda meydana gelmiştir. Bu noktada ticari tozun, tüm kaplamalar içinde en çok hasara uğrayan (%82,38) kaplama olduğu gözlemlenmiştir. Bu durumun incelenmesi için porozite analizi yapılması gerekliliği doğmuştur. Porozite analizi kısmında ayrıntıları verilen sonuçlara göre ticari tozun porozite dağılımı sınıflandırılmış tozlar ile yapılan kaplamalardakinden farklılık göstermiştir. Sınıflandırılmış tozlar, lokal ve göreceli olarak büyük porozitelere sahipken ticari tozun kullanıldığı kaplamalarda kaplama yapısı içinde dağılmış olan porozitelere rastlanmaktadır. Bu farklılığın sıcak korozyon mekanizmasında etkin rol aldığı düşünülmüştür.

#### **4.6.4 Porozite Analizi**

Porozite analizi için görsel işlem yöntemi kullanılmıştır. Daha önce elde edilen SEM görüntüleri İmagej programı yardımıyla ikili görsel haline getirilmiş ve yapıdaki renk farklılık oranları sayesinde porozite oranı belirlenmiştir. Şekil 4.7’de SEM görüntüsü ve aynı SEM görüntüsünün ikili görsel hali gösterilmiştir. Şekil 4.8’de porozite analizleri için kullanılan örnek ikili görseller gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Mikroyapı ve aynı mikroyapıya sahip ikili görsel hali.



Şekil 4.8 : Mikroyapıların ikili görsel halleri.

Porozite oranı kaplama kesit görüntülerinin ikili görsel haline getirilmesi ve farklı renklerde (siyah - beyaz) olan kısımların toplam alana bölünmesiyle bulunmuştur. Porozite oranları Çizelge 4.9’da belirtilmiştir.

**Çizelge 4.9 : Ölçülen porozite değerleri.**

	<b>İnce</b>	<b>Orta</b>	<b>Kaba</b>	<b>Ticari</b>
Numune 1	15,80%	18,90%	22,00%	18,12%
Numune 2	15,53%	20,28%	22,00%	18,25%
Numune 3	15,19%	19,70%	23,99%	18,26%
Numune 4	15,68%	19,36%	24,76%	18,69%
Numune 5	14,97%	19,83%	24,63%	18,87%
Numune 6	16,68%	19,29%	24%	18,66%
Numune 7	16,78%	19,21%	23,01%	18,56%
Numune 8	15,10%	19,89%	24,80%	18,20%
Numune 9	15,05%	19,62%	23,95%	18,48%
Numune 10	15,46%	19,72%	22,27%	18,78%
Numune 11	16,15%	20,49%	24,19%	18,20%
Numune 12	15,08%	18,57%	24,70%	18,34%
Numune 13	15,33%	19,85%	24,37%	18,51%
Numune 14	15,68%	20,63%	24,67%	18,12%
Ortalama	15,61%	19,66%	23,83%	18,46%

Porozite oranları yanında porozite dağılım şeklinin de önemli olduğu düşünülmüştür. İkili görsellerin incelenmesi sonucunda Ticari YSZ'nin porozitenin tüm kaplama yapısına dağıldığı ve göreceli olarak boyutlarının küçük olduğu görülmüştür. Bunun yanında sınıflandırılmış tozların poroziteleri belli bölgelerde daha yoğun olduğu yani lokal hale geldiği gözlemlenmiştir. Bunun nedeni ise toz dağılımı ile açıklanabilir. Ticari tozun geniş bir dağılım aralığına sahip olması farklı boyutlardaki tozların boşlukları doldurmasında etkin rol aldığı söylenebilir.

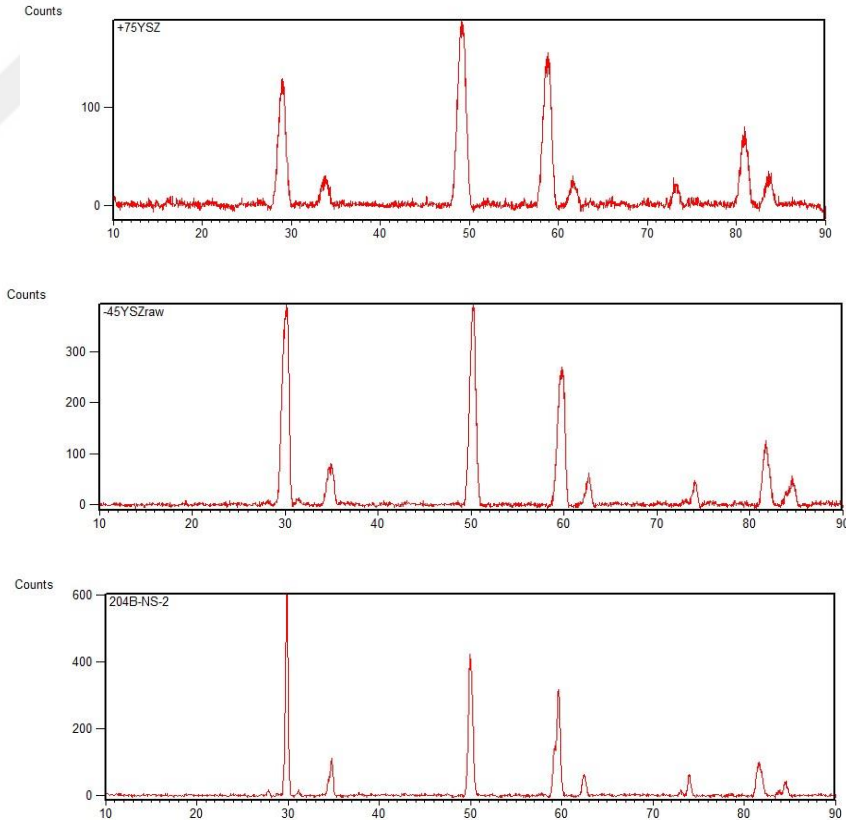
Pürüzlülük ölçümleri incelendiğinde istatistik olarak yorumlamak ya da nitel sonuçların yani porozite dağılımının lokal ya da homojen olduğunu ifade etmek



güçtür. Sınıflandırmanın yapılabilmesi için YSA gibi yöntemlerin kullanılması gerekliliği ortaya çıkmıştır.

