

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN ENDÜSTRİYEL GAZ  
TÜRBİNLERİNDE KULLANIM SÜRELERİNİN MİKRO YAPILARI  
ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**

**Met. Müh. Can MARALCAN**

**Anabilim Dalı: Metalurji ve Malzeme Mühendisliği  
Programı: Seramik Mühendisliği**

**Tez Danışmanları: Prof. Dr. Onuralp YÜCEL**

**Yard. Doç. Dr. Bora DERİN**

**HAZİRAN 2008**

**NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN ENDÜSTRİYEL GAZ  
TÜRBİNLERİNDE KULLANIM SÜRELERİNİN MİKRO YAPILARI  
ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ**  
**Met. Müh. Can MARALCAN**  
**(506991149)**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 5 Mayıs 2008**  
**Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Haziran 2008**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Onuralp YÜCEL**

**Yard. Doç. Dr. Bora DERİN**

**Diğer Jüri Üyeleri: Prof. Dr. Ersin SERHATLI ( İ.T.Ü.)**

**Doç. Dr. Nilgün YAVUZ ( İ.T.Ü.)**

**Doç. Dr. Filiz ÇINAR – ŞAHİN ( İ.T.Ü.)**

**Haziran 2008**

## ÖNSÖZ

Yüksek lisans tez çalışmam boyunca tez yönetimimi üstlenen ve benden hiçbir yardımı esirgemeyen değerli hocalarım Prof. Dr. Onuralp YÜCEL ve Yrd. Doç. Dr. C. Bora DERİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Deneysel çalışmalarım sırasında bana büyük bir özveri ile yardımcı olan arkadaşım Teknisyen Hasan DİNÇER'e teşekkürlerimi sunarım

Hayatım boyunca beni destekleyen ve yüksek lisans eğitimimi tamamlamamda maddi manevi desteklerini benden esirgemeyen aileme ve bütün arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca, çalışmalarım sırasında bana her zaman anlayış ve sabır gösterip, destek olan kıymetli eşim Elif MARALCAN' a teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2008

Can MARALCAN

## İÇİNDEKİLER

<b>ÖNSÖZ</b>	<b>ii</b>
<b>TABLO LİSTESİ</b>	<b>v</b>
<b>ŞEKİL LİSTESİ</b>	<b>vi</b>
<b>ÖZET</b>	<b>viii</b>
<b>SUMMARY</b>	<b>ix</b>
<b>1. GİRİŞ VE AMAÇ</b>	<b>1</b>
<b>2. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ENERJİ ÜRETİMİ</b>	<b>3</b>
<b>3. GAZ TÜRBİNLERİNE GİRİŞ</b>	<b>6</b>
<b>3.1 Gaz Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi</b>	<b>6</b>
3.1.1 Modern gaz türbinlerine geliş	12
<b>3.2. Gaz Türbini Kanatçık Malzemelerinin Özellikleri</b>	<b>16</b>
3.2.1 Kanatçık malzemeleri	18
<b>3.3 Gaz Türbinlerinin Termodinamik Analizi</b>	<b>19</b>
<b>3.4 Gaz Türbinlerinde Kullanılan Yakıtlar</b>	<b>21</b>
3.4.1 Genel bilgiler	21
3.4.2 Gaz halindeki yakıtlar	24
<b>4. ÇOK KRİSTALLİ SÜPER ALAŞIMLAR</b>	<b>36</b>
<b>4.1 Nikel Esaslı Süper Alaşım Dizaynı</b>	<b>38</b>
<b>4.2 Nikel Esaslı Süper Alaşımın Ergitme ve Dökümü</b>	<b>42</b>
4.2.1 Vakum indüksiyon ergitmesi	42
4.2.2 Vakum hassas döküm	45
4.2.3 Nikel esaslı süper alaşımların ısı işleme	49
<b>4.3 Nikel Esaslı Süper Alaşım Üzerine Yapılmış Örnek Çalışmalar</b>	<b>51</b>
4.3.1 Nikel esaslı süper alaşımlarda oluşan kusurların mikro yapı görüntüleriyle incelenmesi	51
4.3.1.1 Giriş	51
4.3.1.2 Numuneler ve deneysel çalışma	52
4.3.1.3 Sonuçlar	53
4.3.1.4 Değerlendirmeler	55
4.3.2 GTD 111 nikel esaslı süper alaşımında mikro yapının sıcaklıkla değişimi	65
4.3.2.1 Giriş	66
4.3.2.2 Deneysel çalışma	66
4.3.2.3 Sonuçlar	67

<b>5. SÜPER ALAŞIMLARA UYGULANAN KORUYUCU KAPLAMALAR</b>	<b>72</b>
<b>6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR</b>	<b>76</b>
<b>6.1 DeneYlerde Kullanılan Hammaddeler ve Teçhizatlar</b>	<b>76</b>
<b>6.2 DeneYlerin Yapılışı</b>	<b>78</b>
<b>7. DENEY SONUÇLARI</b>	<b>80</b>
<b>7.1 Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:</b>	<b>80</b>
7.1.1 A1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:	80
7.1.2 A2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:	81
7.1.3 A3 Numunesinin noktasal elementel analiz sonuçları	82
7.1.4 B1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:	83
7.1.5 B2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:	84
7.1.6 B3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:	85
<b>7.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları</b>	<b>86</b>
<b>7.3 Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları</b>	<b>89</b>
7.3.1 A1 Numunesi kaplama kalınlık ölçüm sonuçları	90
7.3.2 A2 Numunesi kaplama kalınlık ölçüm sonuçları	91
7.3.3 A3 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları	92
7.3.4 B1 Numunesi kaplama kalınlık ölçüm sonuçları	93
7.3.5 B2 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları	94
7.3.6 B3 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları	95
<b>8. GENEL SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER</b>	<b>96</b>
<b>KAYNAKLAR</b>	<b>98</b>
<b>EKLER</b>	<b>100</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ</b>	<b>109</b>

**TABLO LİSTESİ****Sayfa No**

<b>Tablo 2.1</b>	2003 Yılı itibarı ile dünya enerji profili.....	3
<b>Tablo 2.2</b>	Türkiye’de elektrik üretim kapasitesi artışı (2001 - 2006) .....	4
<b>Tablo 2.3</b>	2005 Yılında Türkiye’de birincil enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi (MW).....	4
<b>Tablo 3.1</b>	Gaz Türbini Kanatlarında Kullanılan Yüksek Sıcaklık Alaşımları.....	18
<b>Tablo 3.2</b>	3 Farklı doğaz gazın karşılaştırılması .....	25
<b>Tablo 3.3</b>	Distilasyon gazlarının özellikleri.....	26
<b>Tablo 3.4</b>	Almanya’da Ruhr bölgesinde bir yüksek fırın gazı içinde bulunan tozun bileşimi.....	28
<b>Tablo 3.5</b>	Gaz türbinlerinde kullanılan yakıtların genel özellikleri .....	30
<b>Tablo 3.6</b>	$C_2H_2$ , $CO$ , $H_2S$ Gazlarının Karşılaştırılması .....	31
<b>Tablo 3.7</b>	Taş Kömürü Gazı – Jeneratör Gazı Karşılaştırması .....	33
<b>Tablo 4.1</b>	Bazı Nikel Esaslı Süper Alaşımların Gerilme Dayanımları .....	41
<b>Tablo 4.2</b>	Bazı döküm nikel esaslı süper alaşımları fiziksel özellikleri.....	44
<b>Tablo 4.3</b>	Rene 125 nikel esaslı süper alaşımının bileşimi.....	52
<b>Tablo 4.4</b>	Inconel 713 nikel esaslı süper alaşımının bileşimi.....	52
<b>Tablo 4.5</b>	Gövde bölgesinden alınan sertlik değerleri.....	54
<b>Tablo 4.6</b>	Uç bölgelerden alınan sertlik değerleri.....	55
<b>Tablo 4.7</b>	Isıl İşlem Görmemiş Numunenin(Numune3) Sertlik Değerleri .....	60
<b>Tablo 4.8</b>	Isıl İşlem Görmüş Numunenin(Numune4) Sertlik Değerleri.....	60
<b>Tablo 4.9</b>	GTD 111 Ni Esaslı Süper Alaşımın Kimyasal Bileşimi.....	67
<b>Tablo 4.10</b>	GTD 111 Ni Esaslı Süper Alaşımın EDS Analizi Sonuçları .....	67
<b>Tablo 4.11</b>	Dendrit merkezi ve $\gamma$ - $\gamma$ Ötektidinin EDS Analizi Sonuçları .....	68
<b>Tablo 5.1</b>	Birleşik Karbür (UCAR) MCrAlY Kaplamalarının Örnekleri .....	74
<b>Tablo 6.1</b>	Deneylerde Kullanılan Ni esaslı GTD 111 Süper Alaşımının Kimyasal İçeriği .....	76

**EKLER**

<b>Tablo A.1</b>	A1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları .....	100
<b>Tablo A.2</b>	A2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları .....	102
<b>Tablo A.3</b>	A3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları .....	103
<b>Tablo A.4</b>	B1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları.....	105
<b>Tablo A.5</b>	B2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları.....	106
<b>Tablo A.6</b>	B3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları.....	107

## ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1	2003 yılı itibarı ile dünya enerji profili.....4
Şekil 2.2	Kaynaklara göre kurulu güç.....5
Şekil 3.1	Barber türbini .....7
Şekil 3.2	Fernihough türbini .....8
Şekil 3.3	Armengaud – Lemale türbini .....9
Şekil 3.4	Bischof türbini.....10
Şekil 3.5	Baetz türbini .....11
Şekil 3.7	Türbin kanatçıkları .....17
Şekil 3.8	Kanatçık soğutma kanallarının görünümü .....19
Şekil 3.9	Basit tek şaftlı gaz türbini .....20
Şekil 4.1	Süper alaşımların yıllara göre sıcaklık dayanımı artışı.....37
Şekil 4.2	$\gamma'$ Hacim Yüzdesi ile Gerilme Dayanımı Değişimi .....41
Şekil 4.3	İncelenen Numuneler.....53
Şekil 4.4	Sertlik Ölçümlerinin Alındığı Noktalar .....54
Şekil 4.5	Numune 1'in mikro yapısı .....56
Şekil 4.6	Numune 1 mikro yapısında karbür hattı .....56
Şekil 4.7	Numune 2 mikro yapısı.....57
Şekil 4.8	Karbür hattı boyunca ilerleyen çatlak görüntüsü .....57
Şekil 4.9	Numune 2'de karbürlerin görünümü .....58
Şekil 4.10	a – b :Numunelerin Kaplama-Matris Arayüzey Görüntüsü.....59
Şekil 4.11	Numune 3 mikro yapı görüntüsü.....61
Şekil 4.12	Rene 125 Ni esaslı süper alaşımının EDS analizi .....61
Şekil 4.13	Isıl işlem görmüş (numune 4) mikro yapısı .....62
Şekil 4.14	$\gamma$ Matrisinde boşluk oluşumu .....62
Şekil 4.15	Standart malzeme üzerindeki kaplamanın mikro yapısı.....63
Şekil 4.16	Şekil 4.15'da gösterilen 1, 2 ve 3 noktalarına göre EDS analiz sonuçları görülmektedir .....64
Şekil 4.17	Isıl işlem görmüş numunenin kaplamasının mikrografı ve EDS analiz sonuçları.....65
Şekil 4.18	Standart ısıl işlem görmüş GTD 111 Ni esaslı süper alaşımın mikroyapısı.....68
Şekil 4.19	Sıcaklık ve Süreye Bağlı Olarak $\gamma'$ tanelerinin mikroyapısında oluşan değişimlerin SEM görüntüleri (a)871°C 50 saat (b) 871 °C 5000 saat (c) 871 °C 10000 saat (d) 927 °C 50 saat (e) 927 °C 5000 saat (f) 927 °C 10000 saat (g) 982 °C 50 saat (h) 982 °C 5000 saat (i) 982 °C 10000 saat.....69
Şekil 4.20	$\gamma$ Boyutunun Süreye ve Sıcaklığa Bağlı Değişimi.....70
Şekil 4.21	Aktivasyon enerjisinin $\gamma$ büyümesine bağlı olarak hesaplanması .....71
Şekil 5.1	Püskürtme mekanizmasının şematik diyagramı .....73
Şekil 5.2	VPS Kaplamanın 40000 çalışma saati sonunda görünümü .....75

<b>Şekil 6.1</b>	Türbin kanatçıkları .....	77
<b>Şekil 6.2</b>	Parlatma ve bakalite alma cihazları .....	77
<b>Şekil 6.3</b>	Elektron MikroProb Analiz (EPMA) Cihazı .....	78
<b>Şekil 6.4</b>	Sertlik Ölçüm Cihazı .....	78
<b>Şekil 7.1</b>	A1 numunesinin backscattered elektron mikroskobu görüntüsü.....	81
<b>Şekil 7.2</b>	A2 numunesinin backscattered elektron mikroskobu görüntüsü.....	82
<b>Şekil 7.3</b>	A3 numunesinin backscattered elektron mikroskobu görüntüsü.....	83
<b>Şekil 7.4</b>	B1 numunesinin backscattered elektron mikroskobu görüntüsü.....	84
<b>Şekil 7.5</b>	B2 numunesinin backscattered elektron mikroskobu görüntüsü.....	85
<b>Şekil 7.6</b>	B3 numunesinin backscattered elektron mikroskobu görüntüsü.....	86
<b>Şekil 7.7</b>	A1 Numunesi sertlik ölçüm sonuçları .....	86
<b>Şekil 7.8</b>	A2 Numunesi sertlik sonuçları.....	87
<b>Şekil 7.9</b>	A3 Numunesi sertlik sonuçları.....	87
<b>Şekil 7.10</b>	B1 kaplama sertlik ölçüm noktası optik mikroskop görüntüsü.....	88
<b>Şekil 7.11</b>	B1 Numunesi sertlik sonuçları .....	88
<b>Şekil 7.12</b>	B2 Numunesi sertlik sonuçları .....	88
<b>Şekil 7.13</b>	B3 Numunesi sertlik sonuçları .....	89
<b>Şekil 7.14</b>	A1 Numunesi kaplama katman kalınlıkları .....	90
<b>Şekil 7.15</b>	A2 Numunesi kaplama katman kalınlıkları .....	91
<b>Şekil 7.16</b>	A3 Numunesi kaplama katman kalınlıkları .....	92
<b>Şekil 7.17</b>	B1 Numunesi kaplama katman kalınlıkları.....	93
<b>Şekil 7.18</b>	B2 Numunesi kaplama katman kalınlıkları.....	94
<b>Şekil 7.19</b>	B3 Numunesi kaplama katman kalınlıkları.....	95



## **NİKEL ESASLI SÜPER ALAŞIMLARIN ENDÜSTRİYEL GAZ TÜRBİNLERİNDE KULLANIM SÜRELERİNİN MİKRO YAPILARI ÜZERİNE ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI**

### **ÖZET**

Tüm Dünyada olduğu gibi ülkemizde de artan elektrik enerjisi açığının kapasite artışından fazla olması, elektrikte arz güvenliği konusunun ciddi bir sorun haline geldiğini göstermektedir. Bundan dolayı kapasite arttırımına gidilmesi için sadece yeni santrallerin kurulması değil, aynı zamanda mevcut santrallerin de mümkün olan en yüksek verimlilikte çalıştırılması gerekmektedir.

Elektrik üretiminde kullanılmakta olan endüstriyel gaz türbinlerinin tasarımındaki en önemli faktörler, kullanım amacına uygunluk, güvenilirlik, verimlilik ve tabii ki maliyet unsurlarıdır. Günümüzde, daha yüksek performanslara ulaşılabilme amacıyla gaz türbin parçalarındaki malzeme seçiminde kendini ispat eden malzemelerin yanısıra yeni malzemeler de denenmektedir. Çoğu zaman, en yakın teknoloji olan uçak motorları konusundaki gelişmeler gaz türbinlerine adapte edilmektedir. Ancak gaz türbinlerine özel durumların ve tasarımların gerekli olduğu pek çok durumla da karşılaşılmaktadır. Malzeme teknolojisindeki bu ilerlemeler, endüstriyel gaz türbinlerinden elektrik enerjisi üretiminde verimliliğin sürekli olarak artmasını sağlamaktadır. Gaz türbinlerinde yüksek yanma sıcaklıklarına çıkıldıkça verimlilik artmaktadır. İleri teknoloji malzemeleri kullanılarak üretilen gaz türbinleri sayesinde kombine çevrim verimliliği % 60 mertebelerine kadar yükselmiştir. Gelişmeler, önümüzdeki on yıl içerisinde gaz türbinlerinde daha yüksek yanma sıcaklıklarına ulaşılacağını göstermektedir. Nikel esaslı süperalaşım, endüstriyel gaz türbinlerinde yanma odaları, kanatçıklar ve nozul parçalarında kullanılarak, bu parçaların ömürlerinin belirgin bir şekilde uzatılmasını, dolayısıyla da türbinlerin bakım aralıklarının uzamasını ve bakım maliyetlerinin düşmesini sağlamaktadır.

Bu çalışmanın amacı elektrik üretiminde kullanılmakta olan endüstriyel gaz türbinlerini, yüksek çalışma sıcaklıklarında ve özellikle yakıt bileşimindeki değişkenliklerin neden olduğu korozyon ortamlarında en fazla sınırlayan parçalardan olan 1. ve 2. kademe nikel esaslı türbin kanatçıklarının 48000 saat çalışma sonunda mikroyapı, kaplama kalınlığı veya mekanik mukavemet özelliklerinde alaşımın servis öncesindeki özelliklerinden ne kadar sapma olduğunun belirlenmesi ve bu sonuçların uluslararası literatüre aktarılması olacaktır.

## **THE EFFECTS OF SERVICE DURATION ON MICROSTRUCTURE OF THE NICKEL BASED SUPERALLOY COMPONENTS UTILIZED IN GAS TURBINES**

### **SUMMARY**

Power demand all around the world keeps increasing much more rapid than overall energy generation. For this reason, it is not only necessary to increase the number of power plants but also to operate the existing power plants at highest possible efficiencies. Improvements in super alloys and processing now permit the hot gas path components, turbine blades and nozzles to operate in gas turbines at increased temperatures for many thousands of hours under severe conditions of centrifugal, thermal and vibratory stresses. Extended parts lives leads to extended outage intervals which decreases maintenance costs of industrial gas turbines.

In the industrial gas turbine design, primary philosophy is to build a reliable, efficient, cost-effective machine for the intended service. Whenever possible, standard materials with histories of successful application are used. In many cases, proven technology is utilized from aircraft or steam turbine applications. Advanced materials helps energy industry with improvements in gas turbines efficiencies and outputs. These improvements are offering the most fuel-efficient power generation systems available. Combined-cycle efficiencies as high as 60% are now achievable because of increased firing temperature coupled with more efficient component and system designs. Ongoing developments now promise that the coming decade will witness continued growth of gas turbines with higher firing temperatures, pressures and outputs.

The stage 1 and stage 2 buckets must withstand the most severe combination of temperature, stress and environment. These parts are generally the limiting component in the machine. This project will concentrate on metallurgical and microstructure study and also assessment of the coatings of as received and 48000 turbine operation hours service exposed first and second stage blades.

## 1. GİRİŞ VE AMAÇ

Malzeme teknolojisindeki ilerlemeler, endüstriyel gaz türbinlerinden elektrik enerjisi üretiminde verimliliğin sürekli olarak artmasını sağlamaktadır. Bu alanda her geçen yıl yeni ilerlemeler sağlanmaktadır. Yüksek yanma sıcaklıklarına çıkılmasını mümkün kılan gaz türbinleri ile kombine çevrim verimliliği %60 mertebelerine yükselmiştir. Gelişmeler, önümüzdeki on yıl içerisinde gaz türbinlerinde daha yüksek yanma sıcaklıklarına ulaşılacağını göstermektedir [1].

Süper alaşımlar endüstriyel gaz türbinlerinde yanma odaları, kanatçıklar ve nozul malzemesi olarak kullanılmaktadır. Süper alaşımların kullanımı bu saydığımız kritik parçaların ömürlerinin belirgin bir şekilde uzamasını sağlamış, dolayısıyla türbinlerin bakım aralıklarını artırarak bakım maliyetlerinin düşmesini sağlamıştır.

Türbin dizaynında en önemli ilkeler, kullanım amacına uygunluk, güvenilirlik, verimlilik ve tabii ki maliyet unsurlarıdır. Malzeme seçiminde uygunluğu kanıtlanmış malzemelerin yanında yeni malzemelerle denemeler yapılarak daha iyi dizaynlara ulaşmak hedeflenmiştir. Çoğu zaman, en yakın teknoloji olan uçak motorları konusundaki gelişmeler gaz türbinlerine adapte edilmiştir. Ancak gaz türbinlerine özel durumların ve dizaynların gerekli olduğu pek çok durumla da karşılaşmıştır [1].

Endüstriyel gaz türbinlerinde 1. kademe kanatçık en zorlu şartlar altında çalışan ve genellikle makinenin çalışma koşullarını sınırlayan parçadır. 1950'li yıllardan günümüze kanatçık malzemelerinin geliştirilmesi sonucu sıcaklık dayanımları yaklaşık 470°C artırılmıştır. Türbin yanma sıcaklığındaki her 56°C'lik artışın basit çevrimde türbinin gücüne %8 - %13, verimliliğine ise %2 - %4 arasında değişen katkı sağladığı gerçeği 470°C'lik bu artışın ne derece önemli olduğunun bir göstergesidir [2].

Bu çalışmanın amacı endüstriyel gaz türbinlerini yüksek çalışma sıcaklıkları ve özellikle yakıt bileşimindeki değişkenliklerin neden olduğu korozif ortamlarda en

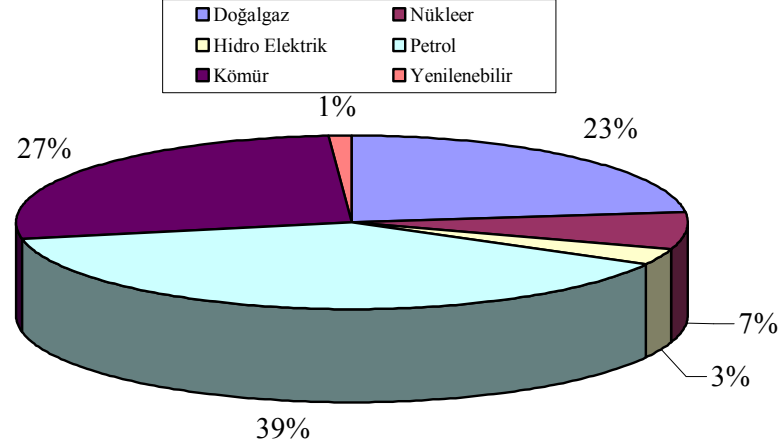
fazla sınırlayan parçalardan olan 1. ve 2. kademe türbin kanatçıklarının 48000 saat çalışma sonunda yapısında meydana gelen değişikliklerin incelenmesidir.

## 2. DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE ENERJİ ÜRETİMİ

Enerji üretimi ve tüketiminde, ekonomik ve sosyal gelişimi destekleyecek, çevreyi en az düzeyde kirletecek, minimum maliyette enerji arzı hedef alınmak durumundadır. Enerji sektöründe temel amaç, artan nüfusun ve gelişen ekonominin enerji ihtiyaçlarının sürekli, kesintisiz bir şekilde ve mümkün olan en düşük maliyetlerle, güvenli bir arz sistemi içinde karşılanabilmesidir. Bu kapsamda, diğer enerji kaynaklarına göre kolay temin edilebilen ve çevreye etkisi daha az olan doğalgazın ülkemizde birincil enerji kaynağı olarak kullanımını giderek artmaktadır. Kombine çevrim santrallerinde gaz türbinleri ve buhar türbinleri birlikte kullanılmaktadır. Yakıt olarak doğal gaz kullanılan gaz türbinlerinden elde edilen elektrik enerjisinin yanı sıra türbin egzozundan yüksek sıcaklığa sahip egzoz gazlarının atık ısısının kazana verilmesiyle elde edilen buhar ile buhar türbinlerinden de ek elektrik üretimi sağlanmaktadır. Bu santrallerde gaz türbinli çevrimlerin üst sıcaklığının yüksek olması ve buhar türbinli çevrimlerin alt sıcaklıklarının düşük olması avantajları birleştirilerek, kombine çevrim verimi %60 civarında gerçekleştirilebilmektedir. Doğalgaz yakıtlı kombine çevrim termik santralleri diğer fosil kaynaklı yakıt kullanan termik, nükleer ve hidroelektrik santrallerine göre daha düşük kurulum maliyeti ile daha kısa sürede işletmeye alınabilmektedirler.

**Tablo 2.1 : 2003 Yılı itibarı ile dünya enerji profili**

Petrol	Kömür	Doğalgaz	Nükleer	Hidro Elektrik	Yenilenebilir
39%	27%	23%	7%	3%	1%



**Şekil 2.1 :** 2003 yılı itibarı ile dünya enerji profili

Tablo 2.1’de Dünya enerji tüketiminin birincil enerji kaynaklarına göre dağılımı görülmektedir [3].

Ülkemizde 2001-2006 yılları arası elektrik üretimi artışı Tablo 2.2’de, birincil enerji kaynaklarına göre elektrik enerjisi üretimi ise Tablo 2.3’de görülmektedir [4].

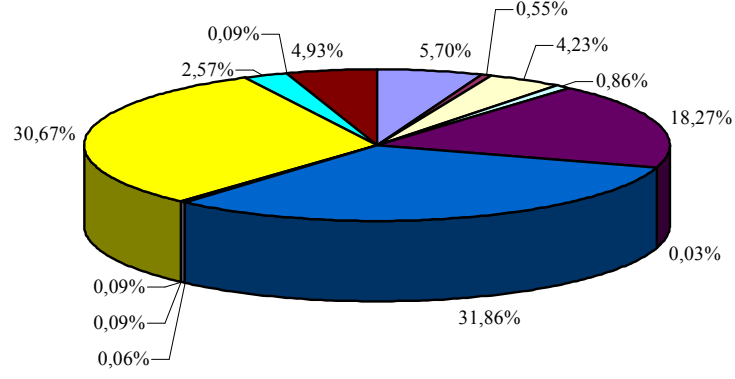
**Tablo 2.2 :** Türkiye’de elektrik üretim kapasitesi artışı (2001 - 2006)

	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Kurulu Güç (MW)	28332	31845	35587	36824	38843	40755
Elektrik Üretimi (GWh) (Türkiye Toplamı)	122725	129399	140580	150698	161956	175000

**Tablo 2.3 :** 2005 Yılında Türkiye’de birincil enerji kaynaklarına göre elektrik üretimi (MW)

Fuel Oil	2225
Motorin	214.4
İthal Kömür	1651
Taş Kömürü	335
Linyit	7131
LPG	10
Doğal Gaz	12432
Jeotermal	23
Nafta	36.8
Yenilenebilir+Atık	35.3
Hidroelektrik	11967
Akarsu	1002
Rüzgar	33.6
Katı+Sıvı Çoklu Yakıtlar	1925
Toplam	39021.1

Fuel Oil	Motorin	İthal Kömür	Taş Kömürü
Linyit	LPG	Doğal Gaz	Jeotermal
Nafta	Yenilenebilir + Atık	Hidroelektrik (Baraj)	Akarsu
Rüzgar	Katı + Sıvı Çok Yakıtlar		



Şekil 2.2 : Kaynaklara göre kurulu güç

### 3. GAZ TÜRİNLERİNE GİRİŞ

#### 3.1 Gaz Türbinlerinin Tarihsel Gelişimi

Çok eski zamanlardan beri insanlar, alternatif hareketle çalışan ve bunun neticesi olarak da kitle kuvvetleri büyük çıkan alternatif makineler yerine, doğrudan doğruya rotatif hareket sağlayan makineleri kullanmayı düşünmüşlerdir [5].

Milattan takriben 130 sene kadar evvel, İskenderiye şehrinde yaşamış olan Heron adlı bilgin, türbin prensibini bulmuş ve uygulamaya koymuştur. Heron'un yapmış olduğu tertibat, atlıkarıncaya benzeyen bir platformu döndürmeye yaramakta; bu maksat için de üst kısımda yakılan yakıtla ısıtılan hava, platformun altında bulunan dirseklerden dışarı çıkarken, tepki kuvvetiyle platformu ve üzerinde bulunan kimseleri birlikte döndürmekteydi.

Ressamlık ve heykeltraşlık sahalarındaki başarılarına ilaveten, zamanının en büyük mühendislik dehalarından biri olan ve uçak prensibi, İstanbul Boğazı üzerine köprü kurulması gibi birçok modern projeyi ilk olarak düşünmüş olan Leonardo da Vinci' de XV inci yüzyılda duman pervanesi adını verdiği ve aslında bir gaz türbininden başka birşey olmayan bir tertibat yapmıştır. Bu tertibatta, bir ocak bacası içine yatay durumda yerleştirilmiş olan ve üzerinde kanatlar bulunan bir tekerlek, içinden geçen sıcak gazların tesiriyle dönmekte ve bu hareket de, dişliler vasıtasıyla dışarıya iletilerek, mekanik iş elde edilmekteydi. Bu prensip daha sonraları, İngiliz matematikçi Wilkins tarafından, 1648 yılında yayınlanmış olan kitabında da izah edilmiştir [5].

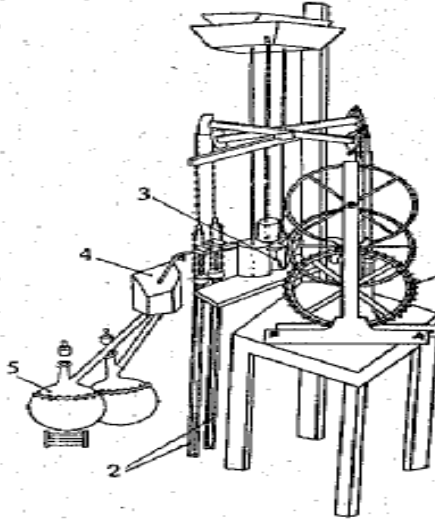
Buna benzer diğer bir tertibatın da, İngiltere'de XVII inci yüzyıl sonlarına doğru Dumbell tarafından patenti alınmıştır. Burada farkı, yakıtın sırf bu maksat için yakılması ve türbinin de bir yerine, birçok basamakdan meydana gelmesi teşkil etmekteydi. Bu basamaklar da, içi boş bir tanburun üzerine yerleştirilmiş bulunmaktaydı.

Sıcak gazlar vasıtasıyla çalışan türbinler üzerine verilmiş olan ilk patent haklarından bir tanesi de, XVIII inci yüzyılın sonlarına doğru, İngiltere'de Barber'e verilmiş



olandır. Bu sistemde, hava ve gaz halindeki yakıt, ayrı birer silindir içinde sıkıştırıldıktan sonra, bir yanma odasına gönderilerek, burada yakılmaktaydı. Bu suretle elde edilen duman gazları, bir türbin tekerleği üzerine tevcih edildiğinden mekanik iş oluşmakta ; bu işten de, 2 sıkıştırma silindiri için gereken iş çıkarıldıktan sonra geri kalan kısım, efektif yarar işi teşkil etmekteydi. Barber' in makinesinin hakikaten çalıştığına dair elde bir kayıt mevcut değildir, fakat zaten pek uygulanabilir de görülmemektedir [5].

Şekil 3.1'de Barber tarafından düşünülmüş olan makinenin prensibi görülmektedir. Burada 1, türbini; 2, gaz ve hava kompresörünü; 3, yanma odasını; 4, karıştırma haznesini; 5 de gaz jeneratörünü ifade etmektedir.



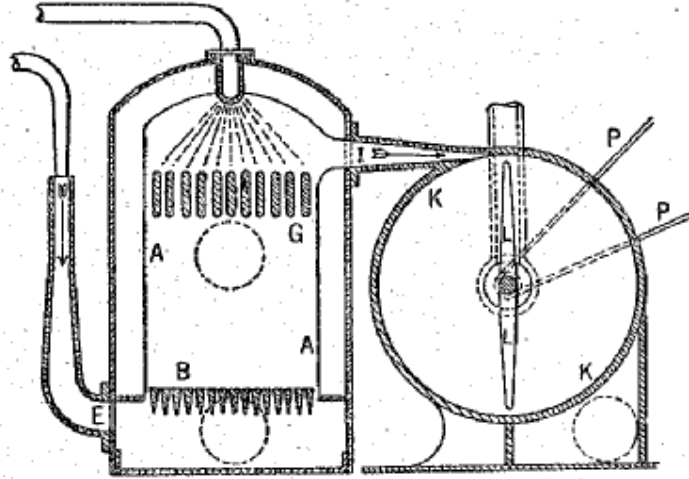
**Şekil 3.1 : Barber türbini**

Sıcak gazların enerjisinden istifade suretiyle mekanik iş elde etmek için düşünülmüş olan diğer bir makine de, 1837 senesinde Buckett tarafından yapılmıştır. Bu makine bir gaz jeneratörü ile üst üste konmuş 2 adet silindirden teşekkül etmektedir. Bu silindirlere üstte bulunanı, atmosferden emdiği havayı sıkıştırarak gaz üreticisine basmakta; altta bulunanı ise, hem bu kompresörü çalıştırmaya yaramakta, hem de mekanik güç sağlamaktadır [5].

Gaz türbinleri sahasında, teorik bakımdan ilk önemli aşamayı, 1820 senesinde, İngiliz Stirling tarafından ortaya çıkarılmış olan eşit hacimli çevrim teşkil eder. Stirling, bu çevrime dayanarak, 1827 senesinde, hava motoru adını verdiği bir makine imal etmiştir.

Stirling çevrimini, 1830 senesinde İsveçli Ericson tarafından bulunmuş olan, eşit basınçlı çevrim takip etmiştir.

Bu iki çevrime istinaden, 1850 senesinde, İngiliz Fernihough, gaz ve su buharıyla çalışan bir türbin yapmıştır. Şekil 3.2’de, şematik resmi verilmiş olan bu makinede: A, üst kısmı refrakter bir madde ile kaplı yanma odasını; B, bu yanma odasının döşemesini teşkil eden ızgarayı; C, yanma odası içine su püskürten ağzı; G, suyun buhar haline gelmesini sağlayan refrakter madde bloklarını; I, yanma gazları ve su buharından müteşekkil karışımın potansiyel enerjisini kinetik enerjiye çeviren difüzörlü memeyi; L, rotor pervanesini; K, rotor mahfazasını; P de rotorda meydana gelen mekanik gücü iletmeye yarayan kayışı ifade etmektedir [5].



Şekil 3.2 : Fernihough türbini

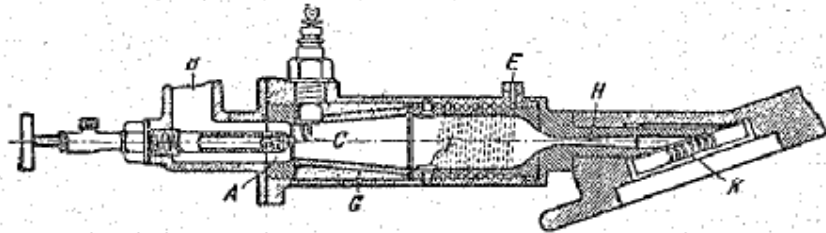
Stirling ve Ericson çevrimlerinden sonra, ilk olarak Joule (1851) tarafından tavsiye edilmiş ve daha sonraları da Brayton (1873) tarafından geliştirilmiş olan çevrim meydana çıkmıştır. Bu çevrim halen gaz türbinlerinde ideal çevrim olarak kabul edilmektedir [5,6].

Pratik bakımdan ilk müsbet adım, Almanya’da 1872 senesinde Stolze tarafından atılmış ve bu prensibe uygun ilk grup, bu yüzyılın başında imal edilmiştir. Mucidi tarafından ateş türbini diye adlandırılan bu grupta, çok basamaklı bir aksenal kompresör tarafından emilen hava, gerekli miktarda sıkıştırıldıktan sonra, bir ısı eşanjörüne gitmekte ve burada ayrı bir yanma odasından gelen sıcak duman gazlarıyla ısıtıldıktan sonra, çok basamaklı reaksiyon tipine haiz bir türbine giderek, burada genişleyip mekanik iş sağladıktan sonra, atmosfere atılmaktaydı. Bu grupta,

türbin ile kompresör birbirlerine direkt bağlı bulunmaktaydı. Stolze' nin grubu, prensip bakımından doğru olmasına ve modern tesislerde kullanılan aksenel kompresör, ısı eşanjörü, müstakil yanma odası ve gaz türbini gibi bütün elemanları ihtiva etmesine rağmen, muvaffak olamamıştır. Bunun sebebi de gerek teorik bilgilerin, gerekse malzeme tekniğinin gerekli seviyede bulunmaması sebebiyle, türbin ve kompresörde yeterli derecede yüksek verimlerin sağlanamamış olmasıdır.

Başarıyla çalışarak ilk defa yarar güç sağlamış olan türbin grubu, 1905 senesinde Fransa' da Armengaud ve Lemale tarafından yapılmıştır. Bu grupta, atmosferden emilen yakma havası, 3 karterde toplanmış, çok basamaklı Rateau tipi bir kompresörde sıkıştırıldıktan sonra, yanma odasına gönderilmekteydi. Burada sıvı yakıtın yanması neticesinde elde edilen duman gazları, içlerine bir miktar su püskürtmek suretiyle bir miktar soğutulduktan sonra, çift basamaklı ve Curtis tipine haiz bir türbine gönderilerek genişletilmekteydi. Türbin kısmı takriben 400 PS veren bu grup, 560°C duman gazı sıcaklığında %3 civarında bir termik verim sağlamaktaydı.

Şekil 3.3'de, Armengaud – Lemale grubunun yakma odası ile ilk türbin kanatlarını gösteren kısım verilmiştir. Burada: A, akaryakıt girişini; B, yakma havası girişini; C, ilk hareket için gerekli bujiyi; E, püskürtme suyu girişini; G, yanma odası difüzörünü; H, türbin memesini; K da çift hız basamaklı türbinin ilk seygar kanat sırasını göstermektedir [5,6].



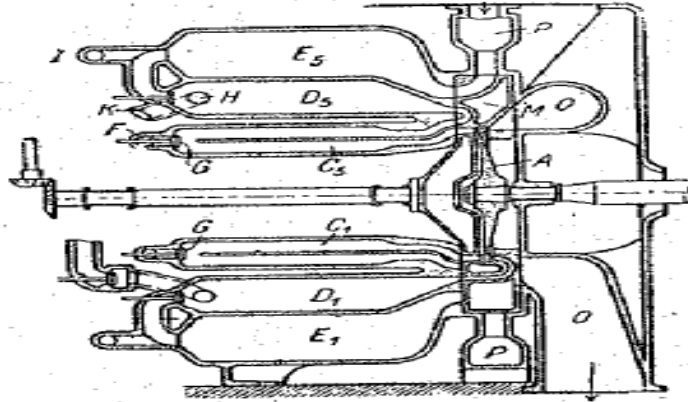
**Şekil 3.3** : Armengaud – Lemale türbini

O sıralarda Amerika' da Moss tarafından yapılan ilk gaz türbini de, 1912 senesinde çalıştırıldı. Net gücü negatif olan bu grupta gerekli basınçlı havayı, bir buhar türbiniyle tahrik edilen bir kompresör sağlıyordu. O sıralarda yüksek verimli kompresörlerin bulunmayışı, grupta hava kompresörü bulunmayan sistemlerin araştırılmasına yol açtı. Bu sistemlerde, patlatılmak suretiyle sabit hacimli özel

hücrelerde yakılan hava ve yakıt karışımından elde edilen duman gazları, bir türbinde genişlemek suretiyle yarar iş sağlamaktadır. Bu yolda, Fransa'daki çalışmaları, Karavodine; Almanya' dakileri ise, Bischof, Baetz ve Holzwarth yaptılar.

Bunlardan Karavodine' in 1908 yılında Fransa' da yapmış olduğu grup, 10000 l / dakika devirde, 2 PS lik bir güç sağlamıştır. Bu grupta, çevrede bulunan 4 adet patlama odasında elde edilen duman gazları, önlerinde bulunan birer memeden geçtikten sonra, tek basamaklı aksiyon tipine haiz bir tekerlekte mekanik iş sağlamaktadır. Her patlamadan sonra, ilgili hücrelerde alt basınç olduğundan, takip eden patlama için, hava ve yakıttan oluşan gerekli şarjın emilmesi kendiliğinden olmaktadır. Yapılmış olan deneylerde bu grubun yakıt sarfiyatının 2,24 kg / PSh benzin olduğu ve efektif veriminin de, %2.5 civarında bulunduğu hesap edilmiştir.