#### 4.6.5 X- ışını difraktometresi analizi

Üretilen her bir grup kaplama için X-Işını difraktomu alınmıştır. X ışını difraktomları İstanbul Teknik Üniversitesi Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü Biyomalzeme Laboratuvarında alınmıştır. Faz analizleri, X-ışını difraktometresi ile yapılmıştır. Kullanılan tozların aynı kimyasal bileşime sahip olması nedeniyle difraktomlar arasında açısal farklılıklar bulunmamasına rağmen şiddetlerinde farklılıklar gözlemlenmiştir. Şiddet farklılıklarının kaplama içindeki porozite miktarı ve porozite dağılımı ile ilişkili olduğu düşünülmüştür. Malzeme içinde boşluğun olması X ışınının yansımaya ve bu nedenle gürültü oluşmasına neden olmuş olabileceği düşünülmüştür. X-Işını yoğunlukları ile porozite arasında doğrusal ilişki olduğu Şekil 4.9'de gösterilmiştir. Ancak ticari toz ile yapılan kaplamaların en yüksek şiddete sahip olduğu farkedilmiştir.

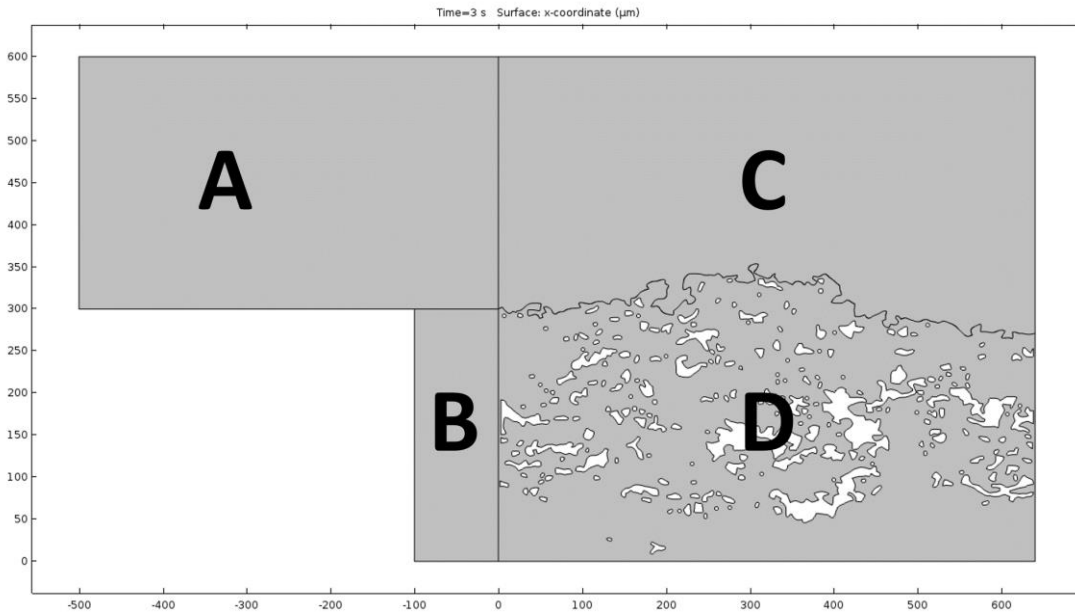


Şekil 4.9 : Toz dağılımlarına göre XRD ölçümleri.

Bu durum porozite ölçümü sırasında gözlemlenen lokal poroziteler ile açıklanabilir. Göreceli olarak büyük porozitelere sahip kaplamaların pik yoğunlukları düşük kalmıştır. Kaplama içinde homojen ve küçük porozitelere sahip ticari toz en yüksek x-ışını yoğunluğuna sahiptir.

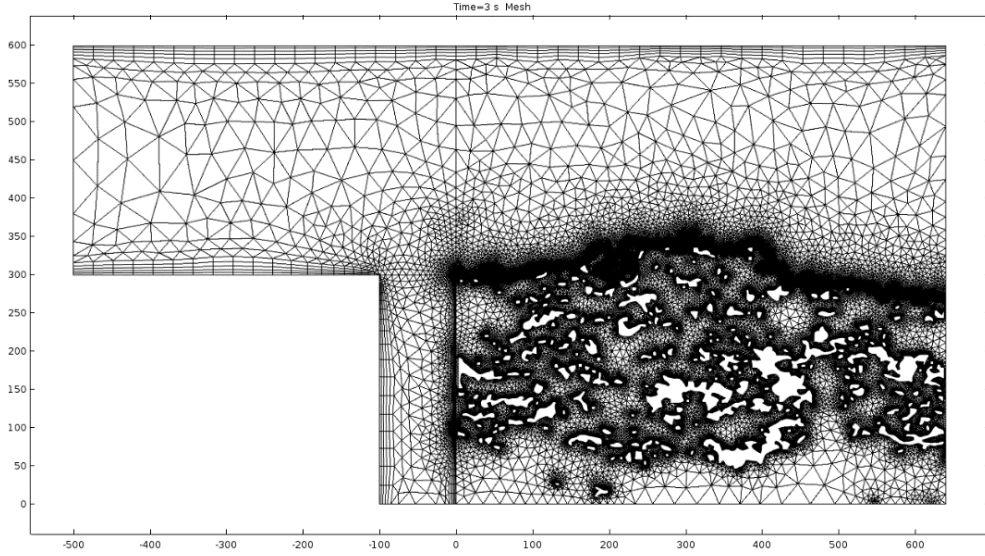
#### 4.6.6 Sonlu elemanlar analizi

Sonlu elemanlar analizi için SEM görüntüleri İmageJ programı kullanılarak ikili görsel ve vektör formatına dönüştürülmüştür. Daha sonrasında üzerinde işlem yapılabilecek ve analize uygun dosya formatı (.dxf) haline getirilmiştir. Şekil 4.10'da görülen A bölgesi sıcak havanın girdiği kanalı. B bölgesi film soğutma için kullanılan deliği. C bölgesi A ve B bölgesinden gelen akışkanların birleştiği ve termal kaplamaya etki eden sıcak havanın olduğu bölgeyi göstermektedir. D bölgesi ise termal bariyer kaplamanın olduğu bölgeyi göstermektedir.



**Şekil 4.10 :** Sonlu elemanlar analizinde kullanılan geometrinin bölümleri.

Kaplamaya etki eden film soğutma ve sıcaklığın analizi için benzetim Şekil 4.9'daki gibi yapılarak sonlu elemanlar metodu için ağ yapısı Şekil 4.11'da belirtildiği gibi yapılmıştır.