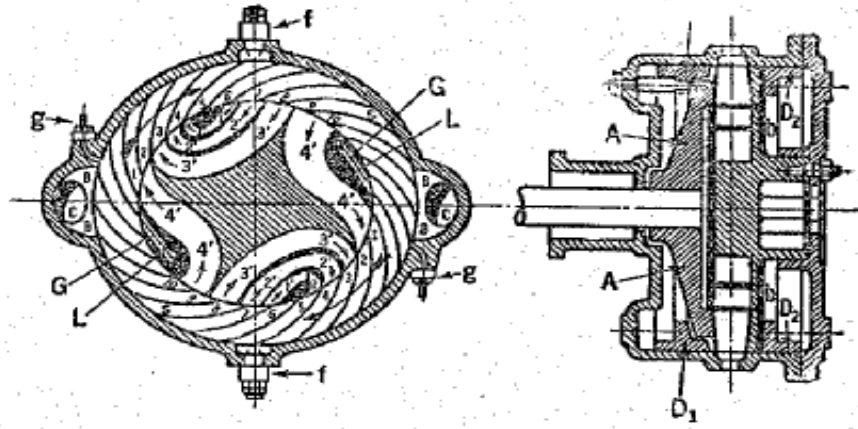
Şekil 3.4.'de, Bischof' un 1913 yılında Almanya'da aldığı patent ile yapmış olduğu patlamalı türbine ait, şematik resim verilmiştir. Burada: A, tek basamaklı sistemin rotorunu; C<sub>1</sub>...C<sub>5</sub>, patlama odalarını; D<sub>1</sub>...D<sub>5</sub>, basınçlı hava ve yakıt karışımı sıkıştırma odalarını; E<sub>1</sub>...E<sub>5</sub>, yakma havası sıkıştırma odalarını; G, ateşleme bujilerini; K, gaz halindeki yakıt giriş ağızlarını; M, yakma havasının gerekli miktarda sıkıştırılmasını sağlayan devvar çekmeceyi; O, ekzost gazları çıkış kanalını; P de, taze hava giriş kanallarını göstermektedir [5].



Şekil 3.4 : Bischof türbini

Şekil 3.5' de, aynı çalışma prensibine haiz, fakat konstrüksiyon bakımından daha ileri düzeyde olan Baetz türbinine ait kesit resimleri görülmektedir. Bu grup, 2 zamanlı bir patlamalı motoru andırmaktadır. Burada karışımın sıkıştırılması, rotor üzerinde bulunan ve kompresör olarak çalışan bir tekerlek tarafından sağlanmaktadır; gerekli ateşleme ise buji marifetiyle olmaktadır. Şekil üzerinde: A, türbin rotorunu; B

ve C; ekzost gazları çıkış kanallarını;  $D_1$  ve  $D_2$  dış salmastraları; G ve L, hava ve gaz memelerini; f, ateşleme bujilerini; g de, yakıt valflerini ifade etmektedir.



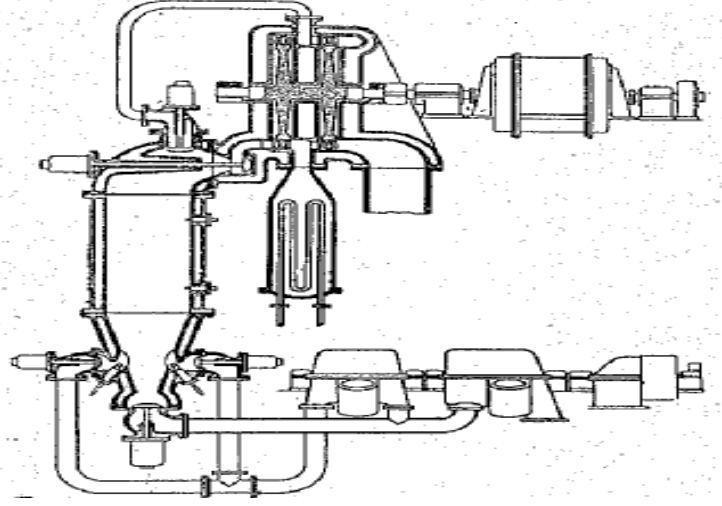
**Şekil 3.5 : Baetz türbini**

Sabit hacimli sistemlerin en önemlisi, hiç şüphesiz Holzwarth tarafından 1905 senesinde ortaya atılmış ve daha sonraları da, yine kendisi tarafından geliştirilmiş olanıdır. Bu sistemde, sabit hacimli bir yanma odası içine, basınçlı olarak yakıt ve hava verildikten sonra, karışım ateşlenmektedir. Bu şekilde meydana gelen patlama sonucunda, yanma odası içindeki gaz basıncı, başlangıç değerinin takriben 4,5 misline yükselmektedir. Bu basıncın etkisiyle, yayla çalışan otomatik valfler açıldığından, duman gazları memeler vasıtasıyla, türbinin seyyar kanatları içine geçmektedir. Bu sistemde, yanma için gerekli basınçlı havanın, bir kompresör tarafından temin edilmesine rağmen, bu kompresörün veriminin düşüklüğü önemli bir rol oynamamaktadır. Çünkü sistemde gerekli basıncın büyük kısmını patlama teşkil ettiğinden, kompresör basıncının yüksek olmasına lüzum kalmamaktadır. Bu takdirde, kompresörün esas görevi, bastığı hava vasıtasıyla yanma için gerekli oksijeni temin etmektir.

Holzwarth ve arkadaşları, 30 seneden fazla bu sistem üzerinde çalışarak, bunu geliştirdiler. Bu esnada en büyük güçlükleri, otomatik valf mekanizmasının karışıklığı ile gerekli soğutma tertibatı meydana getirmiştir.

Holzwarth tarafından, 1926 yılında BBC firmasında yapılmış olan diğer bir türbin grubuna ait şema da, Şekil 3.6'da görülmektedir. Almanya'da, Thyssen demir ve çelik fabrikalarında, yakıt olarak yüksek fırın gazlarıyla çalışmak üzere yapılmış olan bu grup, ilk devamlı çalışabilen ünitelerden biri olmuştur. Şekil üzerinde bariz olarak

görüldüğü üzere, buradaki türbin, her biri 2 hız basamaklı, 2 adet Curtis tekerleğinden oluşmaktadır [5,6].



Şekil 3.6 : Holzwarth türbini

### 3.1.1 Modern Gaz Türbinlerine Geliş

Sabit basınçlı sistemde esas elemanı teşkil eden hava kompresörü üzerindeki çalışmalar da, yukarıda belirtilmiş olanlara paralel olmaya devam edilmiştir. Bu sahadaki öncülerden birini de reaksiyon tipini haiz ilk buhar türbinini ve bununla da ilk gemi türbinini imal etmiş olan Parsons teşkil eder. Yalnız Parsons, çok basamaklı eksenel tipli hava kompresörlerinden netice alamadığından, 1908 yılında çalışmalarını sonlandırmıştır. Kendisinden ancak 30 yıl kadar sonra verim bakımından uygun eksenel kompresörler yapılmaya başlanabilmektedir [5].

Bu arada geçen zaman zarfında, İspanyol Pescara, icat edip, geliştirdiği serbest veya diğer adıyla karşı pistonlu gaz jeneratörlerini yapmak suretiyle, kompresör imalatının çeşitli zorluklar doğurduğu bir devrede gaz türbininin, bir ısı kuvvet makinesi olarak yerleşmesinde büyük derecede yardımcı olmuştur.

Bir taraftan gaz türbinleri üzerinde çalışılırken, bir taraftan da bu makinelerden yararlanılarak, gerek dizel motorlarda, gerekse buhar kazanlarında duman kazanlarının atık enerjisini kullanarak, bunları geri beslemenin yolları aranmıştır.

Bir dizel motordan çıkan çürük gazlarla tahrik edilen bir gaz türbiniyle ilk deney, 1912 yılında yapılmıştır. Bu deneylerden alınan müsbet sonuçlar neticesinde, 1923 yılında süperşarjlı dizel motor imal edilmiştir. Fakat bu sistemin tam

geliştirilebilmesi için, daha 15 yıl kadar bir zaman geçmesi gerekmiştir. Bu gelişmelerde: Moss, Lorenzen, Pflaum ve özellikle Büchi' nin çalışmaları çok önemli rol oynamıştır. Halen, orta ve büyük güçlü bir dizel motorunu, süperşarjsız olarak tasavvur bile etmek mümkün değildir. Çünkü maliyeti, toplam motor maliyetinin ancak ufak bir kısmını teşkil eden süperşarj grubunun ilavesiyle, bu motorun verebileceği güç en az 100% fazlalaştırılabilmektedir. Diğer taraftan motorlu uçakların 10000 m. yi aşan yüksekliklerde güçlerinin sabit kalması ancak süperşarj sayesinde mümkün olabilmıştır [5, 6].

Kazanlarda, yakma havası basıncının, bir gaz türbini tarafından tahrik edilen bir kompresör vasıtasıyla artırılması, ilk olarak 1932 yılında uygulanmıştır. Aşırı doldurmayla çalışan ve BBC firması tarafından imal edilen bu kazan; 'Velox Buhar Yapıcısı' adını taşımaktadır.

Mekanik güç sağlamak amacıyla yapılan ilk türbinlerden biri, 1932 yılında patenti alınarak, 1935 yılında imal edilmiş olan Lysholm grubudur. Bu patenti, 1935 senesinde, Ackerett ve Keller tarafından ve kapalı çevrim sistemine sahip olan bir patent izlemiştir [5].

Gaz türbinlerinden bir endüstri tesisinde yararlanılması, ilk olarak bir Amerikan petrol rafinerisinde, 1936 senesinde gerçekleşmiştir. BBC firması tarafından imal edilmiş olan bu grubu, 1937 senesinde yüksek fırın gazlarıyla çalışarak, bu fırınlara yakma havası sağlayan kompresörü çalıştırmaya yarayan, yine aynı firma yapımı bir grup takip etmiştir.

Macaristan'da, 1939 yılında, Jendrassik'in yapmış olduğu bir türbin grubu, modern türbinlerin öncüsü olmuştur. Bu grup, 475 °C gaz sıcaklığında ve 16400 1/min devirde 98,5 PSe' lik bir güç ve %21 civarında bir termik verim sağlamıştır. Bu grupta kompresör basamağı adedi 10, türbin basamağı adedi 7, sıkıştırma oranının da 2,2 olduğu bildirilmiştir [5].

Aynı sene BBC firması, elektrik enerjisi elde etmeye yarayan ilk turbo – jeneratör grubunu yapmış, bunu 1940 senesinde yine aynı firma ürünü olan ilk lokomotif türbini takip etmiştir. Bu suretle, modern anlamda ilk gaz türbinli gruplar, fiilen faaliyete geçerek, elektrik enerjisi veya mekanik enerji üretmeye başlamışlardır.

Kara tesislerinde bu aşamalar olurken, İngiltere' de Wittle, uçak tahriki için 1930 senesinde turbo – jet sisteminin patentini almıştır. Bu sisteme sahip ilk uçak tahrik

grupları, 1937 yılında İngiliz, 1939 yılında da Alman hava kuvvetlerinde hizmete girmiştir. Bu başarı üzerine, Birleşik Amerika, Japonya gibi diğer büyük devletlerin hava kuvvetleri de aynı yolu izlemişlerdir. İkinci Dünya Savaşı sırasında çok fazla geliştirilen bu sistem, zamanla klasik pervaneli sistemin yerini almıştır.

Bu gelişmelerin ardından deniz ulaşımında da, gaz turbini kullanımı başlamış, 1947 yılında Metro – Vick firması, ilk gaz türbinli grubu, ufak tonajlı fakat yüksek hızlı bir savaş gemisine takmıştır [5].

Bunu da 1948 yılında, Centrax firmasının kara nakil vasıtalarına takılmak üzere yapmış olduğu, 160 Pse' lik grupların üretimi takip etmiştir.

1947 yılında, yarı kapalı çevrimle çalışan ilk grup, BBC firması tarafından yapılarak faaliyete geçirilmiştir. 4500 kW gücüne sahip olan bu grubu, 1955 senesinde yine aynı firma tarafından üretilen ilk paket grup izlemiştir. İstenilen yere kolayca götürülüp kurulabilen bu seyyar grup, 6200 kW' lık güçte bulunmaktaydı.

1970 senesinde BBC firması tarafından projelendirilmeye başlayan kapalı çevrime sahip ilk türbinler, 1972 yılı sonunda üretilerek faaliyete geçirilmiştir. 1974 yılında, yakıt olarak helium gazı kullanan türbinler üzerine yürütülen çalışmalar günümüzde çok ilerlemiş bulunmaktadır.

Buharla çalışan ısı kuvvet tesislerinde, pistonlu buhar makinesinden buhar türbinine geçişin, bu yüzyılın başında gerçekleşmiş olmasına rağmen, ticari alanda, gaz türbininin ısı kuvvet makinesi olarak, dizel motor ile buhar türbini arasında yer alabilmesi, ancak bu yüzyılın ortalarına doğru mümkün olabilmiştir. Bu gecikmenin başlıca sebeplerinden birincisi yüksek sıcaklıklara dayanabilecek malzeme tekniğinin ancak son senelerde gerekli tarzda geliştirilebilmiş olabilmesi; ikincisi ise gerek türbin gerekse kompresörlerde verimlerin, akışkanlar mekaniği alanındaki ilerlemelerle, yine ancak son senelerde, bu makine grubunu ekonomik bakımdan ilgi çekici hale getirebilecek kadar geliştirilebilmiş olabilmesidir [5].

Prensip bakımından buhar ve gaz türbini arasındaki esas farkı, yalnızca çalışma maddesi oluşturmaktadır. Her iki durumda da: aksiyon, yani eşit basınç ve reaksiyon, yani üst basınç prensibi, üretici firmanın tercihine göre, uygulama sahası bulmaktadır. Modern türbinlerde, gerek teori gerekse konstrüksiyon bakımından çok önemli bir rol oynamış olan, İsviçreli Prof. Stodola' nın, 1924 yılında yayınlanmış



olan temel kitabının “Buhar ve Gaz Türbinleri” adını taşıması bu hususu açık şekilde belirtmektedir.

Gaz türbin grupları kuvvet santrallerinde elektrik enerjisinin üretilmesinde çeşitli endüstri tesislerinde mekanik iş temininde, gemi, uçak ve lokomotif gibi çeşitli nakil vasıtalarının tahrikinde başarıyla kullanılmaktadır. Otomobil, otobüs, kamyon gibi kara nakil vasıtalarının tahrikinde de, halen birçok aşamalar yapılmış ve emniyetle çalışabilen prototipler üretilmiştir.

Günümüzde dahi, sınırlayıcı faktör olarak gaz sıcaklığı gösterilmektedir. Ferrit malzemedен üretilen türbin kanatlarında, 625°C’ın üzerindeki sıcaklıklarda korozyon başlar. Yakıt olarak ağır fuel – oil veya toz kömür kullanılması halinde, yanma sonucu oluşan kül, bu yüksek sıcaklıklarda eriyerek, gerek yanma odası cidarlarına, gerekse kanat yüzeylerine yapışarak koruyucu tabakayı tahrip eder. Bunlara ek olarak, gemi tesislerinde, fırtınalı havalarda tuzlu suyun hava ile birlikte yanma odasına girmesi ve burada yakıt içinde bulunan kükürt ile birleşerek, çeşitli sodyum tuzları meydana getirmesi de, yüksek sıcaklık altında, türbin içindeki tahribatın artmasına sebep olur [5,6].

Gaz türbinli gruplar, endüstri ve uçak tipi olmak üzere, 2 ayrı tipte yapılmaktadır. Bunların ilkinde sıcaklıklar 600 – 725 °C; basınç oranları ise 6 – 10 arasında kalmaktadır. İkincisinde ise; sıcaklık uçaklarda 900 – 1100 °C, bu tipteki gemi ve kara tesislerinde ise 750 – 825 °C; bunlara karşılık gelen basınç oranları da sırasıyla 15 – 18,5 ve 10 – 15 olmaktadır.

Gaz türbinlerinde çalışma maddesi olarak, türbin içinde genişleyerek iş görebilecek bütün gazlar kullanılabilir. Bunların başında, bir yanma odası veya bir gaz jeneratöründe bu maksat için üretilen duman gazları, yüksek fırın gazları, dizel motorlarında çıkan ekzost gazları, bacalardan çıkan duman gazları, büyük kimya tesislerinde elde edilen çeşitli gazlar, daha nadiren de basınçlı sıcak hava gelir.

Bu yüzyılın başından ortasına kadar, birçok bilim adamı, gaz türbinine paralel olarak: termodinamik, hidrodinamik, akışkanlar mekaniği, ısı transferi, metalurji, malzeme bilgisi, imalat tekniği ve benzeri sahalarda çalışma ve araştırmalar yaparak bilgi sınırlarının genişlemesini sağlamıştır. Bu durum da; hem uzun zaman emekleyen gaz türbinlerinin gelişme ve imalatını kamçulamış, hem de yeni yolların meydana çıkmasına sebep olmuştur. Bu yollardan en önemlilerinden biri, hiç şüphesiz turbo –

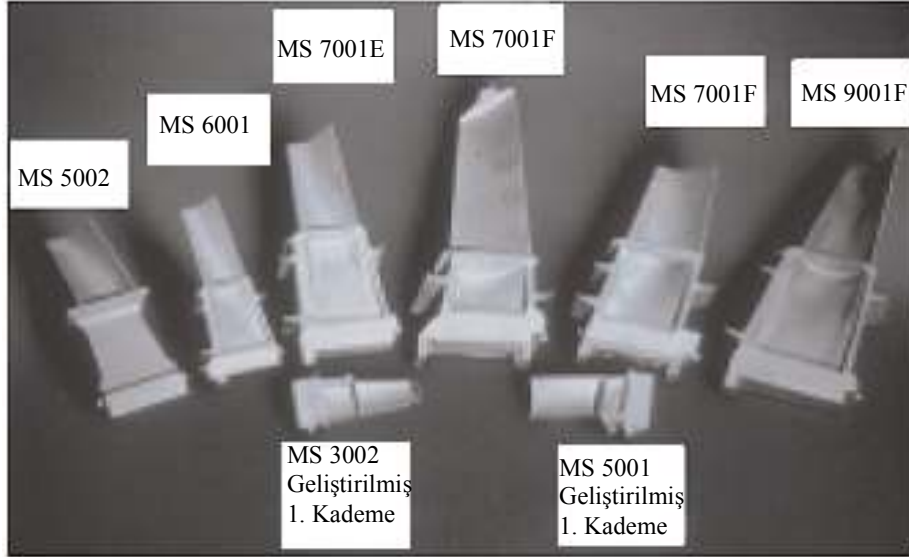
jet sistemidir. 1950 yılına doğru, özellikle orta güçlü tesislerde önemli avantajlar sağlayan yarı açık sistem de geliştirilmeye başlamıştır. Diğer taraftan 1956 yılında, o zamana kadar kullanılan gaz ve sıvı halindeki yakıtlar yerine, ilk defa olarak, pulverize kömür kullanan bir tesis faaliyete geçirilmiştir. 1960 ile 1970 arasında geçmiş olan 10 yıllık süre içerisinde, gaz türbinli gruplarda ünite güçleri hızla artmıştır. 1973 yılında, büyük imalatçı firmaların programına dahil güç sınırı 30 MW'ı bulmuştu [5]. Gaz türbini imalatında, dünyanın en büyük firmalarından biri olan General Elektrik' in resmen bildirdiğine göre, bu firma tarafından 2007 yılının sonu itibarı ile sadece elektrik santrallerinde kullanılmakta olan veya kurulum aşamasında olan gaz türbini gruplarının sayısı 10,200'dür. Bunların ortalama güçleri 25 MW ile 520 MW arasında değişmektedir. Bunun yanında ortalama güçleri 40 MW ile 1500 MW arasında değişen 3980 adet buhar türbini elektrik üretimi amacıyla kullanılmaktadır.

### **3.2 Gaz Türbini Kanatçık Malzemelerinin Özellikleri**

Gaz türbinlerinde kullanılmak üzere malzeme geliştirilmesi son derece uzun süren yüksek maliyetli çalışmalardır. Bu çalışmalar, yeni eğilimler ve malzeme teknolojisindeki yenilikler gözönüne alınarak yürütülür. İhtiyaca en iyi cevap verecek potansiyeli taşıyan bir veya iki malzeme seçilerek çalışmalar başlatılır ve ilk önce detaylı testler yapılarak malzemenin gaz türbinlerinde binlerce saat aralıksız çalışmaya uygun olup olmadığına bakılır. Aday alışımanın performansını değerlendirmek amacı ile çalışma sıcaklığında sürünme dayanımına bakılır [1,2].

Buna ilave olarak laboratuvar şartlarında gerilme mukavemeti, kırılma mukavemeti, düşük-yüksek çevrim yorulma mukavemeti, termo-mekanik yorulma, sertlik, oksidasyon/korozyon direnci, üretim/proses deneyleri yapılır ve denenmekte olan malzemenin tüm fiziksel özellikleri belirlenir. Bu testler, özellikle kanat malzemesi tasarlanıyorsa yıllarca sürebilir. Laboratuvar testleri yapıldıktan sonra, malzemeler çalışma ortamlarında değişik makinalarda kullanılarak saha testleri yapılır. Türbin kanatlarının imalatı günümüzde döküm yöntemi ile yapılmaktadır. Döküm yöntemi ile üretim, şekil verilmesi zor olan alaşımların kullanımını sağladığı gibi, kanatçık içerisinde bulunması zorunlu olan soğutma amaçlı hava kanallarının dizaynı için de kolaylık sağlar. Çoğunlukla geleneksel eşeksenli (ekuiaksiyal) döküm yöntemi kullanılır. Bu yöntemde ergimiş metal seramik kalıba  $10^{-2}$  mmHG basınç altında

veya vakum altında dökülür. Dökümün vakum altında yapılması, süper alaşımların içeriğinde bulunan son derece reaktif elementlerin havadaki oksijen ve azot ile reaksiyona girmesini engeller [1,2,9]. Sıvı metalin ve kalıbın ısısal kontrolünün hassas bir şekilde yapılması ile ergimiş metal yüzeyden merkeze doğru eşeksenli bir şekilde katılaşmaya başlar. Çekilme boşluklarını önlemek için döküm sırasında sıvı metalin kontrollü beslenmesine dikkat edilmesi gerekir. Son 30 yılda döküm yöntemiyle üretilmiş olan türbin kanatlarına örnekler Şekil 3.7’de görülmektedir.



**Şekil 3.7 :** Türbin kanatçıkları

Kanatçık üretiminde kullanılan bir diğer yöntem ise yönlendirilmiş katılaştırma tekniğidir. İlk önce uçak motorlarının kanatçıklarının üretimi için geliştirilen bu yöntemde hassas sıcaklık kontrolü ile öncelikle kanatçıkta bir katılma cephesi oluşturulur ve parça boyunca bu katılma cephesi hareket ettirilir. Sonuçta ortaya ana eksenli boyunca yönlendirilmiş tane yapısı olan bir kanatçık çıkar ve bu kanatçık hiç enine tane sınırı içermez. Enine tane sınırları olmayan bir kanatçık daha yüksek sürünme ve kopma dayanımına sahip olur. Yönlendirilmiş tane yapısı ise daha yüksek bir elastisite modülü, dolayısıyla yüksek yorulma dayanımı sağlar. Kanatçık üretiminde en son gelişme ise tane sınırları olmayan tek kristal döküm yöntemidir [1,2,9].

### 3.2.1 Kanatçık malzemeleri

Süper Alaşımlar ve üretim teknikleri üzerine yapılan araştırma-geliştirme çabaları maliyetli ve zaman alan çalışmalar olmalarına rağmen hızla devam etmektedir. Bu çalışmaların en önemli itici gücü, enerji maliyetlerinin ve ihtiyaçlarının sürekli arttığı dünyamızda güç-verimlilik kazanımlarına en üst seviyede ihtiyaç duyulmasıdır [1,2].

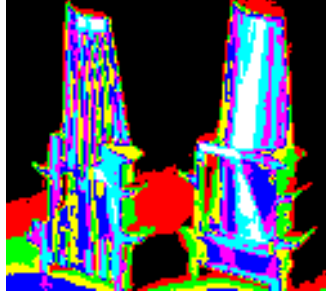
Tablo 3.1’de ise, kanatçık malzemesi olarak kullanılan bazı alaşımların kimyasal kompozisyonu görülmektedir.

**Tablo 3.1 : Gaz Türbini Kanatlarında Kullanılan Yüksek Sıcaklık Alaşımları**

Bileşim	Cr	Ni	Co	Fe	W	Mo	Ti	Al	Cb	V	C	B	Ta
Alaşım													
U500	16,5	BAL	18,5	-	-	4	3	3	-	-	0,07	0,006	-
RENE77	15	BAL	17	-	-	5,3	3,35	4,25	-	-	0,07	0,02	-
IN735	16	BAL	8,3	0,2	2,6	1,75	3,4	3,4	0,9	-	0,10	0,001	1,75
GTD111	14	BAL	9,5	-	3,8	1,5	4,9	3	-	-	0,10	0,01	2,6

1970’li yıllardan itibaren kanatçıkların ısıl dayanımlarını artırmak amacıyla hava ile soğutma teknikleri önem kazanmaya başladı. Böylece yanma sıcaklığı ile kanatçık sıcaklığı arasında fark yaratılmış oldu. Bununla birlikte metal yüzeyin 870° C’lık sıcaklıkların üzerine çıkmasının yol açtığı yüksek sıcaklık korozyonu kanatçıkların mekanik mukavemet değerlerinden daha fazla sınırlayıcı olmaya başlamıştır. Bu durum, koruyucu kaplamaların kullanımının başlamasına kadar sürmüştür [2].

1980’li yıllar boyunca dikkatler iki alan üzerinde toplanmıştı. Birinci alan korozyon direncinden taviz vermeden daha mukavim kanatçık alaşımlarının araştırılması, ikincisi ise daha etkin bir şekilde hava ile soğutma olmuştur. Kombine çevrim santrallerde daha yüksek verimliliği sağlayan buhar ile soğutma ise 1990’larda kullanılmaya başlanmıştır [2].



**Şekil 3.8 :** Kanatçık soğutma kanallarının görünümü

Kanatçık dizaynı, alaşımın performansı açısından göz önünde tutulması gereken en önemli parametrelerden birisidir. Bununla beraber uzun ömürlü kanatçık üretimi için, sürünme, düşük-yüksek devir yorulması, ısıl yorulma, gerilme direnci, süneklik, darbe direnci, yüksek sıcaklıkta korozyon ve oksidasyon direnci, üretilebilirlik ve kaplanabilirlik gibi fiziksel özelliklerin de dikkate alınması gereklidir [2].

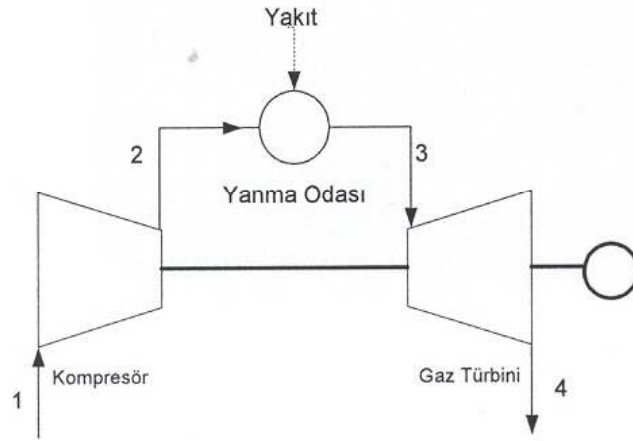
### 3.3. Gaz Türbinlerinin Termodinamik Analizi

Basit tek şaftlı gaz türbinlerinde kompresör ve gaz türbini birer tanedir ve bir mil ile birbirlerine bağlıdır (Şekil 3.9). Çevre şartlarında kompresöre giren hava sıkıştırıldıktan sonra yanma odasında yakıt ile karıştırılır ve yakılır. Yanma odası çıkışında yanma ürünleri çevrimin maksimum sıcaklığına sahiptir. Bu sıcaklıkta türbine giren yanma ürünleri türbinde çevre basıncına kadar genişler. Gaz türbininden elde edilen işin bir bölümü kompresördeki sıkıştırma işinde harcanır. Geriye kalan iş net iş olarak türbin milinden alınır [7]. Çevrimde dolaşan 1 kg akışkan için elde edilen net iş ( $W_{net}$ ) yakıt miktarı ihmal edildiğinde;

$$W_{net} = c_{pg} T_3 \eta_{is} \left( 1 - \frac{1}{P_{rt}^b} \right) - \frac{c_{pa} T_1}{\eta_{cis}} (P_{rc}^a - 1) \quad (3.1)$$

şeklinde yazılır. Burada;  $c_{pg}$  yanma ürünlerinin özgül ısısı,  $c_{pa}$  havanın özgül ısısı,  $T_3$  türbin giriş sıcaklığı,  $\eta_{is}$  türbin izentropik verimi,  $\eta_{cis}$  kompresör izentropik verimi,  $P_{rt}$  türbin basınç oranı,  $P_{rc}$  kompresör basınç oranı,  $a = (k_a - 1/k_a)$  ve  $b = (k_g - 1/k_g)$ ,  $k_g$  gazların özgül ısı oranı,  $k_a$  havanın özgül ısı oranı ve  $T_1$  çevre sıcaklığıdır. Türbin sıkıştırma oranı, kompresör sıkıştırma oranından sistemdeki

kayıpların miktarına bağlı olarak daha küçüktür. Bu sebepten türbin sıkıştırma oranı kayıplara bağlı olarak kompresör sıkıştırma oranı ile ifade edilir.



**Şekil 3.9 :** Basit tek şaftlı gaz türbini

Basit tek şaftlı gaz türbini Eşitlik 1'de net işe etki eden parametrelerden  $c_{pg}$ ,  $c_{pa}$ ,  $k_a$ ,  $k_g$ ,  $\eta_{t's}$ ,  $\eta_{cis}$ , basınç kayıpları ve  $T_o$  sabit olarak alınabilir. Bu nedenle, net iş türbin giriş sıcaklığı ve kompresör sıkıştırma oranının fonksiyonudur. Gaz türbinlerinde termik verim, net işin yanma odasında verilen ısı enerjisine ( $Q_y$ ) oranıdır [7].

$$\eta_{the} = \frac{W_{net}}{Q_y} \quad (3.2)$$

Yanma odasında 1 kg hava için verilen ısı miktarı ( $Q_y$ );

$$Q_y = \frac{c_{pb} \cdot (T_3 - T_2)}{\eta_b} \quad (3.3)$$

olarak yazılır. Burada;  $c_{pb}$  yanma odasındaki ortalama özgül ısı,  $T_2$  kompresörden çıkış ve yanma odasına giriş sıcaklığı ve  $\eta_b$  yanma verimidir. Kompresör çıkış sıcaklığı ve net iş ifadesi eşitlik 2'de yazılarak gaz türbinlerindeki termik verim,

$$\eta_t = \frac{\left( c_{pg} T_3 \eta_{tis} \left( 1 - \frac{1}{P_{rt}^b} \right) - \frac{c_{pa} T_1}{\eta_{cis}} (P_{rc}^a - 1) \right) \eta_b}{c_{pb} \left( T_3 - T_1 \left( 1 + \frac{1}{\eta_{cis}} (P_{rc}^a - 1) \right) \right)} \quad (3.4)$$

olarak elde edilir. Sonuç olarak termik verim  $c_b$  ve  $\eta_b$  sabit alındığında türbin giriş sıcaklığı ve kompresör sıkıştırma oranının fonksiyonu olacaktır. Gaz türbinlerinde net çıkış gücü ( $N$ ), net iş ve kütleli debiye bağlı olarak,

$$N = m_a W_{net} \quad (3.5)$$

şeklinde olur. İşletme esnasında basit tek şaftlı gaz türbinlerinde kütleli debi sabit kalacağından güç net işin değişimi ile değişir. Diğer bir deyişle güç, kompresör sıkıştırma oranı ve türbin giriş sıcaklığının fonksiyonudur [7].

### 3.4 Gaz Türbinlerinde Kullanılan Yakıtlar

#### 3.4.1 Genel Bilgiler

Gaz türbinleri halen çok büyük, güçlü elektrik santrallerinde, orta güçlü uçak ve gemi tahrik gruplarında, ufak güçlü kara nakliye vasıtalarında ve daha birçok alanlarda, ana veya yardımcı makine olarak vazife görmektedir.

Bu kadar büyük sahaya yayılmış olan gaz türbinlerinde, gerekli çalışma maddesini sağlayan yakıtların da çok çeşitli olması doğaldır.

Bir gaz türbininin, yanma odası veya serbest pistonlu gaz jeneratöründe kullanılan yakıtın seçilmesinde; ekonomik sebepler, teknik gereksinimler, yerel şartlar, işletme güvenliği gibi çeşitli faktörler rol oynar [8].

Mevcut yakıtlar: katı, sıvı ve gaz halinde olmak üzere başlıca üç gruba ayrılırlar. Bunların herbiri ayrıca; doğal ve hazırlanmış olmak üzere ikiye ayrılır. Gerçek manada bir yakıt olmamakla birlikte, bir ısı kaynağı teşkil etmeleri sebebiyle, reaktörlerde kullanılan fisyon elemanları da, yakıt ünvanını taşır.

Katı yakıtların doğal olanlarının başlıcaları: antrasit, taş kömürü, linyit, doğal katı bitüm, trup ve grafit kömürü; hazırlanmış olanların başlıcaları ise; kok, semikok, mangal kömürü ve brikettir.

Aynı şekilde, sıvı yakıtların doğal olanlarının başlıcası: ham petrol; hazırlanmış olanların başlıcaları ise: fuel oil, mazot, motorin, gaz yağı, jet fuel, bütan ve propan gibi petrol distileleri ile ağır fuel oil, zift, katran gibi distilasyon atıklarıdır.

Gaz halindeki yakıtların doğal olanlarının başlıcası doğal petrol gazı, hazırlanmış olanların başlıcası ise; metan, etan gibi distilasyon mahsulleri ile jeneratör gazı, yüksek fırın gazı, hava gazı ve benzerleridir. Bilindiği üzere, hidrojen gazı da yüksek evsafı bir yakıt oluşturmaktadır [8].

Yukarıda belirtilmiş yakıtlara ek olarak: talaş, bez ve kağıt kırıntısı, presten çıkmış tohum artığı, deri parçası gibi çeşitli fabrikasyon artıkları ile imalatta yan mahsul olarak çıkan çeşitli yanıcı maddeler de birer yakıt malzemesi olarak kullanılırlar. Hatta son yıllarda, büyük şehirlerde toplanan çöpler bile enerji üretimine yarayan bir yakıt olarak kullanılmaktadır.

Yukarıda belirtilmiş olan yakıtlara ilaveten: kömür cinslerini değirmende öğütmek suretiyle elde edilen toz yakıtlar; toz halindeki katı yakıtlar ile akaryakıtların karıştırılması sonucu elde edilen koloidal yakıtlar ve nihayet kömürden sentetik olarak elde edilen akaryakıtlar da mevcuttur.

Bir yakıtın yararlı kısmı, içinde bulunan karbon ve hidrojenidir. Sıvı ve gaz halindeki yakıtlarda da, karbonun yerini çeşitli hidrokarbonlar alır. Terkibin içinde ayrıca kükürt ve karbonmonoksit gibi maddeler bulunduğu takdirde, bunlar da yandıklarından faydalıdır. Yakıtın cinsine ve menşesine göre bunlara ilaveten çeşitli yanmayan maddeler de bulunur. Bunların başlıcaları: oksijen ve azot gibi gazlar, çeşitli madenler ve metaloitler, bir de sudur [8].

Bir yakıt içinde yüzde olarak: bağlı yahut sabit karbon, uçucu maddeler, rutubet ve yanmayan maddeler bulunur. Yanmayan maddelerin bir kısmı, yanma olayından sonra kalan kül ve curufu oluşturur.

Kurutma olayına tabi tutulmamış her katı yakıtın içinde bir miktar su bulunur. Bu su miktarı, bahis konusu olan yakıtın rutubet derecesini belirler. Bu faktörün tespiti, söz konusu yakıtın, 100 °C sıcaklık altında bir saat ısıtmak suretiyle olur. Bu süreden önce ve sonra yapılmış olan tartmalar arasındaki fark, o yakıtın içinde bulunan rutubet derecesini verir. Bu su miktarı, hem yakıt ağırlığını gereksiz yere arttırdığından, fiilen nakliyyeyi pahalılaştırmış; hem de yanma sırasında yakıt ısısının bir kısmını alarak buharlaşacağından, yakıtın ısı değerini azaltmış olur. Rutubet



derecesi, katı yakıtı ısıtmak suretiyle azaltılabilir veya tamamen ortadan kaldırılabılır. Böylece kuru yakıt elde edilmiş olur [8].

Kül, yakıtın içinde bulunan, yanmayan maddelerdir. Doğal olarak, katı bir yakıtın tam yanması sonucunda kül oluşur. Bu yanmayan maddelerin başlıcaları: toz, toprak, kum, kireç, demir piritleri, silikatlar, aluminatlar ve magnezyum bileşimleridir. Bir yakıt içinde fazla kül bulunması, tıpkı rutubet derecesinde olduğu gibi, ağırlığının lüzumsuz yere artmasına ve bunun sonucu olarak da nakliyenin pahalalanmasına sebep olur. Diğer taraftan kül miktarı, yakıtın ısı değerini düşürür ve yanma amelyesini bozar. Ayrıca yanmayan maddeler eriyerek, yakıtın esasını oluşturan karbon veya hidrokarbonun etrafında yeşil bir tabaka oluşturur ve tam yanmasını önler. Bu şekilde pasakül ve kömür cürufu oluşur.

Bir katı yakıtın kül oranı, bu yakıtı bol suyla yıkamak suretiyle azaltılabilir. Bu yıkanma esnasında; toz, toprak ve kum gibi yabancı maddeler, yakıttan ayrılmış, bunun sonucunda da söz konusu yakıtın evsafı yükselmiş olur [8].

Kurutulmuş bir yakıtın ısıtılmaya devam edilmesi halinde, içinde bulunan gazlar dışarı çıkarak uçucu maddeleri meydana getirir. Bu maddeler: hidrokarbon, karbondioksit ve karbonmonoksit gibi karbonlu gazlar, kükürtlü gazlar ile su buharı, azot ve havadan gelen diğer inert gazlardır. Karbonlu gazlar, karbonmonoksit hariç olmak üzere yanıcı maddelerdir.

Isıtma sonucunda, bir yakıtın içinde bulunan su ve uçucu maddeler çıktıktan sonra, sabit karbon miktarı kalır. Bu sabit karbon, adından anlaşıldığının aksine yalnız karbondan oluşmuş değildir. Bu madde içinde karbona ilaveten: karbonize edilmiş artıklar, yanmayan maddeler ve çok az miktarlarda hidrojen, oksijen ve azot, bir de başlangıçtaki kükürtün takriben yarısı bulunur.

Bir yakıtı yanabilen maddeler ve balast diye iki kısma ayırmak da mümkündür. Bu takdirde balast tabiri yanmayan maddeleri içermektedir.

Gaz türbinleri tesislerinde kullanılmaya en uygun haldeki yakıtlar sırasıyla gaz, sıvı ve katı haldeki yakıtlardır.

### 3.4.2. Gaz Halindeki Yakıtlar

Moleküler bünyelerinin basitliği sebebiyle gaz halindeki yakıtlar çok kolaylıkla yanabilir. Bu sebeple de gaz türbinli tesisler için en iyi yakıtı teşkil ederler. Bu yakıtların yakılmalarının otomatik olarak kontrolü de, genellikle gayet basittir.

Esas olarak çeşitli hidrokarbonlardan, karbonmonoksitten ve hidrojen gazından oluşabilen gaz halindeki bir yakıt, katı ve sıvı yakıtların hemen bütün iyi özelliklerini taşır. Tek mahzurlu tarafı depo edilmesinin zorluğudur. Bu sebepten dolayı, elde edildiği merkezden derhal kullanılmaya gönderilerek sarfedilmesi gerekir. Bu durumda gaz halindeki yakıtların ancak sabit tesislerde kullanılacakları tabidir.