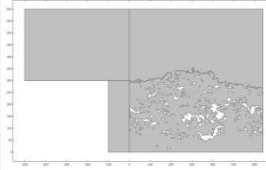
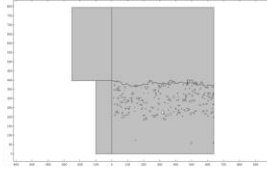
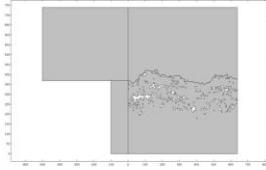


**Şekil 4.11 :** Sonlu elemanlar için gerekli ağ yapısı.

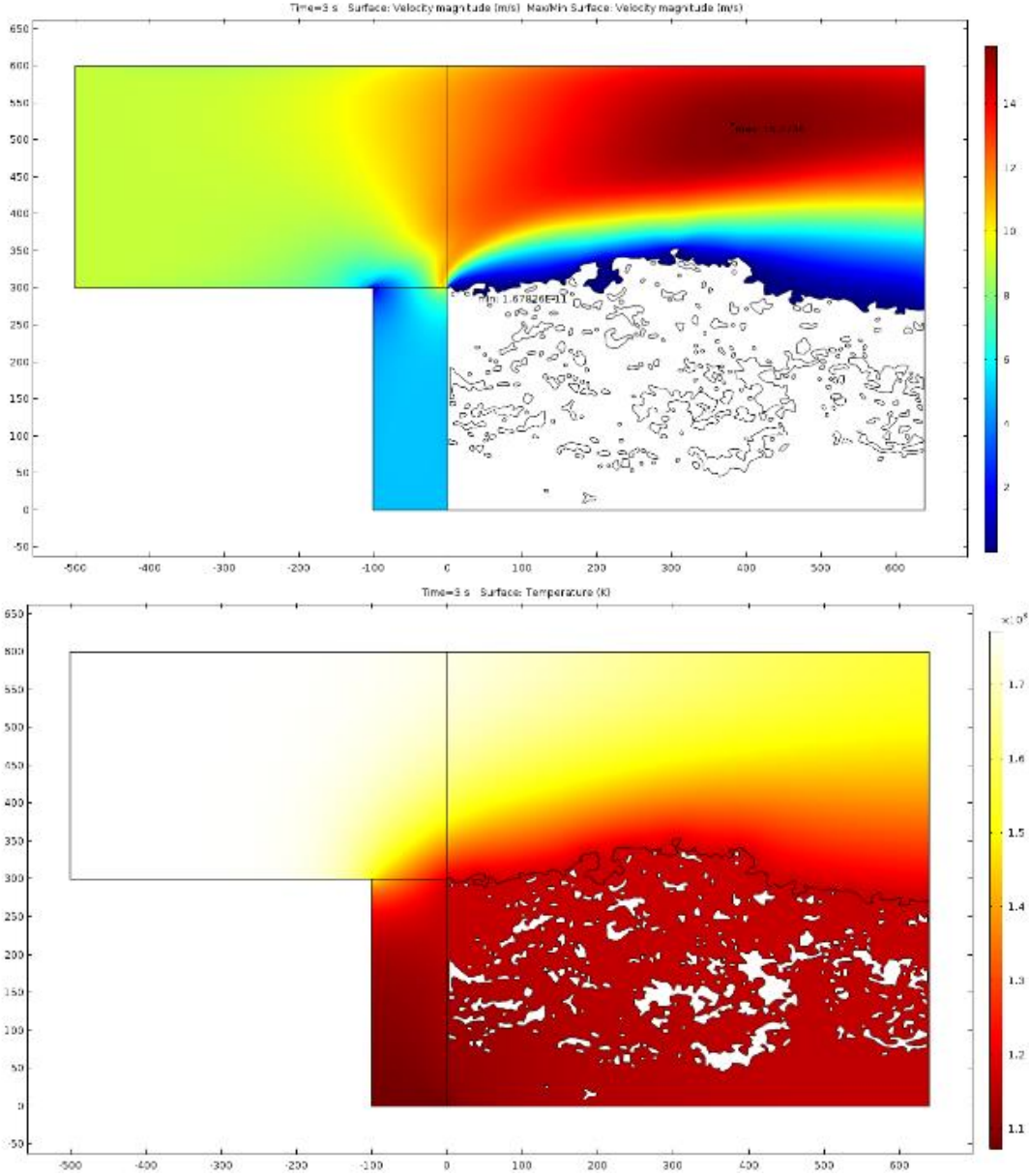
Ağ yapısında görüldüğü gibi yüzeyin yoğun girinti ve çıkıntılı olduğu kısımlarda ve termal bariyer kaplamanın porozitelerinin olduğu kısımlarda ağ yapısı oldukça sık ve küçük haldedir. Bu şekilde söz konusu bölgelerde gerçekleştirilecek ısı iletimin hesaplanmasında daha kesin sonuçlar elde edilmektedir.

Sonlu elemanlar metodu ile türbin bıçaklarında kullanılan film soğutma yönteminin termal bariyer kaplamanın yüzeyeyine etki edecek sıcaklık, akışkan hızı, soğutma etkinliği ve yüzey pürüzlülüğü ile yüzey sıcaklığı arasındaki ilişki incelenmiştir. Modelleme için 3 farklı geometri oluşturulmuştur. Çizelge 4.10’da geometriler ve bu geometrilerin oluşturulmasında kullanılan kaplamaların özellikleri verilmiştir.