Gaz türbinli tesislerde kullanılan gaz halindeki yakıtlar: doğal gaz, ham petrolün veya kömürün tasfiye edilmesi sırasında elde edilen artık gazlar, yüksek fırın gazı ve aşağıda belirtilmiş olan diğer yanabilen sıvı gazlardır [8].

Bunların içinden doğal gaz, bir gaz türbinli tesis için en ideal yakıttır. Bu gazın içinde toz bulunmadığından, tesiste gaz filtresi kullanmaya lüzum yoktur. Normal olarak bu gaz alıcıya kadar, bir boru devresi içinde belli bir üst basınçla geldiğinden, tesiste ayrıca sıkıştırılmasına genellikle ihtiyaç duyulmaz. Böylece gazın sıkıştırılmasında kullanılan bir kompresöre de ihtiyaç duyulmaz. Gerek filtre, gerekse gaz kompresörünün ortadan kalkmasının tesisi basitleştireceği ve yatırım masraflarını azaltacağı tabidir. Ayrıca gaz kompresörünün tahriki için mekanik güç sarfetmeye gerek kalmadığından, tesisin termik verimi de yükselmiş olur [8].

Doğal gazın içeriği, çıktığı yere göre büyük oranda değişebilir. Bunların içeriğinde metan veya etan oranları fazla olabileceği gibi, hidrokarbonlara ilaveten, karbonmonoksit ( $CO$ ), karbondioksit ( $CO_2$ ) ve hatta sülfirik asit ( $H_2S$ ) de bulunabilir. İçeriğine göre ısı değeri  $6500 \text{ kcal/Nm}^3$  ile  $15000 \text{ kcal/Nm}^3$  gibi büyük sınırlar arasında oynayabilen bu gaz için, ortalama değer  $9800 \text{ kcal/Nm}^3$  alınabilir. Bir doğal gazda  $0^\circ C$  ve  $760 \text{ mmHg}$  durumunda özgül ağırlık değerleri genellikle  $0,60 \text{ kg/Nm}^3$  ile  $0,8 \text{ kg/Nm}^3$ , yanma sonucunda açığa çıkabilen maksimum  $CO_2$  miktarları ise; %9,5 ile %12,5 sınırları arasında kalır.

Tablo 3.2’de, 3 ayrı bölgeden alınarak; A, B, ve C diye adlandırılmış 3 ayrı doğal gazın, hacim oranı olarak içerikleri ve  $0^\circ C$  ve  $760 \text{ mmHg}$ ’deki özgül ağırlıkları

verilmiştir. Bunlardan A diye adlandırılmış olanda metan oranı, B diye adlandırılmış olanda ise etan oranı zengin bulunmaktadır.

**Tablo 3.2 : 3 Farklı doğaz gazın karşılaştırılması**

Doğal Gaz İçeriği	Formülü	Hacim Oranı	A	B	C
Metan	CH <sub>4</sub>	%	91,9	73,89	66,58
Etilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	%	2	18,39	8,11
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	%	0,9	3,43	5,01
İzobütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	%	0,3	0,95	0,58
Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	%	-	-	1,39
Pentan	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	%	-	-	0,53
Azot	N <sub>2</sub>	%	4,9	4,03	4,93
Karbon dioksit	CO <sub>2</sub>	%	-	0,21	2,12
Sülfirik Asit	H <sub>2</sub> S	%	-	-	10,07
Özgül Ağırlık	-	kg/Nm <sup>3</sup>	0,599	0,712	0,789

Bir doğal gazın içeriğinde ağır hidrokarbonlar bulunduğu takdirde, sıcaklığın düşük olması halinde bunlar yoğunlaşarak, reglaj mekanizmasında ve brülörlerde tıkanmalara sebebiyet verir. Bu sakıncalı durum, yakıt gazını bir eşanjörde bir miktar ısıtarak, yoğunlaşmaya mani olmak suretiyle önlenabilir [8]. Bunun için genellikle türbinin ekzost gazlarının ısısından istifade edilir. Bu durumda artmış olan yakıt gazı basıncının, yanma odasından evvel bir genişleme türbini aracılığıyla düşürülmesi gerekir. Yalnız bu durumda, genişleme türbininden çıkan yakıt gazında sıcaklığın, ağır hidrokarbonların yoğunlaşmasına meydan vermeyecek kadar yüksek kalmasına dikkat etmek gerekir.

Doğal gazın içeriğinde bulunabilen kükürt ve hidrojen de bazen zorluklar meydana getirebilir. Gerçi bir gaz türbinli tesisin hiçbir yerinde, düşük sıcaklıklarda meydana gelen kükürt korozyonundan çekinmeye gerek yoktur. Fakat buna karşılık yüksek sıcaklıklarda oluşabilen sülfidler, tesis malzemesini etkileyerek, aşınmalara sebebiyet verebilir. Bu aşınmalara karşı yüksek nikel içeren alaşımlı çelikler özellikle hassastır. Bir doğal gazın büyük bir hacim yüzdesini metan oluşturduğundan, ateşleme nispeten ufak sınırlar arasında kalır. Bu gazın, hava ile belirli orandaki karışımlarında, yanmayı infilak ettiği bilinmektedir. En şiddetli patlama, gaz / hava oranının 1/10 değerinde olması halinde olur. Bu özelliğin gerek hava fazlalığı

katsayısının seçilmesinde, gerekse brülör konstrüksiyonlarında dikkate alınması gerekir.

Bazı hallerde, doğal gazın büyük yanma odalarında yakılması sırasında oluşan duman gazının rengi hafif sarı olur. Bir zamanlar bu durumu, karışım içindeki  $NO_2$  gibi nitrojenli gazların meydana getirdiği zannediliyordu. Fakat son araştırmalar bunun doğru olmadığını ve sarımtırak rengin yanmadan hemen evvel veya yanma olayı sırasında meydana gelen piroşimik olaylardan doğduğunu göstermiştir. Zaten duman gazının sarımtırak rengini; brülör konstrüksiyonunu veya yanma odasında, hava fazlalığı sayısını değiştirmek suretiyle gidermek mümkündür.

Rafinerilerde ham petrolün, fraksiyonel olarak distile edilmesi halinde; metan ( $CH_4$ ), etan ( $C_2H_6$ ), propan ( $C_3H_8$ ) ve bütan ( $C_4H_{10}$ ) gibi gaz halinde hidrokarbonlar elde edilir. Aynı şekilde taş kömürünün veya linyitin aynı işlemlere maruz bırakılması halinde de, metana ilaveten; etilen ( $C_2H_4$ ), propilen ( $C_3H_6$ ) ve bütilen ( $C_4H_8$ ) gibi gazlar çıkar. Bütün bu gazları teker teker veya karışımlar halinde, gaz türbinli tesislerin yanma odalarında yakmak mümkündür. Fakat bu durum ancak petrol rafinerilerinde veya kömür tasfiyehanelerinde, gerekli mekanik gücün elde edilmesinde, o da nispeten ender olarak yapılmaktadır. Çünkü bu gazlar halen, sınai – kimya ve petro – kimya sanayilerinde önemli ve kuvvetli birer hammadde teşkil etmektedir. Zaten propan ve bütanın, LPG yani sıvı gaz halinde alıcıları daima hazırdır [8].

Bütün bu distilasyon gazları hakkında gerekli bilgiler, Tablo 3.3’de verilmiştir.

**Tablo 3.3 :** Distilasyon gazlarının özellikleri

Gaz Adı	Formül	Özgül Ağırlık $kg/Nm^3$	Alt Isı Değeri $Kcal/Nm^3$	CO <sub>2</sub> Max. Miktarı %	Hava Miktarı $Nm^3/Nm^3$	Duman Gazı Miktarı $Nm^3/Nm^3$	Ateşleme Sıcaklığı °C
Metan	CH <sub>4</sub>	0,71	8550	11,7	9,52	10,52	645
Etan	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	1,34	15370	13,2	16,65	18,15	530
Etilen	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1,25	14320	15,0	14,3	15,28	540
Propilen	C <sub>3</sub> H <sub>6</sub>	1,87	21070	15,1	21,4	22,9	-
Propan	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	1,96	22350	13,7	23,8	25,8	510
Bütilen	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub>	2,50	27190	14,9	28,5	30,5	-
Bütan	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	2,59	29500	14,1	30,8	33,4	490

Gaz Türbinli tesislerde kullanılan gaz halindeki yakıtların önem bakımından ikincisi, yüksek fırın gazıdır. Bir demir eritme fırını, kok kömürü ile ısıtıldığından, her kilogram kömürden, ortalama  $1980 \text{ m}^3$  yüksek fırın gazı elde edilebilir.

Bir yüksek fırın gazının içeriği, aynı tesiste bile, mevcut şartlarla ilgili olarak büyük sınırlar arasında farklılık gösterir. Normal olarak içeriğinde; Karbon monoksit ( $CO$ ), karbon dioksit ( $CO_2$ ), hidrojen ( $H_2$ ) ve azot ile oksijen ( $N_2 + O_2$ ) bulunur. Bu karışımda, yanabilen gazları yalnızca  $CO$  ve  $H_2$  oluşturmaktadır. Demek ki, bir yüksek fırın gazının ısı değeri, içindeki yanıcı gazların hacim oranıyla ilgili olarak,  $700 \text{ kcal/Nm}^3$  ile  $1050 \text{ kcal/Nm}^3$  arasında değişir. Bu gazın yakılması halinde açığa çıkan azami  $CO_2$  miktarı ise %23 civarındadır.

Yüksek fırın gazı, gaz türbinli tesisler için ucuz; fakat aşağıda belirtilmiş olan çeşitli sebepler dolayısıyla, pek de ideal olmayan bir yakıt teşkil eder.

Yakıt olarak kullanılan yüksek fırın gazı, zaten düşük olan ve bileşimine göre  $700 \text{ kcal/Nm}^3$ 'e kadar inebilen ısı tutumu sebebiyle, gaz türbinli tesislerde gerekli hacimlerin bir hayli büyümesine sebep olur. Bu durumun da tesis maliyetini yükselteceği tabidir [8].

Ayrıca bir yüksek fırın, üst basınç altında çalışmadığından, çıkan duman gazından bir gaz türbininde faydalanılabilmesi için, bunun daha evvel bir özel kompresöre gönderilerek, burada basıncının artırılması gerekir. Bu da, tesisin yarar gücünün önemli bir kısmını, bu özel kompresörün tahriki için sarf edilmesi gerekliliğini doğurur.

İçinde  $CO$  ve  $H_2$  bulunan bir gaz karışımının yanması sırasında;  $1/2$  hacim  $O_2$ , 1 hacim  $CO_2$  veya yine  $1/2$  hacim  $O_2$ , 1 hacim  $H_2$  ile 1 hacim  $H_2O$  verdiği için neticede mevcut  $CO + H_2$  hacminin %50' si ortadan kaybolmuş veya açığa çıkan duman gazı hacminde %7 ile %9 miktarında bir azalma meydana gelmiş olur. Bu yüksek fırın gazının yegane yanıcı maddelerini zaten bu 2 gaz teşkil etmektedir.

Bir yüksek fırın gazı ya da doğal gaz yakıldığı takdirde, aynı miktarda ısı açığa çıkması için, birinci gazda ikinciye nazaran %30 kadar daha az havaya ihtiyaç bulunur. Bu hususa bilhassa, yakıt olarak icabına göre; yüksek fırın gazı, doğal gaz ya da akaryakıt kullanmak üzere projelendirilen gaz türbinli tesislerde dikkat etmek gerekir [8].

Yüksek fırın gazının yakıt olarak kullanılmasında en önemli zorluğu, içinde süspansiyon halinde bulunan toz zerrecikleri oluşturur. Normal olarak, yüksek fırından çıkan duman gazlarının, her bir  $m^3$ 'ünün içinde  $1,8 \text{ g}/m^3$  civarında toz bulunur. Bu tozlar; hem türbin içinde korozyon olaylarına sebep olur, hem de cidarlar üzerine yapışarak kanalları tıkar.

Yüksek fırın gazları içinde bulunan tozların bileşimi, büyük sıvılar arasında oynar. Türbinin iç kısımlarında meydana gelen korozyon da, bu bileşimle ilgili olarak değişir. Hemen tamamı oksitlerden oluşmuş olan bu tozların içeriğinde, örnek olmak üzere, Tablo 3.4'de, Almanya'da Ruhr bölgesinde bir yüksek fırın tesisinde yapılmış olan analiz sonuçları, ağırlık olarak verilmiştir. Bu bileşime sahip tozun erime noktası  $1200 \text{ }^\circ\text{C}$  civarında bulunmaktadır.

**Tablo 3.4 :** Almanya'da ruhr bölgesinde bir yüksek fırın gazı içinde bulunan tozun bileşimi

Madde Adı	Formülü	Yüzde Oranı %	Madde Adı	Formülü	Yüzde Oranı %
Demir Oksidi	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	13,3	Kurşun Oksidi	$\text{PbO}$	1,9
Magnezyum Oksidi	$\text{MgO}$	3,3	Çinko Oksidi	$\text{ZnO}$	27,0
Silisyum Oksidi	$\text{SiO}_2$	6,8	Sülfat	$\text{SiO}_3$	24,0
Kil	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiO}_2$	3,5	Fosfor Oksidi	$\text{P}_2\text{O}_5$	1,2
Kireç	$\text{CaO}$	5,5	Su	$\text{H}_2\text{O}$	0,9
Bakır Oksidi	$\text{CuO}$	11,7			

Yüksek fırın gazıyla çalışan ilk tesislerde türbine giden çalışma maddesi içinde bulunan maksimum toz miktarı,  $0,02 \text{ g}/m^3$  olarak tespit edilmiştir, fakat kısa bir zaman içinde, meydana gelen korozyon derecesi, bu limitin çok yüksek olduğunu ortaya koymuştur. Modern tesislerde izin verilebilen toz miktarı  $0,001 \text{ g}/m^3$  ile  $0,002 \text{ g}/m^3$  arasında kalmaktadır [8].

Yüksek fırın gazının, gaz türbinli tesislerde yakıt olarak kullanılabilmesi için, içinde bulunan tozlardan, yukarıda belirtilen sınır değerine erişilecek kadar arınmış olması gerekir. Bu durum halen, seri halinde konulmuş, elektrikli ve Theisen tipi mekanik filtreler yardımıyla sağlanmaktadır. Temizleme prosesinin verimi, yüksek fırın gazı içine, elektrikli filtreye girmeden evvel, bir miktar oldukça ufak zerrecikler halinde su veya doymuş buhar püskürtmek suretiyle yükseltilebilir. Bu takdirde tozu içine

olarak yüklenen su zerreciği, elektrikli filtrelerde, toza nazaran daha kolaylıkla elimine edilmiş olur.

Yakıt olarak yüksek fırın gazı kullanılan modern gaz türbinli tesislerde, bu gazın, türbinin ekzost gazlarıyla ısınan bir ısı eşanjöründe ön ısıtılmasından tamamen vazgeçilmiştir. Çünkü ısı eşanjörüne gönderilen yüksek fırın gazı içinde bulunan karbon monoksitte, sıcak demir yüzeylerine çarpınca, redüksiyon prosesi meydana gelmekte; yani  $CO$ ' nun oksijeni giderek, geriye karbon kalmaktadır. Bu karbon da boruların üzerine yapışarak, kısa zamanda kanalların tıkanmasına ve ısıtıcının iş göremez hale gelmesine sebep olmaktadır. Bu sebepten dolayı, bu yakıtı kullanan modern tesislerde, türbinin ekzost ısıyla yalnızca yakma havası ön ısıtılmaktadır.

Yukarıda belirtilmiş olan çeşitli mahzurlu taraflarına karşılık, yakıt olarak kullanılan yüksek fırın gazının iyi tarafını da, ateş alma sahasının oldukça büyük olması oluşturur. Bu özelliği sayesinde, ısı tutumunu çok düşük olmasına rağmen, yüksek fırın gazı stabil olarak yanar; yani alev nadiren söner [8].

Yüksek fırın gazının tozdan arınması için püskürtülmüş olan su veya doymuş buhar; dış sıcaklığın düşmesi halinde yoğuşur. Bu yoğuşum suyunun, bir trap veya emsali bir tertibat aracılığıyla, derhal devre dışına atılması şarttır. Aksi takdirde oluşan su buharı, yüksek fırın gazını kenara iterek, yalnız başına brülöre kadar gider ve alevin sönmeye sebep olur.

Yüksek fırın gazı, morumtrak bir alevle yanar. Bu alevden, yanma odası cidarlarına geçen radyasyon ısısı, diğer klasik yakıtlarınkine nazaran daha azdır. Bu özellik, yanma odası ömrünün daha fazla olmasını sağlar.

Yüksek fırın gazı, içeriğinde yüksek oranda karbon monoksit bulunması sebebiyle, zehirlidir. Bu sebepten, yakıtı yanma odasına getiren boru devrelerinde, kaçak meydana gelmemesine azami dikkat gösterilmesi gerekir. Modern tesislerde bu konu, özel dedektörler aracılığıyla kontrol altında tutulmaktadır. Buna karşılık, türbinden çıkan ve bir baca vasıtasıyla atmosfere atılan ekzost gazı içinde, artık karbon monoksit kalmadığından, bu önlemleri almaya gerek yoktur [8].

Sinter tesisi bulunan modern demir ve çelik fabrikalarında, yüksek fırından gelen gazın içindeki hidrojen miktarı çok düşük olur. Bunun sonucu olarak da, yüksek fırın gazının ısı tutumunun bilhassa az olacağı tabidir. Bu özellikte bir gazı yakıt olarak kullanan gaz türbinli tesislerde, yanma odası brülörünü başlangıçta, yani tesis daha

soğukken, akaryakıt yakabilecek ek bir düzeneğe sahip olacak şekilde yapmak gerekir.

Yukarıda belirtilmiş olan, doğal gaz ve yüksek fırın gazlarına ek olarak, gaz türbinli tesislerde kullanılacak başlıca gaz halindeki yakıtların; özgül ağırlık, üst ve alt ısı değerleri, bileşenleri ve bunların yanmaları sonucunda açığa çıkabilecek azami  $CO_2$  miktarları Tablo 3.5’de belirtilmiştir. Burada verilmiş olan bileşenler, kullanılacaklar arasında ancak birer örnek mahiyetindedir. Bileşen değişince, karakteristik değerlerin de farklı çıkacağı göz önünde bulundurulmalıdır.

**Tablo 3.5 : Gaz türbinlerinde kullanılan yakıtların genel özellikleri**

Yakıt Adı	Özgül Ağırlık $kg/Nm^3$	Isı Değeri $Kcal/Nm^3$		Bileşim							$CO_2$ Max. Değeri %
		Üst	Alt	CO	$H_2$	$CH_4$	$C_nH_m$	$CO_2$	$N_2 + O_2$	$H_2S$	
Doğal Gaz											
a - Metan Oranı Fazla	0,8	9030,0	8120,0	-	-	90,5	2,5	0,4	6,6	-	9,5
b - Etan Oranı Fazla	0,9	11180,0	11100,0	-	-	75,0	24,0	-	1,0	-	12,3
Yüksek Fırın Gazı	1,3	1020,0	940,0	29,0	2,5	-	-	7,5	6,1	-	23,3
Jeneratör Gazı	1,2	1290,0	1225,0	28,0	13,0	0,5	-	6,0	52,5	-	20,6
Su Gazı	0,7	2780,0	2540,0	40,0	50,0	0,5	-	5,0	4,5	-	20,5
Kok Fırın Gazı	0,5	4510,0	4000,0	7,0	53,0	25,0	2,0	2,0	11,0	-	9,9
Hava Gazı											
a - Normal	0,6	4240,0	3790,0	21,5	51,5	17,0	2,0	4,0	4,0	-	13,3
b - Zehiri Alınmış	0,5	3970,0	3460,0	1,0	63,6	17,6	1,9	13,2	2,7	-	11,1
Ekstraksiyon Gazı											
a – Taş Kömüründen	0,6	7415,0		3,2	23,8	46,1	14,4	7,0	5,5	-	12,4
b - Linyitten	1,6	3582,0		13,6	5,5	11,9	11,3	48,0	3,7	6,0	25,5
Çifte Gaz	1,1	3100,0		37,3	47,8	6,7	1,2	3,4	2,6	-	18,0



Gerek bu tabloda gösterilmiş olan sını gazlardan, gerekse daha önce görülmüş olan petrol kimya endüstrisinden gelen gazlardan, bir türbin tesisinde yakıt olarak faydalanılabilmesi için başlıca 3 şart bulunmaktadır. Bunlardan birincisi, söz konusu gazın salınımının devamlı olması; ikincisi, salınan gazın miktarının türbinin ihtiyacına yetmesi; üçüncüsü ise, yanma odası, türbin ve irtibat devreleri içinde zararlı bir tesiri bulunmamasıdır. Buna karşılık bu gazın ısı değerinin sabit kalması şart değildir. Çünkü bu husus, tesis projelendirilirken bilindiği takdirde, gaz türbini tarafından çalıştırılan ve yakıtı sıkıştırmaya yarayan kompresörün reglaj sahasını büyük tutmak suretiyle değiştirilebilir. Çünkü bu takdirde, yakıtın basıncını; bunun sonucu olarak da özgül hacmini değiştirmek suretiyle, ısı değeri sabit değere getirilebilir [8].