**Çizelge 4.10 :** Kullanılan geometriler ve kaplama özellikleri.

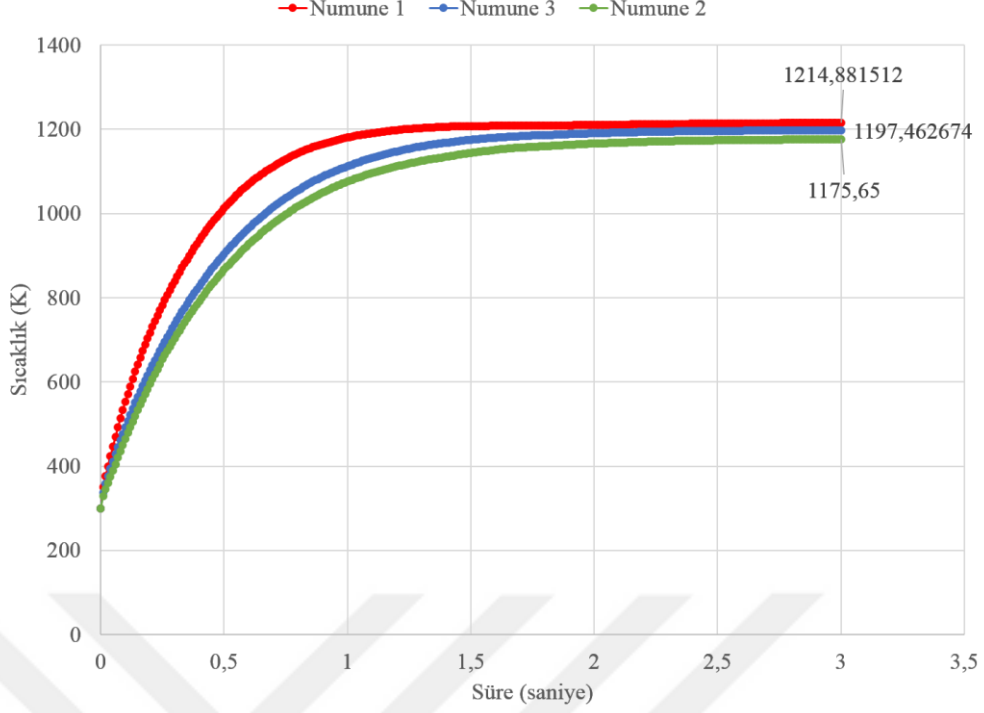
Özellikler	Numune 1	Numune 2	Numune 3
Geometri			
Kaplama kullanılan toz	+75 $\mu\text{m}$	-45 $\mu\text{m}$	-75 +45 $\mu\text{m}$
Ortalama Yüzey Pürüzlülüğü	10,79 $\mu\text{m}$	8,13 $\mu\text{m}$	9,78 $\mu\text{m}$

Her bir numune için gaz akış hızları ve kaplamaya etki eden sıcaklık Şekil 4.12’deki gibi modellenmiştir. Akışkan hızının özellikle kaplama yüzeyinde bulunan çukurlarda neredeyse 0 m/s’ye indiği sonucu alınmıştır. Kaplama yüzeyine etki eden sıcaklığın pürüzlülük değerleri ile ilişkisi Şekil 4.13’de gösterilmektedir.



**Şekil 4.12 :** Sonlu elemanlar metodu sonucunda sıcaklık ve akışkan hızı dağılımı.

+75  $\mu\text{m}$ 'lik tozların kullanıldığı numune 1'in 1214,88 K ile en yüksek ortalama yüzey sıcaklığına, -75 +45  $\mu\text{m}$  tozun kullanılarak üretilen Numune 3'ün 1197,46 K ortalama yüzey sıcaklığına ve -45  $\mu\text{m}$  toz kullanılarak üretilen numune 2'nin 1175K ile en düşük ortalama yüzey sıcaklığına sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



**Şekil 4.13 :** Numunelere göre ortalama yüzey sıcaklığı grafiği.

#### 4.6.7 Yapay sinir ağları analizi

Yapay sinir ağı uygulaması için H<sub>2</sub>O sistemi kullanılmıştır. Ölçülmüş olan yüzey pürüzlülük değerleri ve porozite analizi ile elde edilen veriler porozite dağılımı ile eşleştirilmiştir. Bu sayede yüzey pürüzlülüğü ile porozite oranı ve dağılımı ön görülebilir hale gelmiştir.

Yapay sinir ağı oluşturulurken öncelikle yapay sinir ağının hangi bilgiler arasında ilişki kuracağı belirlenmelidir. Önceden yapılmış ölçüm ve analizlerde kaplamanın içerdiği porozite oranının ve dağılımının kaplamanın sahip olduğu özelliklerde etkin olduğu düşünülmüştür. Bu nedenle kaplamanın porozite özelliklerinin önceden bilinmesi malzemenin sahip olacağı özelliklerin önceden tahmin edilebilmesini sağlayacağı düşünülmüştür. Malzemeye hasar vermeden yapılabilecek bir ölçüm ile malzemenin porozite özelliklerinin belirlenmesi diğer özellikler hakkında da fikir vereceği düşünülmüştür.

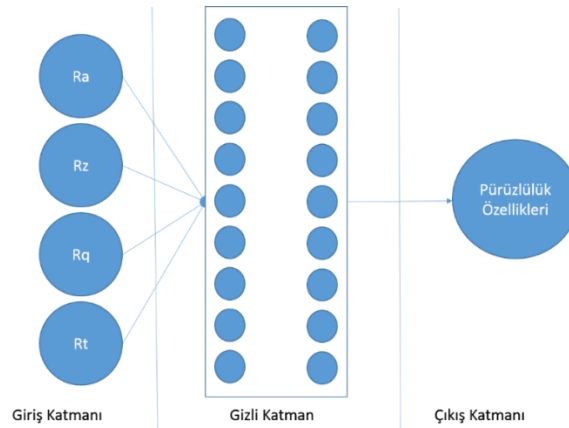
Böyle bir ilişkinin kurulabilmesi için en uygun yöntemin yapay sinir ağları olduğu yapılan literatür çalışmaları sonucunda kararlaştırılmıştır. Yapılacak işlemin sınıflandırma olması gerektiği belirlenmiştir. Bu nedenle %15,61 ortalama poroziteye sahip ince toz ile üretilmiş termal bariyer kaplamalar Düşük Porozite – Lokal olarak isimlendirilmiştir. %19,66 ortalama poroziteye sahip ve -75 +45 toz

dağılımına sahip tozlar ile üretilmiş termal bariyer kaplamalar Orta porozite – Lokal olarak isimlendirilmiştir. %23,83 ortalama porozite oranına sahip termal bariyer kaplamalar yüksek porozite – lokal olarak isimlendirilmiştir. %18,46 ortalama poroziteye sahip ticari toz ise Orta porozite – homojen olarak isimlendirilmiştir. Çizelge 4.11’de isimlendirme özetlenmiştir. İsimlendirmede kaplamanın sahip olduğu porozite miktarı ölçümler içinde sıralandığında elde edilen sıralamadır. İkinci isim ise porozitenin dağılım şeklini ifade eder.