Petrol ihraç eden ülkelerin son zamanlarda çıkardıkları çeşitli zorluklar ve ham petrol fiyatının sürekli artması karşısında, suyun elektroliz edilmesiyle ucuz olarak hidrojen gazı elde etmek için çalışılmaktadır. Bu amaç için gerekli elektrik enerjisinin bir nükleer santralden temini pahalı bir çözümdür. Ucuz maliyetli hidrojen gazı elde edilebilmesi halinde, enerji problemi çözülmüş olacaktır. Mükemmel bir yakıt olan hidrojenden, en kolay olarak bir gaz türbininde faydalanılabilir.

Bu sebepten dolayı daha çok erken olmakla beraber, gerek bu gazın, gerekse asetilen ( $C_2H_2$ ), karbon monoksit ( $CO$ ) ve sülfirik asit ( $H_2S$ ) gibi bazı yanıcı gazlar hakkında, Tablo 3.6'da gerekli bilgiler verilmiştir.

**Tablo 3.6 :  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $H_2S$  Gazlarının Karşılaştırılması**

Gaz Adı	Birim	Hidrojen	Asetilen	Karbon Monoksit	Sülfirik Asit
Formül	-	$H_2$	$C_2H_2$	$CO$	$H_2S$
Özgül Ağırlık 0 °C	kg / Nm <sup>3</sup>	0,09	1,17	1,25	1,51
Alt Isı Değeri	kcal / Nm <sup>3</sup>	2570	13,47	3020	5660
Azami CO <sub>2</sub> Miktarı	%	0	17,5	34,7	0
Hava Miktarı	Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup>	2,38	11,9	2,38	7,15
Duman Gazı Miktarı	Nm <sup>3</sup> / Nm <sup>3</sup>	2,88	12,4	2,88	7,64
Ateşleme Miktarı	°C	530	335	610	290

Taş kömürü, kok veya linyit gibi bir katı yakıtın, bir gaz jeneratörü içinde, basınç altında yakılması sonucunda, jeneratör gazı adı verilen yakıt oluşur. Jeneratör içinde, alt kısımda karbonun yanması ile meydana gelen karbon dioksit, üst kısımlarda bulunan kömürün etkisiyle, redüksiyona tabi tutularak, karbon monoksit haline geçer. Kullanılan yakıtın içinde, bağlı olarak su buharı bulunması halinde, jeneratörün üst kısımlarında ayrıca, hidrojen ve bir miktar da çeşitli hidrokarbonlar açığa çıkar. Demek ki jeneratör gazı esas olarak; karbon monoksit ve azot; tali olarak da, hidrojen, karbon dioksit ve su buharından oluşan bir gaz karışımıdır. Bu karışımın içinde, bazen de bir miktar hidrokarbonlar bulunabilir. Bir gazın hacminin ortalama yarısını azot teşkil eder. Başlangıç maddesi olarak kullanılan kömürün cinsine göre karışımdaki karbon monoksit miktarı, genellikle %10 ile %13, hidrojen miktarı ise %28 ile %30 civarındadır. Jeneratör gazı salınımında ısı serbest kaldığından, gaz çıkış sıcaklığı 600 °C ile 800 °C olur [8].

Jeneratör gazından bir gaz türbinli tesiste yakıt olarak istifade edilmesi halinde, yüksek olan jeneratörden çıkış sıcaklığı çok faydalı olur. Çünkü bu takdirde, bu gazın bir yakıt kompresöründe sıkıştırılmasına ihtiyaç kalmaz. Bu kompresöre lüzum kalmayınca, sıkıştırma işinin büyük çıkmaması için, bu kompresör önüne konulması gereken gaz soğutucusu da ortadan kalkar. Yalnız bu gazın da tıpkı yüksek fırın gazı için belirtilmiş olduğu üzere, yakıt olarak yanma odasına gönderilmeden evvel, elektrikli ve mekanik filtrelerden geçirilmek suretiyle, içinde süspansiyon halinde bulunan tozlardan temizlenmesi gerekir.

Yüksek sıcaklıkta yanma odası brülörüne gönderilen jeneratör gazı burada, türbinin ekzost gazı ısıyla ön ısıtılmış bulunan hava ile yakıldığı takdirde, gayet yüksek bir yanma sıcaklığı sağlanmış olur.

Jeneratör içinde hava yerine oksijen gazı kullanılmış olması halinde, gaz karışımı içindeki azot ortadan kalkacağından, daha yüksek vasıflı bir jeneratör gazı elde edilmiş olur. Bu gazın ısı değerinin de çok daha yüksek olacağı tabiidir.

Bir jeneratör içinde yanma havası yerine oksijen kullanarak, özellikleri Tablo 3.7'nin sol tarafında belirtilmiş olan taş kömüründen salınmış olan, yüksek vasıflı jeneratör gazının karakteristikleri, yine aynı tablonun sağ tarafında bulunmaktadır. Bu yakıtın ısı tutumu  $15650 \text{ kcal} / \text{Nm}^3$  civarındadır [8].

**Tablo 3.7 : Taş Kömürü Gazı – Jeneratör Gazı Karşılaştırması**

Kömür		Jeneratör Gazı	
Rutubet Derecesi	5%	Karbon Monoksit	21,4%
Kül Miktarı	22%	Hidrojen	57,3%
Uçucu Gaz Miktarı	42%	Metan	14,9%
Katı Karbon Miktarı	31%	Hidrokarbonlar	0,5%
Azami Kükürt Miktarı	2%	Karbon Dioksit	2%
Azami Klor Miktarı	0,5%	Azot	1,2%

Bir yanma odasında yakılacak olan gaz halindeki yakıtı hazırlamaya yarayan bu klasik gaz jeneratörleri ile, gaz türbinli tesislerde adı geçen, serbest pistonlu gaz jeneratörlerinin isim benzerliğinden başka ortak yanları yoktur. İçten yanmalı motor prensibiyle çalışan bu ikinci tip jeneratörler, gaz türbinli tesiste yanma odasının yerini alır ve gaz türbini için gerekli çalışma maddesini doğrudan temine yarar.

Yanarak beyaz hale gelmiş olan kok üzerine su buharı püskürtüldüğünde, karbon monoksit ve hidrojenden oluşan bir gaz karışımı elde edilmiş olur. Su gazı veya diğer adıyla kok gazı denilen bu gaz, iki yanıcı maddeden oluşur. Bu sebepten dolayı,  $2500 \text{ kcal} / \text{Nm}^3$  civarında olan ısı değeri, normal jeneratör gazınıninkinden takriben 2 kat daha yüksektir [8].

Su veya kok gazı salınımında, reaksiyon ısı aldığından sıcaklık düşer. Bu sebeple sıcak kok üzerine buhar püskürtülmesini devamlı surette yapmaya imkan yoktur. Normal olarak yanan kok üzerine, kısa bir süre buhar verildikten sonra, hava üfleyerek koku tekrar beyaz hale getirmek gerekir.

Bu proses sırasında kokun yeterli derecede sıcak olmaması halinde, su buharı etkisi altında; yine hidrojen gazı, fakat karbonmonoksitin yerine de karbondioksit oluşur. Bir maddesi yanıcı olmayan bu gaz karışımının ısı değerinin, su gazınıninkine kıyasla çok daha düşük olacağı tabidir.

Yanmış kömür veya kok tabakası içinden, aynı zamanda su buharı ve hava geçirildiği takdirde, jeneratör gazı ve su gazından oluşan ve karışım gazı adıyla anılan bir gaz elde edilmiş olur. Esas olarak; karbondioksit, karbonmonoksit, hidrojen ve azottan oluşan bu gazın,  $1300 \text{ kcal} / \text{Nm}^3$  civarında bulunan ısı değeri, pek tabii olarak

jeneratör gazınınkinin üstünde ve su gazınınkinin de altında bulunmaktadır. Bu gaz bazen yanlış olarak, jeneratör gazı diye de adlandırılmaktadır.

Kömür maden ocakları içinde oluşan ve patlaması bir felaket olan grizu gazı içinde, %57 ile %65 oranında metan gazı bulunur. Bu gazdan, gaz türbinli tesislerde yakıt olarak faydalanılması, Japonya'nın Osaka şehrinde kurulmuş olan bir tesiste, uygulama safhasına geçmiştir. Bu gazın yakıt olarak kullanılması halinde, gaz ve havadan meydana gelen karışımı, çok zengin olduğundan ve bu durumda ateş alma sınırının çok üzerinde bulunduğundan, gerek bir kompresörde sıkıştırılması, gerekse yanma odası brülörüne gönderilmesi, herhangi bir zorluk veya tehlike oluşturmaz [8].

Kömür maden ocaklarından emilen havanın içinde de, bir miktar metan gazı bulunur. Bu miktarın, %1 oranında olması durumu bile, türbin için gerekli sıcaklık düşüşünü temin için yeterli gelebilir. Yalnız bu derece fakir bir gazın yakılması çok zor olur. Çünkü bu takdirde yanma işleminin kendi kendine devam edebilmesi için gerekli sıcaklık değeri  $900^{\circ}C$  civarındadır. Bütün bu zorluklara rağmen, halen bu sahada da çalışmalar yapılmaktadır.

Gaz yakıtlardan; doğal gaz, boru şebekesinden bedeli ödenerek çekilmekte; yüksek fırın gazı demir izabesi sırasında, yan mahsul olarak meydana gelmekte; grizu gazı ise maden ocaklarında kendiliğinden oluşmaktadır. Bunlardan birincisini, gaz türbinli bir tesiste, ilave bir yatırım yapılmaksızın direkt olarak; ikincisini ve üçüncüsünü ise, sıkıştırma ve tozdan temizleme gibi bazı ön muamelelere tabi tuttuktan, yani nispeten ufak birer yatırım yaptıktan sonra kullanmak mümkündür.

Halbuki görülmüş olan diğer bütün gaz yakıtlarda, ilave bir tesis kurularak, bunun bilhassa salınımını sağlamak gerekmektedir. Bir ilave tesisin de, gaz türbinli tesisinin maliyetini yükselteceği tabiidir. Halbuki gaz türbinli bir tesis, termik verimi düşük olduğundan, ancak tesis maliyetinin düşüklüğü sayesinde, termik verim bakımından daha iyi durumda olan diğer ısı kuvvet makineleri karşısında durumunu koruyabilmektedir. Demek ki, normal olarak maliyeti yüksek olan bir gaz jeneratörü tesisi, bu durumu derhal gaz türbinli tesisin aleyhine olarak bozar. Bu durumda gaz türbinli bir tesis için, dışarıdan satın alındığı için ilave tesis masrafına ihtiyaç göstermeyen pahalı bir yakıtın kullanılması, nispeten büyük bir yatırım gerektiren, bunun sonucu olarak da daha ucuza mal olan bir yakıt kullanılmasına nazaran daha

uygun çıkmaktadır. Görüldüğü üzere burada seçilecek olan yolu, termik sebeplerden ziyade ekonomik olanlar belirlemektedir. Yoksa termik bakımdan bütün bu gaz yakıtları, gerekli proseslere tabi tuttuktan sonra, gaz türbinli tesislerde kullanmak mümkündür [8].

#### 4. ÇOK KRİSTALLİ SÜPER ALAŞIMLAR

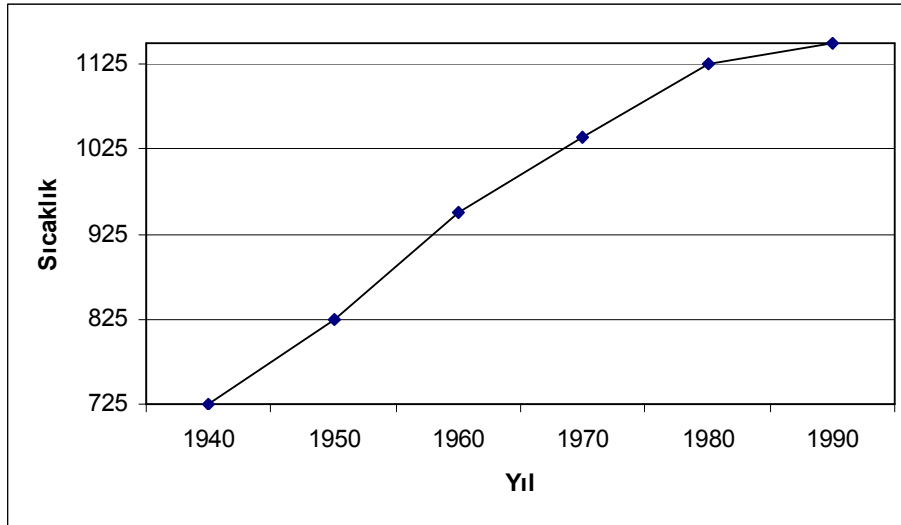
Süper alaşımlar nikel, demir-nikel grubu, ve kobalt esaslı malzemelerdir ve ergime sıcaklığının %85'inde mekanik özelliklerini muhafaza etmeleri mühendislik alanında geniş kullanım alanı bulmalarını sağlamaktadır. Genellikle 540 °C'nin üzerindeki sıcaklıklarda kullanılırlar. Süper alaşımlar ilk olarak uçak motor kompresörlerinde kullanılmışlar, son 50 yıllık dönemdeki gelişmeler sonucunda da gaz türbin motor teknolojisinde kullanılmıştır [9]. İlk döküm süperalaşımı A.B.D.'de, kobalt esaslı alaşımlarla yapılmıştır. 1942 yılında Döküm Vitalyum (Co-27Cr-5.5Mo-0.25C) turbo kompresör kanatlarında kullanılmak üzere Austenel Şirketi tarafından üretilmiştir. Bu sıralarda jet motorlarının ihtiyaç duyduğu mevcut östenitik çelikten daha yüksek sürünme özelliğine sahip levha ve mil malzemeleri süper alaşımlardan imal edilmiştir. Bu gelişme, Ni-Cr-Fe katı çözelti alaşımlarında dövme ile şekillendirmede karşılaşılan problemlerin üstesinden gelinmesini sağlamış ve 1945-1950 yılları arasında Amerika'da gaz türbini motoru üreticileri için hassas döküm parçaların üretimine hız kazandırmıştır [9].

Nikel esaslı ve nikel-demir esaslı süperalaşımlar yüksek sıcaklıklardaki yüksek mukavemet özelliğine bileşimlerinde bulunan  $\gamma'$  ( $Ni_3AlTi$ ) fazı sayesinde sahiptirler. Alüminyum ve titanyumun olumlu katkıları ile ilgili ilk çalışma 1926'da Heraeus Vacuumschmelze A.G. tarafından alınan bir patentte görülmüştür. Bu çalışmada 80Ni-20Cr sistemine %6 mertebelerinde Al ilave edilmesi ile gerilme mukavemetinde artış olduğu görülmüştür. Bu gelişmenin hemen ardından Fransız patent başvuru merkezine Nikel-Krom esaslı süperalaşımlarda çökeltme sertleştirilmesi ile ilgili başvurular yapılmıştır. 1929'da Amerika'da Philling ve Merika, alüminyum ve titanyum ilave edilmiş nikel esaslı alaşımlarda çökeltme sertleşmesi konulu bir dizi patent başvurusunda bulunmuşlardır. 1931 yılında ise İngiltere'de nikel esaslı alaşımlara alüminyum ve titanyum ilavesi konulu ilk patent başvuruları görülmüştür [9].

Ni esaslı süperalaşımların ticari üretimine ilk olarak İngiltere'de 1940'lı yılların başında başlanmıştır. Önce Nimonic 75, sonra da Nimonic 80 alaşımı geliştirilmiştir.

Nimonic 80 alaşımı yaşlanma ile sertleşebilir. Bu alaşımların %80 Ni ve %20 Cr şeklinde modifikasyonları vardır. Ayrıca  $\gamma'$  şökelmesini sağlamak için titanyum ve alüminyum ilavesi yapılır. Uçak motorlarında yüksek sıcaklıklarda çalışabilecek malzemelere duyulan ihtiyaç, Ni-Cr-Fe alaşımlarda dövme sırasında karşılaşılan problemler ve Amerika'da Kore savaşı sırasında oluşan kobalt sıkıntısı Ni esaslı süper alaşımlara yönelik çalışmaları hızlandırmıştır [9].

Ni esaslı süper alaşımların vakum indüksiyon ergitmesi (VIM) ve vakum hassas döküm yöntemleriyle artan üretimi, 1950'lerin sonlarında kobalt bazlı süper alaşımların yerini almalarını sağlamıştır. Bu gelişme Nikel esaslı süper alaşımların içerdikleri kararlı intermetalik  $\gamma'$  fazı sayesinde sahip oldukları olağanüstü mekanik özelliklerin bir sonucudur. Nikel esaslı alaşımlarla ilgili gelişmeler şekil 4.1'de görüldüğü gibi 1960'lı yıllarda hız kazanmıştır.



**şekil 4.1** : Süper alaşımların yıllara göre sıcaklık dayanımı artışı

Yeni polikristalin alaşımların gelişmesi 1970'ler süresince devam etmiştir. Fakat gelişmeler yavaşlamış, araştırmalar alaşım bileşiminden çok üretim proseslerine yönelmiştir. Özellikle tane oryantasyonu ve yönlendirerek katılaştırma konuları incelenmiştir. Uçak ve türbin kanatları üretimi teknolojisinde yönlendirerek katılaşma (DS) ve tane oryantasyonu konularında proses geliştirme çalışmalarına önem verilmiştir [9].

Türbin kanatları için yapılan direkt katılaştırma uygulamalarında, tüm tane sınırlarının aynı yönde oluşması sağlanmaktadır. Tane sınırları kanat boyunca istif

hatası eksenine paralel oluşturularak tane sınırlarının kesişmesi engellenmiştir. Türbin kanatlarında çalışma şartlarında oluşan stres, istif hataları boyunca kesişen tane sınırlarında çatlak yolu oluşumunu tetikler. Bu çatlak yollarının durdurulması malzemede elastik gerilmenin artmasını sağlamıştır. Bu da nikel esaslı alaşımların gelişmesine olanak sağlamıştır [9]. 1970'li ve 80'li yıllar süresince, nikel esaslı alaşımların dizaynında özellikle yönlendirerek katılaştırma ve tek kristal döküm yöntemleri konusunda önemli gelişmeler kaydedilmiştir [9].

#### 4.1. Nikel Esaslı Süper Alaşım Dizaynı

Nikel esaslı süperalaşımların mikro yapısı, östenitik yüzey merkezli kübik (YMK) matris ( $\gamma$ ) içerisinde dağılmış matriksle koherant bağlanmış intermetalik yüzey merkezli kübik (YMK) ( $\gamma'$ )  $Ni_3(Al, Ti)$  çökeltisi ve tane sınırları boyunca toplanmış karbürler, borürler ve diğer fazlardan oluşur. Bu karmaşık alaşımlar genel olarak 10'dan daha fazla alaşım elementi içerirler. Günümüzde gaz türbin motorlarında kullanılan ticari alaşımlarda karbon, boron, zirkonyum, hafniyum, kobalt, krom, alüminyum, titanyum, vanadyum, molibden, tungsten, niobyum, tantal ve renyumun çeşitli kombinasyonları kullanılmaktadır [9].