**Çizelge 4.11 : Porozite miktar ve dağılımı.**

Kullanılan Toz Partikül Dağılımı	Porozite Oranı	Porozite Miktarı	Porozite Dağılımı
-45 um (İnce)	% 15,61	Düşük	Lokal
+45 – 75 um (Orta)	% (19,66	Orta	Lokal
+75 um (Kaba)	%23,83	Yüksek	Lokal
Ticari (-110 um)	%18,46	Orta	Homojen

Sınıflandırmanın yapılmasının ardından malzemeye hasar vermeden ölçülebilecek ve sahip olduğu porozite ile ilişkili olan kaplama özellikleri üzerinde durulmuş ve yüzey pürüzlülük değerinin porozite ile ilişkili olabileceği düşünülmüştür. Yapılan pürüzlülük ölçümlerinin sonucunda bu varsayımın doğru olduğu ortaya çıkmıştır. Ölçülen pürüzlülük değeri (Ra, Rz, Rq, Rt) oluşturulan yapay sinir ağının giriş katmanını oluşturmaktadır. Kaç adet gizli katmanın olacağı ve gizli katmanlardaki hücre sayısı ise deneme yanılma yöntemi ile bulunmuştur. Çıkış katmanı ise kaplamanın porozite özellikleri olacağı için tek bir hücreden oluşmaktadır. Oluşturulan yapay sinir ağının şematik görüntüsü Şekil 4.14’de verilmiştir.



**Şekil 4.14 : Oluşturulan YSA'nın şematik gösterimi.**

Yapay sinir ağı H<sub>2</sub>O programı ile oluşturulmuştur. Yapılan deneme yanılma çalışması sonucunda gizli katmanın iki kademedan oluşması gerektiği ve her bir kademenin 200 hücreye sahip olması gerektiği belirlenmiştir. Hata oranının minimize edilmesi için gerekli döngü sayısının 6500 olduğu ve bunun üstündeki döngü sayısında hatada bir azalmanın olmadığı gözlemlenmiştir. Sonuç olarak kurulan yapay sinir ağının sahip olduğu özellikler Çizelge 4.12’de belirtilmiştir.

**Çizelge 4.12 : Oluşturulan YSA’nın özellikleri.**

<b>Kullanılan Program</b>	<b>Giriş Katmanı Nöron Sayısı</b>	<b>Gizli Katman Sayısı</b>	<b>Gizli Katmanlardaki Nöron Sayısı</b>	<b>Döngü Sayısı</b>	<b>Çıkış Katmanı</b>	<b>Veri Akışı</b>
H2O Flow	4	2	200 – 200	6500	1	İleri Beslemeli

Yapay sinir ağının oluşturulabilmesi için 246 pürüzlülük değeri ölçülmüştür. Bu pürüzlülük değerlerinin 100 tanesi yapay sinir ağının eğitimi için 100 tanesi test edilmesi ve 46 tanesi de doğrulama için kullanılmıştır. Doğrulama sırasında sadece giriş bilgileri verilerek sonucun tahmin edilmesi istenmiştir.

Çizelge 4.13’de sonucu verilen yapay sinir ağı tezin amacı olan malzemeye hasar vermeden malzemenin barındırdığı poroziteyi belirlemenin basit bir ölçüm ile mümkün olduğunu göstermiştir. Yapılan diğer çalışmalarla kıyaslandığında porozite belirlemek için hazırlanmış yapay sinir ağlarından ayrılmaktadır. Literatürde [4] porozite belirleme çalışması proses parametreleri kullanılarak gerçekleştirilmek istenmiştir. Bu yaklaşım APS ile TBK üretiminin kaotik koşulları gereği nedeniyle her zaman mümkün olmamaktadır. Ancak üretilen kaplamadan alınacak bir ölçüm ile porozite belirlenmesi kullanım açısından daha elverişlidir. Tez kapsamında hazırlanan YSA ile üretilmiş kaplamadan alınan ölçüm ile porozitenin belirlenmesi sağlanmıştır.

**Çizelge 4.13 : YSA analizi sonucunda yapılan deneme sonucu.**

<b>Ra</b>	<b>Rz</b>	<b>Rq</b>	<b>Rt</b>	<b>YSA sonucu</b>	<b>Kullanılan Toz</b>
10.05	12.55	83.4	96.31	Yüksek - Lokal	+75 um
12.2	14.65	82.86	86.94	Yüksek - Lokal	+75 um
10.92	13.49	96.56	106.14	Yüksek - Lokal	+75 um
10.88	13.29	86.77	95.88	Yüksek - Lokal	+75 um
10.66	13.35	127.69	136.94	Yüksek - Lokal	+75 um
7.53	9.32	96.99	137.78	Düşük - Lokal	-45 um
8.23	10.1	74.24	128.29	Düşük - Lokal	-45 um
8.08	10.23	71.93	80.21	Düşük - Lokal	-45 um
8.36	10.37	81.44	125.02	Düşük - Lokal	-45 um
8.75	10.49	83.31	120.6	Düşük - Lokal	-45 um
8.69	10.77	71.01	77.26	Orta - Lokal	+75 – 45 um
9.37	11.67	78.01	82.52	Orta - Lokal	+75 – 45 um
9.64	11.83	73.79	84.53	Orta - Lokal	+75 – 45 um
10.24	12.51	78.34	92.65	Orta - Lokal	+75 – 45 um
9.82	12.25	82.54	93.59	Orta - Lokal	+75 – 45 um
8.33	10.27	87.99	149.41	Orta - Homojen	Ticari
8.09	10.03	84.28	120.69	Orta - Homojen	Ticari
8.38	10.32	108.35	158.82	Orta - Homojen	Ticari
8.64	10.7	81.37	137.91	Orta - Homojen	Ticari
7.94	10.19	106.45	140.44	Orta - Homojen	Ticari

Çizelge 4.13’de gözlemlenen veriler kullanılan tozlar ile oluşması beklenen porozite değerlerin YSA’dan çıkan sonuçla %100 uyum halinde olduğunu göstermektedir.