Bazı alaşım elementleri tek bir önemli fonksiyona sahipken, bazıları karmaşık fonksiyonlara sahiptir. Örneğin krom, nikel esaslı alaşımlara sülfürleşme direnci için ilave edilerek korozyon direncini artırırken, alüminyumun yapıda bulunması hem  $\gamma'$  oluşturmaya hem de oksidasyon direncini artırmaya yarar [9].

Titanyum ise  $\gamma'$  oluşumuna katkı sağladığı gibi birincil karbür (MC) oluşumunu sağlar. Bununla birlikte sıkı paket hegzagonal SPH ( $\eta$ ) eta fazı ve istenmeyen nitrat ve karbosülfür oluşturur. Molibden, tungsten, tantal, renyum, kobalt ve krom ilaveleri, katı çözeltili mukavemetini yükseltir fakat tantal, tungsten ve renyum çeşitli derecelerde  $\gamma'$  oluşumuna yardımcı olur. Ayrıca tantal ve renyum, mukavemet artırıcı etkilerinden dolayı ilave edilir [9].

Karbon, bor ve zirkonyum süper alaşımın tane sınırlarının mukavemetini artırmak için ilave edilir. Bununla beraber, kaynak yapılan alaşımlarda minimize edilmiştir. Çünkü kaynak dikişlerinde ve ana malzemenin sıcak zonunda kırılma eğilimini



arttırır. Vanadyum'un  $\gamma'$  içeriğinde yer aldığı görülür. Aynı zamanda  $M_3B_2$  tipi borürlerin oluşumunu artırır.

Niobiyum intermetalik ( $\delta$ ) delta (ortorombik  $Ni_3Nb$ ) bunun yanında lave ( $Fe, Ni_2Nb$ ) fazının karbürler, borürler ve nitratların oluşumunda da rol oynar. Hafniyum kuvvetli bir karbür yapıcıdır, tane sınırları sünekliğini geliştirmek için polikristalin alaşımlara ilave edilir. Bununla beraber  $\gamma/\gamma'$ , ötekiğinin hacimsel oranını artırarak oksidasyon direncini de arttırır [9].

Bu bileşenlerin tümü yüksek gerilme, sürünme ve yorulma dayanımı, artı oksidasyon ve korozyon direnci sağlamak için çeşitli şekilllerde kullanılırlar. Döküm mikro yapısının uygun kontrolü ve sonraki solüsyona alma ve yaşlandırma işlemleri, genel olarak iyi bir bileşim performansı ile sonuçlanmıştır [9].

Süperalaşım kullanılarak imal edilen makina parçalarının çok yüksek sıcaklık / gerilme koşulları altında, mikroyapı özellikleri değişmektedir. Bu mikroyapı değişiklikleri şu şekilde sıralanabilir :

İntermetalik faz çökmesi ( $\sigma$ ,  $\mu$ , Laves),

Fazların dekompozisyonu (ayrışması) (karbürler, borürler, nitürler),

Fazların birleşme ve büyümesi ( $\gamma'$ ),

Fazların solüsyona alınıp tekrar çökmesi ( $\gamma'$ ),

Düzenli – düzensiz yapı geçişi,

Malzeme oksidasyonu,

Gerilmeli korozyon çatlama.

Topolojik olarak sıkı paket fazların ( $\sigma$ ,  $\mu$  ve bunlar gibi) oluşumu genel olarak kırılma tokluğunu düşürür. Bu fazların oluşumu, alaşım bileşiminin kontrol altında tutulması ile optimize edilir. Fazların oluşumu bileşimde bulunan elementlerin elektron boşluk numarasına ( $N_V$ ) bakılarak tahmin edilebilir. Her ne kadar farklı hesaplama metodları olsa da, uygun referans noktaları bilindiği zaman,  $\sigma$  oluşumunun tahmini kolaylıkla sağlanır [9].

Karbür çökmesi hem katılma hem de ısı işlem süreçlerinde oluşur. Ancak, tane sınırlarında biriken karbürlerin miktar ve morfolojisi genellikle ısı işlem sırasında

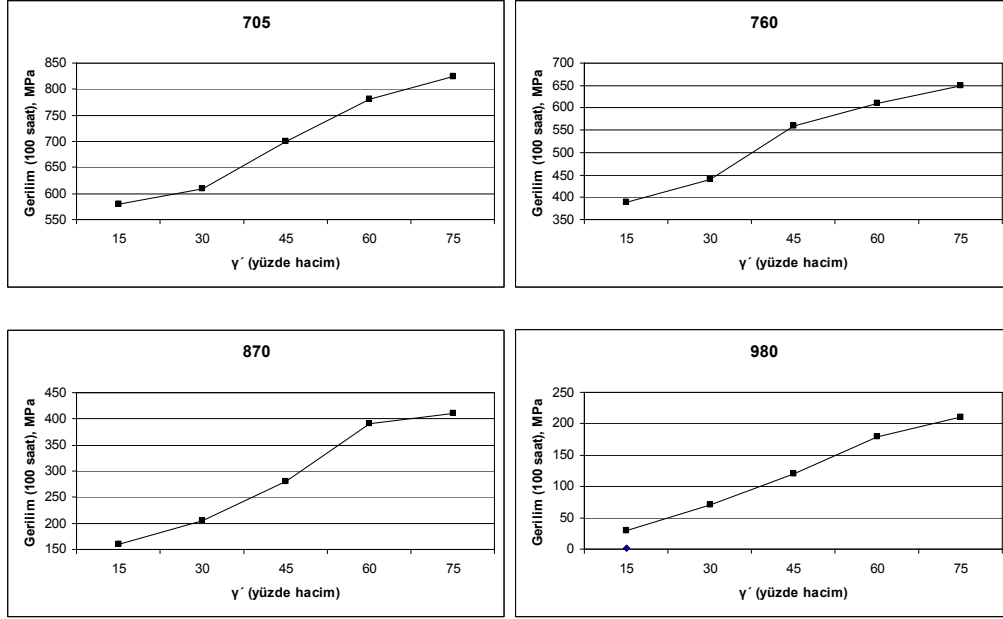
optimize edilir. Süreksiz, set halinde  $M_{23}C_6$  partiküllerinin yapıda yayılmış halde bulunması tercih edilir. Yüksek sıcaklık ve gerilmeler altında çalışan malzemelerde oluşan karbür bozunumu tane sınırlarının aşırı yüklenmesine, dolayısıyla kopma mukavemetinde düşmeye neden olur [9].

MC tipi karbürler genel olarak, alaşımın katılaşması sırasında meydana gelir. Bu karbürler titanyumca zengin (MC – 1) veya tantalca zengin olabilirler (MC – 2). Yüksek sıcaklıkta bozularak hafniyumca zengin karbür (MC – 3),  $M_{23}C_6$ ,  $M_7C_3$  ve  $M_6C$  karbürlerinin (ikincil karbürler) oluşumuna neden olurlar. Oluşacak karbürün tipi alaşımın kimyasına ve sıcaklığa bağlıdır. Kromca zengin  $M_{23}C_6$  genel olarak, polikristalin metallerde tane sınırlarında oluşur.  $M_{23}C_6$  partikülleri süreksiz olduğunda, tane sınırları arasında mukavemet ve kırılma tokluğu sağlayarak makina parçasının servis süresinin uzamasını sağlar [9].

Diğer taraftan karbür bozunumu katı çözelti matrisi içinde, titanyum ve tantalın serbest kalmasına neden olarak, matrisin aşırı doymasına neden olabilir. Aşırı doyma, istenmeyen  $\mu$  (tungsten ve molibdenca zengin),  $\alpha - W$ ,  $\alpha - Cr$  veya  $M_6C$  karbürleri gibi ikincil fazların oluşumuyla sonuçlanabilir. Uygun bir alaşım ortaya çıkarabilmek için, kimyasal dengeleme ve kontrol gereklidir.

Süper alaşımlar oldukça karmaşıktır. Bununla beraber, alaşım dizayn ve prosesinde dikkatli olmak, arzu edilen sonuçları sağlayacaktır. Basitçe durum şudur; uygun süper alaşım eldesi, prensip olarak,  $\gamma'$  morfolojisi ve miktarı, tane boyutu, şekil ve karbür dağılımının bir fonksiyonudur. İlk süper alaşımlar hacimce %25'den daha az  $\gamma'$  içermektedirler. Bununla birlikte, vakum indüksiyon rafinasyonu ve dökümü,  $\gamma'$ 'nin hacim oranının arttırılabilmesini sağlamışlardır. Günümüzde ticari süperalaşımlar, yaklaşık %60  $\gamma'$  içerirler [9,13].  $\gamma'$  seviyesindeki bu artışın, alaşımın sürünme mukavemetinin artmasını sağladığı Şekil 4.2' de gösterilmiştir. Tamamı  $\gamma'$  fazından oluşan makina parçaları ise ancak en yeni üretim yöntemi olan tek kristal üretim tekniğiyle imal edilebilmektedir. Polikristalin süperalaşım makina parçalarının yüksek sıcaklık mukavemeti, tane sınırlarının durumundan ve özellikle de, tane sınırlarındaki karbür morfolojisi ve dağılımından etkilenir. Malzemenin mekanik özelliklerinin optimize edilmesi, solüsyona alma ve yaşlandırma işlemlerinin tane sınırları boyunca küresel karbür partikülleri oluşumu sağlayacak

şekilde yapılmasıyla birlikte,  $\gamma'$  hacim oranı ve morfolojisinin uygunluğuna ve makina parçasının genel tane yapısına bağlıdır [9]. Tablo 4.1'de bazı Ni esaslı süper alaşımların gerilme kopma mukavemetleri görülmektedir.



Şekil 4.2 :  $\gamma'$  Hacim Yüzdesi ile Gerilme Dayanımı Değişimi

Tablo 4.1 : Bazı Nikel Esaslı Süper Alaşımların Gerilme Dayanımları

	815 °C		870 °C		980 °C	
	100 saat MPa	1000 saat MPa	100 saat MPa	1000 saat MPa	100 saat MPa	1000 saat MPa
IN-713 LC	425	325	295	240	140	105
IN-738 LC	430	315	295	215	140	90
MAR-M 246	525	435	440	290	195	125
Rene 77 (a)	-	-	310	215	130	62
IN-792 (a)	515	380	365	260	165	105
GMR-235 (b)	-	-	-	180	-	75
Rene 125 Hf (MM 005) (b)	-	-	-	305	-	115

## 4.2. Nikel Esaslı Süper Alaşımların Ergitme ve Dökümü

### 4.2.1 Vakum İndüksiyon Ergitmesi

Ticari vakum endüksiyon ergitmesi, 1950'lerin başlarında gelişmeye başlamıştır. Süper alaşım üretmek için reaktif elementlerden arınmış bir ortam gerekmektedir. Vakum ortamı bundan dolayı idealdir. Vakum indüksiyon ergitmesi (VIM) diğer proseslere oranla daha esneklerdir. Zaman, sıcaklık, ve basınç birbirlerinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Alaşım kompozisyonu ve homojenlik açısından, diğer vakum ergitme proseslerinden daha iyi kontrol sağlamaktadır [9].

Birincil arıtma karbon ile oksijenin reaksiyonu sonucu oluşan karbonmonoksit ( $CO$ ) ile oksijenin sıvı metalden çekilmesinin sağlanmasıdır. Bu reaksiyon; pota geometrisi ve sıvı hareketinden etkilenmiş olan reaksiyon kinetiği ile sıvı yüzeyinde ya da yakınlarında meydana gelir. Oksijenin ergimiş metalden karbonmonoksit şeklinde uzaklaştırılmasının teşvik edilmesi için pota basıncının düşürülmesi karbon aktivitesinin artması sağlanır [9].

Ergitmenin yapıldığı pota malzemeleri inert olmadığından, kullanılan refrakterin tipine bağlı olarak oksijen ve diğer empüriterler için bir kaynaktır. Bu yüzden sıvı rafinasyon sıcaklığı ve rafinasyon süresi değerlerinin her ikisi de dikkatle gözden geçirilmelidir. Deoksidasyon prosesini tamamlamak için, sıvı metalin uygun hızda hareket ettirilmesi gereklidir. Bunun için fırın güç frekansının en uygun seviyesi belirlenmelidir ve refrakterin erozyonunu engellemek için en uygun seviye uygulanmalıdır.

Vakum endüksiyon ergitmesi deoksidasyonu sırasında, karbonmonoksit gazı karbonmonoksit gaz kabarcıkları halinde heterojen bir şekilde duvarlar boyunca ve bazen de tabanda, sıvı-refrakter arayüzeyinde çekirdeklenir. Bu çekirdeklenmenin refrakter yüzeyinde bulunan küçük çatlaklarda oluşması ve sıvı metalden sıvı metal-vakum arayüzeyine doğru büyüyerek hareket etmesi tercih edilir. Gerçekte kabarcık oluşumu; gaz moleküllerinin o anki sayısına, kabarcığın bulunduğu seviyede sıvının basıncına, gazın sıcaklığına ve çok küçük kabarcıklar için gaz – sıvı metal arasındaki arayüzey gerilimine bağlıdır [9].

Kabarcık oluşumunu takiben kabarcığın büyümesi ve sıvıdan sıvı-vakum arayüzeyine geçişi şu faktörlere bağlıdır :

Çözülen gazın miktarı,

Kabarcık üzerindeki basıncın sıvı içerisinde yükseldikçe düşmesi,

Banyo sıcaklığı,

Kabarcıkların sıvıdan yüzeye doğru yükselmesi için gereken zaman (Sıvının karıştırılma hızına bağlıdır.)

Sıvı üzerindeki basınç,

Kabarcık ve sıvı – metal arasındaki arayüzey gerilimi.

Karbonmonoksit çıkışı sırasında az miktarda azotun da kabarcıklarla birlikte yüzeye süpürüldüğü tespit edilmiştir. Aynı zamanda karbonmonoksitin aşırı doyurulması safhasında  $SO_2$  buharlaşması yoluyla az miktarda bir kükürt salınımı da meydana gelir. Kurşun, bizmut, gümüş, selenyum ve tellür gibi istenmeyen elementler, buharlaşarak yapıdan uzaklaştırılmış olur. Arsenik ve kalay gibi bazı istenmeyen elementler ise vakum rafinasyonu sırasında giderilemediği için, ham madde seçimi sırasında kontrol edilmiş olmalıdır.

Süper alaşım ergitmesi genel olarak, reaktif olmayan, yüksek bağ kuvvetine sahip ve yüksek saflıktaki  $MgO - Al_2O_3$  refrakterlerle yapılır. Rekrakterler monolitik veya tuğla formunda olabilir [9].

Ham maddenin tipi ve ergitme prosedürleri, üretilecek olan alaşımın kalitesine bağlı olarak değişir. Alaşımın kalitesi uygulama alanlarına göre seçilir. Kritik alanlarda kullanılacak alaşımlar, en yüksek kalitedeki ham madde kullanılarak ve en modern döküm teknikleri kullanılarak dökülürler.  $GMR - 235$  veya  $IN - 713C$  gibi nispeten düşük kaliteli hammaddeler ise sabit, kritik olmayan parçaların dökümünde kullanılabilir. Örneğin turbo kompresörlerin tekerleklerinde yüksek kaliteli alaşım kullanımı gereksizdir.

Şarj malzemeleri önceden ısıtılmış fırına ergime sıcaklıkları göz önüne alınarak sırayla yerleştirilir. İlk şarjda sadece kolaylıkla indirgenecek olan oksit malzemeler ile birlikte kontrollü olarak az miktarda karbon verilir. Bu ilk şarja azota afinitesi olan elementler konmaz ve böylece çözülmüş durumdaki azotun aktivitesi engellenmemiş olur. Fırının vakum şartlarına getirilmesi ve refrakterde herhangi bir çatlak olmadığından emin olunduktan sonra sıcaklık ve fırın basıncının optimize edilmesiyle karbonmonoksit buharlaştırma işlemi başlatılır. Fırında rafinasyon işlemi

sistem denge şartlarına ulaşıncaya kadar devam eder ki bu denge şartlarına ulaşılması ancak vakum fırınının tam sızdırmazlığının sağlanmasıyla olur. Bu noktada oksijen ilgileri fazla olduğu için başta şarja eklenmeyen alüminyum, titanyum, zirkonyum ve hafniyum gibi elementler fırın şarjına homojen bir şekilde ilave edilir [9].

Döküm başladığı sırada artık ergimiş alaşımın homojen bir yapıda ve uygun kimyasal bileşime gelmiş olmasına dikkat edilir. Bunun için döküm başlamadan önce kimyasal analiz yapılır. Bununla birlikte uygun döküm sıcaklığı sağlanmış olmalıdır. Bu işlem, genel olarak yüksek vakum koşulları altında yapılır ve fırın potasından çok bölmeli bir tandişe doğru akış sağlanır. Böylece flotasyon için yeterli zaman kazanılmış olur. Bu laminar akış yüksek aluminalı tandiş kompartmanlarına doğru devam ederken akış hızı kontrol edilir ve dökümün temizliği maksimum seviyede tutulmuş olur.

Döküm temizliğinde en önemli safhalardan biri, sıvı metalin dökümüdür. Sıvı içerisinde bulunan görece daha büyük taneli metalik safsızlıkları almak için, seramik köpük filtreler kullanılır. Filtre performansı, düşük mekanik gerilme veya termal şok rezistansa sahip filtre kullanımı halinde düşer. Filtre parçacıklarının koparak ergimiş metale karışması ve bunun farkedilmemesi/engellenememesi, alaşımın içerisinde kalarak hatalı döküm yapılmasına neden olabilir [9].

**Tablo 4.2 : Bazı döküm nikel esaslı süper alaşımları fiziksel özellikleri**

	Yoğunluk g/cm <sup>3</sup>	Ergime Aralığı °C	Isı İletimi			Termal Genleşme Katsayısı 10 <sup>-6</sup> /K(a)		
			93 °C W/mK	538 °C W/mK	1093 °C W/mK	93 °C	538 °C	1093 °C
IN-713 LC	8,00	1290-1320	10,7	16,7	25,3	10,1	15,8	18,9
IN-738	8,11	1230-1315	-	17,7	27,2	11,6	14,0	-
MAR-M 247	8,53	-	-	-	-	-	-	-
Nimocast 263	8,36	1300-1355	-	-	-	11,0	13,6	-
Rene 77	7,91	-	-	-	-	-	-	-
Udimet 500	8,02	1300-1395	-	-	-	13,3	-	-

#### 4.2.2 Vakum Hassas Döküm

Döküm yöntemleri içerisinde vakum hassas döküm günümüzde en yaygın süper alaşım imalat yöntemidir. Hassas döküm ile her çeşit parça dökülebilir. Süper alaşımların karmaşık şekillerde üretilip, yüksek sıcaklık dayanım ve yüksek mekanik mukavemet özelliklerini koruyabilmek için hassas döküm ideal bir metoddur [9].

Döküm süper alaşımlar, dövülebilir alaşımlardan daha geniş bir bileşim aralığında üretilirler. Herhangi bir süper alaşım kompozisyonunun sürünme, kırılma özellikleri, döküm işlemi ve ısı işlem sırasında ideal şartlara getirilir. Polikristalin malzemelerin süneklik ve yorulma özellikleri, genel olarak aynı bileşimdeki dövme ile şekillendirilmiş malzemelerden daha düşüktür. Aradaki farkın azaltılması için teknolojik gelişmeler yardımıyla döküm hatalarının minimize edilmesi ve tane boyutunun düşürülmesine yönelik çalışmalar devam etmektedir [9].

Hassas döküm prosesinde ilk adım mumdan, plastikten veya mum-plastik karışımı malzemelerden, dökülecek parçanın birebir kalıbını üretmektir. Kalıp boyutları, döküm sırasında beklenen metal büzülmesi için ayarlanmış olmalıdır. Nihai üründe iç boşluklar bulunuyorsa kalıbın içine bunu sağlayacak şekilde en ince ayrıntısına seramik nüveler yerleştirilir. Karmaşık ve büyük dökümler hariç, kalıplar, sıvı metal akışı düzenli olacak şekilde salkımlar halinde yerleştirilebilirler. Yolluk ve çıkıcıların dizayn ve pozisyonu, metalurjik açıdan kabul edilebilir dökümler elde etmek için son derece önemlidir.