## 5. SONUÇ VE ÖNERİLER

- Termal bariyer kaplamaları hasara uğratmadan porozite oranı ve dağılımını yüzey pürüzlülük değerinden tahmin ederek sınıflandırabilen bir yapay sinir ağı oluşturulmuştur. Bu yapay sinir ağı ilerleyen aşamada daha geniş çaplı olarak hazırlanabilecek yapay sinir ağları için bir başlangıç çalışması niteliğindedir. Çalışmada sadece toz tane boyutları değiştirilerek kaplama porozitesine etkisi belirlenmiştir. Ancak kaplama üretim prosesine etki eden diğer parametrelerin de sistematik olarak incelenmesi ve kaplama porozitesi üzerine olan etkisinin incelenmesi ve oluşturulan yapay sinir ağına entegre edilmesi gerekmektedir.
- Sonlu elemanlar metodu için gerçek taramalı elektron mikroskobu görüntülerinin kullanılabilmesini sağlayan bir metod geliştirilmiştir. Bu sayede geometri oluşturma programları yardımıyla hazırlanan geometrilerdeki varsayımlar ortadan kalkarak gerçeğe daha yakın sonuçların alınabilmesi sağlanmıştır.
- Gaz türbin bıçaklarının soğutulması için uygulanan yöntemler incelenmiş ve film soğutma yöntemi ile bıçak yüzeyine etki eden sıcaklığın 300°C'ye yakın düşürüldüğü sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Malzeme yüzeyine etki eden sıcaklıkların termal bariyer kaplamaların pürüzlülüğü ile değişimi incelenmiştir. En yüksek yüzey pürüzlülük değerine sahip numunenin en yüksek ortalama yüzey sıcaklığına (1214°C), en düşük yüzey pürüzlülüğü değerine sahip numunenin ise en düşük ortalama yüzey sıcaklığına (1175°C) sahip olduğu gözlemlenmiştir.
- İlerleyen çalışmalarda özellikle kompozit kaplamaların faz analizinin gerçekleştirilebilmesi için X-ışını difraksiyon şiddetlerinin porozite oranı ile gösterdiği değişim belirlenmiştir. Yüksek ve lokal porozite içeren kaplamaların daha düşük şiddette pik verdiği homojen dağılmış küçük porozitelerin en yüksek şiddette pik verdiği gözlemlenmiştir.

- Porozite oranı ve dağılımına bağlı olarak yüksek sıcaklık korozyon davranışı incelenmiş ve lokal porozitelerin korozyon sonucu oluşan kristallerin büyümesini engelleyici bir rol aldığı, homojen dağılmış porozitelerin ise kristallerin büyümesini engelleyemediği ve bu nedenle hasar oranının yüksek olduğu düşünölmüştür. Gelecek çalışmalarda kristallerin büyüme mekanizmaları üzerine ayrıntılı bir çalışma yapılarak daha kesin sonuçlara ulaşılabilecektir.
- Kaplama yüzeyi üzerine etki eden sıcaklıkların düşürölmesi için uygulanan diğer yöntemlerin de incelenmesi neticesinde termal bariyer kaplamaların, termal izolasyondan çok çevresel etkileri engellemesinin ön plana geçtiği bu nedenle yüksek sıcaklık korozyonu ve CMAS gibi kimyasal etkileşim sonucunda oluşan hasarlara daha dirençli kaplamaların geliştirilmesine yönelik çalışmalara önem verilmelidir.
- Kaplamalara sistematik olarak uygulanan termal şok testleri sonucunda özellikle bağ katman ve seramik katman ara yüzeyindeki yüksek porozitenin, seramik katmanın ayrılmasında etkin bir rol aldığı gözlemlenmiştir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Elmabrouk, O. M. and Kalkanli, A.** (2015). A Neural Network System for Predicting the Effect of Quartz and Heat Treatment on the Corrosion Properties of Ceramic Coating, *J.of Multidisciplinary Engineering Science and Technology*,2, Sf.1-5.
- [2] **Asada, Y., Nakada, E., Matsumoto,S., and Uesaka,S.,** (1997). Prediction of Tc for  $YBa_2Cu_3O_z$  doped with Ca using neural network, *Journal of superconductivity*, 10, Sf. 23-26.
- [3] **Hwang, W., Park H.C., Han K.S.,** (1998), Static Strength and Failure-Mechanism Of CFRP Under Biaxial Loadings, *Mechanics of composite materials*, 34, Sf. 28-42
- [4] **Ezugwu, E.O., Arthur,S.J.,ve Hines, E.J.** (1995), Tool-wear prediction using artificial neural networks, *J.Mater.Process. Technol.*, 49, Sf. 225.
- [5] **Guessasma, S., Montavon, G., ve Coddet, C.** (2004). Modeling of the APS plasma spray process using artificial neural networks: basis, requirements and an example. *Computational Materials Science*, 29, Sf. 315–333.
- [6] **Guessasma, S.,** Trifa, F. I., Montavon. G., ve Coddet, C. (2004).  $Al_2O_3$ –13% weight  $TiO_2$  deposit profiles as a function of atmospheric plasma spraying parameters. *Materials and Design*, 25, Sf. 307–315.
- [7] **Guessasma, S.,** ve Coddet, C. (2005). Neural computation applied to APS spray process: Porosity analysis. *Surface & Coatings Technology*, 197, Sf. 85–92.
- [8] **Guessasma, S.,** ve Coddet, C. (2004). Microstructure of APS alumina – titania coatings analysed using artificial neural network. *Acta Materialia*, 52, Sf. 5157–5164.
- [9] **Guessasma, S.,** Bounazef, M., Nardin, P. (2006). Neural computation analysis of alumina–titania wear resistance coating. *International Journal of Refractory Metals & Hard Materials*, 24, Sf. 240–246
- [10] **Sha,W.,** (2010). Comment on “Modelling of the APS plasma spray process using artificial neural networks: Basis, requirements and an example” by Guessasma et al. *Computational Materials Science*, 50, Sf. 805–809.
- [11] **Bialas, M.,** (2008). Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings. *Surface & Coatings Technology*, 202, Sf. 6002–6010.
- [12] **Zhu, W., Wang, J.W., Yang, L., Zhou, Y.C., Wei, Y.G, ve Wu,R.T.,** (2017). Modeling and simulation of the temperature and stress fields in a 3D turbine blade coated with thermal barrier coatings, *Surface & Coatings Technology*, 315, Sf. 443 – 453.

- [13] **Toprak, S.** (2007). Gaz Türbin Kanatlarının Soğutulmasının Önemi ve Soğutma Yöntemlerinin İncelenmesi, (yüksek lisans tezi), Trakya Üniversitesi.
- [14] **Altorairi, M.** (2003). Film Cooling From Cylindrical Holes In Transverse Slots, (yüksek lisans tezi) King Fahad University of Petroleum and Minerals
- [15] **Garg, V.K.**, (2001). Heat Transfer in Gas Turbines, AYT Research Corporation, Ohio
- [16] **Dalkiliç, S., ve Tanatmış, A. A.** (2009). Termal bariyer kaplama sistemlerinde yüksek sıcaklıkta düşük çevrimli yorulma şartları altında oluşan hasarların incelenmesi. Havacılık ve Uzay Teknolojileri Dergisi, 4 (2), Sf. 15–27.
- [17] **Gök, M.G.** (2015). Çok Katmanlı ve Fonksiyonel Derecelendirilmiş CYSZ/Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Esaslı Yeni Nesil Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi Ve Karakterizasyonu. (doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [18] **Xu, H.** (2011). Thermal Barrier Coatings. Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [19] **Vaßen, R., Jarligo, M. O., Steinke, T., Mack, D. E., ve Stöver, D.** (2010). Overview on advanced thermal barrier coatings. Surface and Coatings Technology, 205 (4), Sf. 938–942.
- [20] **Dokur, M. M.** (2014). Çok Katmanlı CYSZ / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CYSZ / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Isıl-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. (doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [21] **Peters, M., Leyens, C., Schulz, U., ve Kaysser, W.** (2001). EB-PVD Thermal Barrier Coatings for Aeroengines and Gas Turbines. Advanced Engineering Materials, 3 (4), Sf. 193–204.
- [22] **Kahraman, N., Gülenç, B., Durgutlu, A.** (2005). Alevle spreyleme yöntemiyle kaplanan malzemelerdeki aşınma davranışının incelenmesi, 1.Uluslararası Mesleki ve Teknik Eğitim Teknolojileri Kongresi, İstanbul, 1392-1399.
- [23] **Mishra, S.B., Chandra, K., Prakash, S., Venkataraman B.** (2005). Characterisation and erosion behaviour of a plasma sprayed Ni<sub>3</sub>Al coating on a Fe- based superalloy, Materials Letters, 59, 3694-3698.
- [24] **Yilbas B.S. and Arif, A.F.M.** (2007). Residual stress analysis for HVOF diamalloy 1005 coating on Ti-6Al-4V alloy, Surface and Coatings Technology, 202, 3, 559-568.
- [25] **Lin, B.T., Jean, M.D., Chou, J.H.** (2007). Using response surface methodology for optimizing deposited partially stabilized zirconia in plasma spraying, Applied Surface Science, 253, 3254– 3262.
- [26] **Smith, R.W., Knight, R.** (1995). Thermal Spraying I: Powder Consolidation-From Coating to Forming, JOM, 47, 8, 32-39.
- [27] **Sarıkaya, Ö.** (2003). Al-12Si Malzeme üzerine plazma püskürtme tekniği ile Al-Si+B<sub>4</sub>C kaplama, Doktora Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,

- [28] **Özel, S.**(2009). Alüminyum Alaşımı ve Bronzu yüzeyine oksit ve karbür bileşiklerinin plazma sprey yöntemiyle kaplanmasının araştırılması
- [29] **Bach, F.W., Duda, T.** (2000). Moderne Beschichtungsverfahren, DGM Deutsche Gesellschaft für Materialkunde e.V., Willey-VCH, Weinheim-New York, 80-103.
- [30] **Kahraman, N., Gülenç, B.** (2002). Abrasive wear behaviour of powder flame sprayed coatings on steel substrates, *Materials & Design* 23, 8, 721-725.
- [31] **McGrann ,R.T.R., Greving, D.J., Shadley, J.R., Rybicki, E.F., Kruecket., L., Bodger, B.E.** (1998). The effect of coating residual stress on the fatigue life of thermal spray-coated steel and aluminum, *Surface & Coatings Technology*, 108-09, 1-3, 59-64.
- [32] **Erdoğan, M., Güneş, İ., Develi, F.** (2006). Plazma Sprey ve Kullanım Alanları, *Teknolojik Araştırmalar, Makine Teknolojileri Dergisi*, 1, 61-66.
- [33] **Kutbay, I. ve Daşçılar, B.** (2006). Plazma Sprey Kaplama Yöntemiyle Farklı  $Al_2O_3-TiO_2$  Tozlarının Kaplama Kalınlığına Bağlı Olarak Kaplama Pürüzlülüğüne ve Kaplama Sertliğine Etkisi, 13. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 611-617.
- [34] **Pamuk, U., Çimenoğlu, H.** (1997). Plazma Spreylenmiş  $Cr_3C_2-NiCr$  Kaplamaların Abrasiv Aşınma Davranışlarının İncelenmesi, 9. Uluslararası Metalurji ve Malzeme Kongresi, İstanbul, 291-296.
- [35] **Zhou, M., Nose, M., Makino, Y., Nogi, K.** (2000). Annealing effects on the structure and mechanical properties of r.f.-sputtered Cr-B hard thin films, *Thin Solid Films* 359, 2, 165-170.
- [36] **Matejka, D., Benko, B.** (1989). Plasma Spraying of Metallic and Ceramic Materials, ISSN 0471-91876-8, U.K.
- [37] **Fang, J.C., Xu, W.J., Zhao, Z.Y., Zeng, H.P.** (2007). In-flight behaviors of  $ZrO_2$  particle in plasma spraying, *Surface & Coatings Technology*, 201, 5671-5675.
- [38] **Wang, J.J., Lin, T., Chen, S.B.** (2005). Obtaining weld pool vision information during aluminium alloy TIG welding, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 26, 3, 219-227.
- [39] **Bolelli, G., Cannillo, V., Lusvardi, L., Manfredini, T.** (2006). Glass-alumina composite coatings by plasma spraying. Part I: Microstructural and mechanical characterization, *Surface & Coatings Technology*, 201, 458-473.
- [40] **Altuncu, E.** (2011). YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması. (doktora tezi). Sakarya Üniversitesi
- [41] **Wang, L.** (2013). Thermal Cycling and Thermal Radiation Performances of Novel Thermal Barrier Coatings. Louisiana State University.
- [42] **Dokur, M. M.** (2014). Çok Katmanlı  $CYSZ / Al_2O_3$  ve  $CYSZ / Al_2O_3+YSZ$  Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Isıl-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. (doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.

- [43] **Seraffon, M.** (2012). Performances of Air Plasma Sprayed Thermal Barrier Coatings. Cranfield University.
- [44] **Altuncu, E.** (2011). YSZ ve CSZ Esaslı Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi, Karakterizasyonu ve Termal Çevrim Performanslarının Karşılaştırılması. (doktora tezi). Sakarya Üniversitesi.
- [45] **Gupta, M.** (2014). Design of Thermal Barrier Coatings A modelling approach. University West.
- [46] **Dong, H., Yang, G.J., Li, C.X., Luo, X.T., ve Li, C.J.** (2014). Effect of TGO Thickness on Thermal Cyclic Lifetime and Failure Mode of PlasmaSprayed TBCs. Journal of the American Ceramic Society, 97 (4), Sf. 1226–1232.
- [47] **Cao, X. Q., Vassen, R., ve Stoeber, D.** (2004). Ceramic materials for thermal barrier coatings. Journal of the European Ceramic Society, 24 (1), Sf. 1–10.
- [48] **Cao, X.** (2007). Application of Rare Earths in Thermal Barrier Coating Materials. Journal of Materials Science Technologies, 23 (1), Sf. 15–35.
- [49] **Cao, X.** (2004). Development of New Thermal Barrier Coating Materials for Gas Turbines. Forschungszentrum Jülich.
- [50] **Ciftyürek, E.** (2009). %8 YSZ (İtiryum ile Stabilize Edilmiş ZrO<sub>2</sub>) Termal Bariyer Kaplamaların (TBK) Üretilmesi ve Proses Parametreleri Optimizasyonu. (yüksek lisans tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [51] **Leoni, M., Jones, R., ve Scardi, P.** (1998). Phase stability of scandia–yttriumstabilized zirconia TBCs. Surface and Coatings Technology, 108-109, Sf. 107–113.
- [52] **Ma, W., ve Dong, H.** (2011). Ceramic thermal barrier coating materials. İçinde H. Xu (Ed.), Thermal Barrier Coatings (ss. 25–52). Woodhead Publishing Limited, Cambridge.
- [53] **Dokur, M. M.** (2014). Çok Katmanlı CYSZ / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve CYSZ / Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>+YSZ Termal Bariyer Kaplamaların Üretimi ve Isıl-Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. (doktora tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi.
- [54] **Url-1** [https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/sofc\\_electrolyte.php](https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/fuel-cells/sofc_electrolyte.php) ulaşım tarihi: 10.04.2017
- [55] **Miller, R. A., Smialek, J. L. ve Garlick, R. G.,** (1981) Phase Stability in Plasma-Sprayed, Partially Stabilized Zirconia–Yttria, Advances in Ceramics, Vol. 3., Science and Technology of Zirconia I, Sf. 241–253
- [56] **Wang, L., Eldridge, J. I., ve Guo, S. M.** (2013). Thermal radiation properties of plasma-sprayed Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> thermal barrier coatings. Scripta Materialia, 69 (9), Sf. 674–677.
- [57] **Leckie, R. M., Kramer, S., Ruhle, M., ve Levi, C. G.** (2005). Thermochemical compatibility between alumina and ZrO<sub>2</sub>–GdO<sub>3/2</sub> thermal barrier coatings. Acta Materialia, 53 (11), Sf. 3281–3292.
- [58] **Drexler, J. M., Chen, C. H., Gledhill, A. D., Shinoda, K., Sampath, S., ve Padture, N. P.** (2012). Plasma sprayed gadolinium zirconate thermal

barrier coatings that are resistant to damage by molten Ca-Mg-Alsilicate glass. *Surface and Coatings Technology*, 206 (19-20), Sf. 3911– 3916.

- [59] **Habibi, M. H., Wang, L., ve Guo, S. M. (2012).** Evolution of hot corrosion resistance of YSZ, Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>, and Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>+YSZ composite thermal barrier coatings in Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>+V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> at 1050°C. *Journal of the European Ceramic Society*, 32 (8), Sf. 1635–1642.
- [60] **Habibi, M. H., Wang, L., ve Guo, S. (2012).** An Investigation on Hot Corrosion Resistance of Plasma Sprayed Composite YSZ-Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> and Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Thermal Barrier Coatings in Simulated Turbine Environment at 1050°C. Volume 3: Design, Materials and Manufacturing, ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- [61] **Mensah, P. F., Diwan, R., Nandikolla, S., Coker, O., ve Sahoo, P. (2012).** Thermo - Mechanical Study of the Role of Gd<sub>2</sub>Zr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> (GZ) in Improving Life of YSZ and GZ Double Layered Thermal Barrier Coatings. İçinde Volume 7: Fluids and Heat Transfer, International Mechanical Engineering Congress and Exposition.
- [62] **Zhao, H. (2009).** Low Conductivity Thermal Barrier Coatings. University of Virginia.
- [63] **Liu, Y., Persson, C., ve Wigren, J. (2004).** Experimental and Numerical Life Prediction of Thermally Cycled Thermal Barrier Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 13 (3), Sf. 415–424.
- [64] **Silahtaroglu, G. (2016).** Veri Madenciliği. Papatya Yayıncılık, İstanbul
- [65] **Elmas, Ç. (2016).** Yapay Zeka Uygulamaları. Seçkin Yayıncılık, Ankara
- [66] **Yılmaz, A. (2017).** Yapay Zeka,. Kodlab Yayın Dağıtım Yazılım, İstanbul
- [67] **Url-2** <https://publi.cz/books/339/06.html> alındığı tarih: 10.04.2017
- [68] **Url-3** <http://www.bogotobogo.com/python/scikit-learn/Artificial-Neural-Network-ANN-1-Introduction.php>
- [69] **Url-4** <http://ifni.co/bbHTM.html> alındığı tarih: 10.04.2017
- [70] **Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., Williams, R. J. (1986).** "Learning representations by back-propagating errors". *Nature*. 323. Sf. 533–536.
- [71] **Url-5** <http://mlexplore.org/2017/03/12/hopfield-networks-in-go/>, alındığı tarih: 10.04.2017
- [72] **Url-6** <https://www.knime.org/downloads/overview> ulaşım tarihi: 10.04.2017
- [73] **Topçu, M., Taşgetiren, S. (1998).** Mühendisler için Sonlu Elemanlar Methodu, PAÜ Mühendislik Fakültesi Matbaası, Denizli
- [74] **Balci., M.N. (2012).** Isı Üretimi Olan Sürtünmeli Temasların Sıcaklık Bağımlı Özellikler Kullanılarak Analizi. (yüksek lisans tezi). Hacettepe Üniversitesi





## ÖZGEÇMİŞ



**Ad-Soyad** : Utku Orçun Gezici

**Doğum Tarihi ve Yeri** : Kurucaşile / 10.07.1990

**E-posta** : geziciu@itu.edu.tr

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2014, İstanbul Teknik Üniversitesi, Kimya – Metalurji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü
- **Yüksek Lisans** : 2014 - Halen, İstanbul Teknik Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Malzeme Mühendisliği Programı