Günümüz kalıplarında modeller ilk önce seramik çamura daldırılarak üretilir. Daldırmanın ardından kalıbın sertleşmesi için tanecik yapılı, kuru seramik çamurla derhal kaplanır. Bu adımlar sağlam bir kalıp oluşturmak için birkaç kez tekrar edilir. Bunların ardından kalıp kurutulur. Tamamen kuruduktan sonra ve mum, kalıp içinden eritilerek çıkarılır. Kalıp döküm yapılacak sertliğe gelinceye kadar pişirilir. Katılaşma kontrolü ve döküm sırasında ısı kaybını minimuma indirmek için kalıp, şekline uygun bir izolasyon malzemesine sarılır [9].

Eş eksenli taneli dökümler yapabilmek için kalıbın tam doldurulabilmesi gerekir. Bunu sağlamak için kalıp önceden ısıtılır. Böylece katılaşma kontrol edilir ve uygun mikroyapı elde edilir. Vakum ortamında döküm için alaşım şarjı, ön ısıtılma yapılmış kalıba doldurulmadan önce, izole edilmiş bir oda içerisinde ertilir. Basınç, döküm

için yaklaşık 1  $\mu m$  'de kontrol edilir. Dökümden sonra ekzotermik reaksiyon veren malzemeler, üstten ilave edilirler. Daha sonra kalıp soğumaya bırakılır [9].

Süper alaşımlar oksidasyon, reaktif elementler ve bunların zararlı etkilerinden kaçınmak için çoğunlukla vakum altında dökülürler. Eş eksenli taneli alaşımlar üretilen vakum dökümleri, genellikle iki odadan oluşan fırınlarda yapılır. Her ikisi de vakum altında tutulan bu odalar büyük bir kapı veya vana tarafından ayrılmıştır. Üst taraftaki bölme, alaşımın indüksiyonla ergitildiği bir seramik pota içerir. Genellikle zirkon potalar kullanılır. Alaşımın temizliğinin çok önemli olduğu durumlarda tek kullanımlık silika refrakterler kullanılır.

Tartılarak miktarı ayarlanmış şarj, önceden saptanan sıcaklığa hızlı bir şekilde getirilir. Bu sıcaklık genellikle 85 ile 165 °C arasındadır. Bu sıcaklığın kesin olarak ölçülebilmesi çok önemlidir. Döküm esnasındaki metal sıcaklığı, tane yönelmesi ve tane boyutunun kontrolü için çok önemlidir. Aynı zamanda, mikro çekilme miktarını ve bölgelerini etkiler. Kalıp, döküm pozisyonuna getirilmeden önce ısıtılmalıdır ve ergimiş süper alaşım, yolluktan içeri hızlı bir şekilde dökülmelidir.

Döküm sırasında kalıbın pozisyonu ve döküm hızı döküm kalitesi açısından çok önemlidir. Tekrarlanabilir bir döküm kalitesi için, ergitme ve döküm, kapalı devre ve programlanabilir fırınlarda otomatik olarak yapılır. Doldurulan kalıp fırından çıkarılır ve yerine diğer kalıp geçer. Bu şekilde döküm işlemi otomatik kontrollü olarak devam eder [9].

Katılaşma sırasındaki büzülme, kalıba ergimiş metal beslenerek minimum hale getirilmelidir. Bu, malzeme fırından kalıba alındıktan sonra, derhal ekzotermik bir malzeme ilave edilerek sağlanabilir[9]. Termal genleşmeleri farklı olduğundan, kabuk kalıp genellikle soğuma esnasında kırılır. Bu kırılma kalıp parçalarının hidrolik ve mekanik yöntemlerle alınmasını kolaylaştırır. Kuşlama operasyonundan önce, döküm parçalar kesilerek salkımdan ayrılır. Kalıptan ayrılan parçaların bileşimi ve yapısı kontrol edilerek alaşımın kalitesi onaylanır [9].

Döküm maliyetini oluşturan en önemli aşamalardan biri bitirme işlemleridir. Gözle görünür yüzey hataları aşındırma teknikleriyle giderilir. Döküm parçaların ebat uygunluklarının sağlanması için, ısı işlem öncesi ve sonrası tesviye ve doğrultma işlemleri gerekli olabilir. Süper alaşım döküm parçaların katılaşması çok hassas bir şekilde kontrol edilmelidir. Nihai ürünün mekanik özellikleri büyük oranda bu



aşamaya bağlıdır. Örneğin, belli bir parça için bir kez proses belirlendikten sonra proses parametrelerinden sapılmaması gerekir. Eğer bu parametreler değiştirilirse, değişikliklerin parça bileşim ve özelliklerinde olumsuz etkisi olmadığından emin olunmalıdır [9].

Hassas dökümle üretilmiş süper alaşımların mikroyapılarında en sık rastlanan yapı dendritlerdir. Birincil ve ikincil dendrit kolları arasındaki boşluk soğuma hızı ile kontrol edilebilir. Bu boşluklar azaltıldıkça, dendrit merkezindeki ve dendritler arası bölgedeki uzaklık da azaltılabilir. Bu durum mekanik özellikler açısından yararlıdır.

Geleneksel, eş eksenli nikel esaslı süper alaşımlar, tipik olarak ağırlıkça %0,05 ile %0,20 arasında karbon içerirler. Kobalt esaslı alaşımlar ise yaklaşık %1 oranında karbon içerirler. Her iki alaşım sisteminde de karbonun yapıdaki varlığı tane sınırı mukavemetini artırır. Karbür morfolojisi katılaşma veya bileşimle kontrol edilir. Örneğin, soğuma hızının artmasıyla *IN-713C*'de daha süreksiz, blok tipi *MC* karbürleri oluşur ve bu, düşük çevrimli yorulma direncini en az iki kat iyileştirir. Eğer bir döküm parçasının soğuma hızı yeterli derecede kontrol edilemiyorsa, az miktarlarda magnezyum, kalsiyum, seryum veya diğer nadir toprak metaller ilave ederek, çekirdeklenme tetiklenebilir ve karbon şeklinin kontrol edilmesi sağlanabilir.

Katılaşmanın doğası gereği döküm içerisinde segregasyonlar oluşur. Döküm süper alaşım yapısında önemli segregantlar ötektiklerdir. Bunlar özellikle dendritler arası veya taneler arası bölgelerde çokça bulunurlar. Nikel esaslı alaşımlarda ötektik havuzları, en son katılaşan bölgelerdir ve gözenekli bir görünüme sahiptirler. Ötektik havuzlarının kompozisyonları çeşitlidir. Fakat tipik olarak artık  $\gamma'$ , karbürler, borürler ve düşük ergime noktalı fazlar içerirler. Ötektik havuzunun kontrolü öncelikle bileşim kontrolü ile yapılır. Bununla beraber ötektik kalıntı miktarının hacim oranı *IN-713*'de yaklaşık olarak %0,1 iken Ötektik havuzunun boyutu soğutma hızının  $0,56 \text{ } ^\circ\text{C/sn}$ 'den  $0,036 \text{ } ^\circ\text{C/sn}$ 'ye düşmesiyle  $11 \text{ } \mu\text{m}$ 'den  $19 \text{ } \mu\text{m}$ 'ye yükseldiği görülmüştür [9].

Dökümlerde poroziteyi azaltmak önemlidir. Çünkü bu boşluklar, kırılmalar ve özellikle yorulma çatlakları için başlangıç noktası teşkil ederler. Süperalaşım hassas dökümlerinde, porozitenin üç kaynağı vardır: Çözülmemiş gazlar, dendritler arasında yetersiz besleme sebebiyle oluşan mikro çekilme boşlukları ve yanlış yolluk kullanımı sebebiyle oluşan makro çekilme boşlukları. Çözülmemiş gazlar çözüldükten

gelen gazlardır fakat günümüzde vakum teknolojisi kullanıldığından bu sorun nadiren oluşmaktadır. Oluşan gazlar genellikle oksijen, azot ve hidrojenidir. Bu gazlar dendrit kol boşluklarının iki katı çapa kadar küresel boşlukların oluşumuna neden olabilirler. Gaz porozitesi, ergitme ve döküm sırasında vakum kullanılmasıyla ortadan kaldırılabılır.

Mikro çekilme porozitesi dendritik yapıda katılaşılan dökümlerde sık karşılaşılan bir sorundur. Bu boşluklar küreseldir fakat tipik olarak dendrit boşluklarından daha az bir çapa sahiptirler. Mikro porozite katılma sınırının ilerlemesi sırasında sıvı metalin önünün ikincil dendrit kolları tarafından kesilmesi sonucu oluşur [9].

Katılma çekilmesi (makro çekilme) süper alaşım dökümlerde katılma sırasında %2 ile %6 oranında büzülme oluşması problemidir. Döküm parçasının en son katılaşılan bölgesi en kalın yeri olduğundan, bu tip poroziteye meyillidir.

Döküm sırasında en son katılaşılan bu alanların katılma çekilmesi, besleme ya da çıkıcılarla kontrol edilebilir. Kompleks geometriler ve karışık şekilli dökümler üretmek istendiğinde, deneyimlere dayanarak çıkıcı boyutu ve yeri saptanır. Bunun için proses tanımlanmadan önce deneyler yapılır. Bilgisayar ile modelleme yapılması bu durumu değiştirmektedir. Günümüzde kalıp ve metalin termal özellikleri göz önüne alınarak, basit dökümlerde katılma prosesi modellenmesi mümkün olabilmektedir. Böylece, katılma sırasında oluşabilecek boşluklar önceden tahmin edilebilmektedir. Bu boşluk alanlar, çeşitli yolluk düzenlemeleri ile boşluk kısımlarına çıkıcı koyularak doldurulur. Bu noktada modelin, deneysel bir çalışmayla sağlanması yapılır. Bu uygulama çıkıcı ve yolluk yerlerinin belirlenmesi için gereken zamanı oldukça azaltmıştır.

Tane boyutu kontrolü, mekanik ve fiziksel özelliklerin iyileştirilmesi açısından önemli bir yere sahiptir. Genel olarak herhangi bir kesitteki, eş eksenli tanelerin aynı özellikleri göstermesi istenir. Fakat ince kesitlerde bunu sağlamak bir hayli zordur. Bu durumu sağlamak için, kalıp ve metal sıcaklığı ve diğer parametreler tane çekirdeklenmesi ve katılmasını hızlandıracak şekilde seçilmelidir[9].

İnce tane boyutu genel olarak, düşük ve orta sıcaklıklarda gerilme, sürünme ve kırılma özelliklerini geliştirir. Hızlı katılma ile elde edilebilen ince tane boyutu blok tip karbür partikülleri oluşumunu ve  $\gamma'$  partiküllerinin daha iyi dağılımını sağlar.

Yüksek sıcaklıkta kırılma performansı için daha yavaş katılma ve soğuma hızı tercih edilmesi ile hem tane boyutu hem de  $\gamma'$  çökeltileri irileşir. Bu durum yüksek sıcaklık mukavemetine olumlu yönde etki eder. Türbin kanatçıkları dökümünde istenen mikro yapı özelliklerini yakalamak zordur. Çünkü kanatçığın nispeten ince üst kısmı çok yüksek sıcaklıklarda çalışır ve iri taneli olması gerekirken, kök kısmı dediğimiz uca oranla çok daha kalın olan alt kısımda ince taneli yapıya ihtiyaç vardır.

Dökümcülükte en önemli ilerlemelerden birisi ince taneli süper alaşım dökümler üretmek için proseslerin geliştirilmesi olmuştur. İncelemeler sonucunda 1960'ların sonlarında, türbin milleri için bir tane rafinasyonu tekniği geliştirilmiştir. Bu teknik ile mekanik bir kalıbın hareketinden yararlanılarak katılma sırasında metallerde dendrit yapı oluşumu azaltılır. Dendritler, ilave taneler için çekirdeklenme odağı oluştururlar. Bununla birlikte bu proses, ticari olarak uygulanamamıştır. Çünkü dökümler, kabul edilemeyecek derecede poroziteli üretilebilmiştir.

1970'lerin ortalarında bu proses üzerindeki geliştirme çalışmaları, sıcak izostatik pres (HIP) kullanımının döküm porozitesini düşürdüğüne farkına varılmasıyla, yeniden hız kazanmıştır. Bu dönemde Howmet firmasının çalışmaları ile yeni prosesler geliştirildi. Grainex adıyla bilinen bu proseslerden bir tanesi ile ASTM standartlarına göre tane boyutu no 2'ye kadar düşüldü. Howmet firmasının geliştirdiği bir başka proses olan mikro cast X prosesi ile de ASTM no 3-5 aralığında tane boyutunda döküm gerçekleştirilebilmiştir [9].

#### **4.2.3 Nikel Esaslı Süper Alaşımların Isıl İşlemi**

1960'ların ortalarına kadar döküm süperalaşımların ısıl işlemi yapılmıyordu. Kabuk kalıplar kullanılmadan önce kalın duvarlı, hassas döküm kalıplar kullanılıyor ve soğuma hızı düşük oluyordu. Bu durum döküm parçasının soğuması sırasında yaşlanmaya neden oluyordu. Kabuk kalıbın gelişimi ile soğuma hızı artmış, yaşlanma daha çok kesit kalınlığı ve döküm parametrelerine bağlı hale gelmiştir. Bu parametreler  $\gamma'$  yapıcı ilaveler ile birleşince ısıl işlem ile malzeme özelliklerini iyileştirmek daha kolay hale gelmiştir. Buna ilave olarak ısıl işlemin sıcak izostatik pres ile birlikte uygulanması malzeme özelliklerini iyileştirmektedir [9].

Süper alaşımlara uygulanan ısıl işlemler genel olarak, homojenizasyon, solüsyona alma ısıl işlemi veya yaşlandırma işlemleridir. Döküm, kaynak ve talaş kaldırma

işlemleri nedeniyle oluşan kalıntı gerilimin giderilmesi için gerilim giderme tavlama ve yaşlandırma ısıl işlemleri de uygulanabilir.

Nikel esaslı süperalaşımların ısıl işlemi mutlaka vakum veya inert gaz ortamında yapılmalıdır. Bazı nikel esaslı polikristalin döküm süperalaşımlara solüsyona alma işlemi uygulanmayabilir. Çünkü bu alaşımlar  $\gamma'$  çökmesine farklı tepkiler verebilirler. Bazılarına sadece yaşlandırma işlemi yapılabilir. Bazı alaşımlar ise kısmen solüsyona almaya uygundur. Bu uygulamada alaşım, ergime başlangıç noktasının altında güvenli bir sıcaklıkta, 2 ile 6 saat arasında tutulur. İnce tane boyutlu ve mekanik özelliklere olumlu katkıları bulunan  $\gamma'$  oluşturmak için, yüksek sıcaklıktan hızlı soğutma yapılmalıdır [9]. Çözeltiye alma ısıl işlemleri, karbon morfolojisini stabilize etmek için optimize edilmelidir. Yüksek sıcaklık uygulanması, fazla miktarda karbür bozunumuna neden olabilir ki bunun sonucunda tane sınırlarında aşırı karbür birikerek mekanik özellikler olumsuz etkilenebilir. Polikristalin malzemeler çoğunlukla, döküm sonrası yaşlandırma ısıl işlemleriyle kullanım şartlarına hazır hale getirilir [9].

Tipik bir yaşlandırma işleminde malzeme, 980 °C 'ye ısıtılır ve bu sıcaklıkta 5 saat tutulur. Hava ile hızlı soğutulduktan sonra, 870 °C 'ye ısıtılıp, 20 saat bu sıcaklıkta tutulur ve soğumaya bırakılır. Alternatif bir yöntem olarak; malzeme 1080 °C 'ye kadar ısıtılıp bu sıcaklıkta 4 saat tutulur ve hava ile hızlı soğutulur. , 870 °C 'ye ısıtılıp, 20 saat bu sıcaklıkta tutulur ve yine soğumaya bırakılır. 980 °C ve 1080 °C sıcaklıklarda yapılan ısıl işlemler sırasında malzeme üzerindeki koruyucu kaplamanın difüzyonu da gerçekleşir. Malzemeyi 980 °C ve 1080 °C 'den soğutma hızları  $\gamma'$ 'nin boyut optimizasyonu açısından önemlidir. Bununla birlikte, 870 °C 'den soğutma işleminde hızlı soğutma yapma gerekliliği yoktur [9].

Sıcak izostatik presleme (HIP) işleminde döküm parçalar otoklav içerisinde hem yüksek sıcaklıklara hem de yüksek gaz basıncına maruz bırakılırlar. Basınç sağlamak için en yaygın kullanılan gaz argondur. Argon basıncı işlem sırasında 103-206 Mpa aralığındadır. İşlem sıcaklığı 1200-1220 °C aralığındadır. Döküm parçaların sıcak izostatik preslenmesi sıcaklık ve basıncın aynı anda uygulanması ile yapıda plastik deformasyon, sürünme ve difüzyon etkilerinin karışımı bir etki yaratarak iç boşlukların ve mikroporozitelerin giderilmesini sağlar. İçyapı hatalarının giderilmesi

mekanik özelliklere olumlu etki eder. Mekanik özelliklerin optimizasyonunu sağlayan sıcak izostatik preslemenin önemi türbin üreticilerinin döküm parçalarda kabul edilebilir porozite oranlarını son derece sıkı takip etmelerinden dolayı oldukça artmıştır.

### **4.3. Nikel Esaslı Süper Alaşımlar Üzerine Yapılmış Örnek Çalışmalar**

#### **4.3.1 Nikel esaslı süper alaşımlarda oluşan kusurların mikro yapı görüntüleriyle incelenmesi**

Süper alaşımların en önemli özellikleri olağanüstü yüksek sıcaklık dayanımlarıdır. Bu özellikleri, onları gaz türbinlerinde kullanılacak ideal malzeme haline getirir. Buna ek olarak yüzey merkezli kübik yapıları nedeniyle yüksek sıcaklıklarda iyi gerilme, kırılma ve sürünme özelliklerine sahiptirler. Al ve Ti gibi elementlerin varlığı  $\gamma'$  fazının ( $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ ) oluşumunu sağlamıştır ki bu faz  $\gamma$  matrisin içinde yayılarak sertleştirici görevi görmüştür. Cr'un yapıdaki dağılımı oksidasyon direncini artırır. C içeriği karbür oluşumunu sağlamak suretiyle sürünme direncini artırır. Bu çalışmada iki farklı vakada Nikel bazlı süper alaşımlarda görülen hatalar taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile incelenmiştir. Mikroyapı görüntüleri, ilk vakada fazla ısıtmanın, ikinci vakada ise yüzey mikro yapısının önemli miktarda bozunmasının hatalara neden olduğunu kanıtlamıştır[10].

##### **4.3.1.1 Giriş**

Süper alaşımlar, 20. yy'ın ikinci çeyreğinden itibaren yüksek sıcaklık dayanımı gösteren malzeme ihtiyacını gidermek amacıyla üretilmeye başlanmıştır. Günümüzde üç gruba ayrılırlar; 1- Nikel bazlı süper alaşımlar 2- Kobalt bazlı süper alaşımlar 3- Demir bazlı süper alaşımlar[10]. En yaygın kullanım alanı bulanları nikel bazlı süper alaşımlar olmuştur. Nikel bazlı süper alaşımlar, içerdikleri krom sayesinde yüksek sıcaklıkta oksidasyon direncine sahiptirler. İçerdikleri diğer alaşım elementleri ise yüksek sıcaklıkta mukavemet ve özellikle sürünme direnci sağlarlar. Alaşım elementlerinden Al ve Ti, ısıtma işlemi sırasında  $\gamma'$  ( $\text{Ni}_3(\text{Al,Ti})$ ) fazının çökmesini, dolayısıyla yüzey merkezli kübik (YMK) matrisin ( $\gamma$  fazı) sertleşmesini sağlar[10].

$\gamma'$  çökeltileri genellikle çok ince ve dağılmış durumda olurlar ve sadece elektron mikroskobu yardımıyla görülebilirler[10]. Mikroyapıda görülen diğer bir önemli faz ise karbürlerdir. Karbürler, sürünme direncini artırırken, miktar ve dağılımları

kontrol altında tutulmaz ise çatlaklara neden olabilirler. Karbür miktar ve dağılımının kontrolü bu nedenle çok önemlidir. Cr, Mo, W gibi alaşım elementlerinin miktarı korozyon dayanımı ve iyi mekanik özellikler sağlayacak seviyede olmalıdır. Bu elementlerin yapıda fazla bulunması metallerarası fazların oluşumuna, dolayısıyla kırılma eğilimine yol açabilir[10].

Bu çalışmada iki farklı vakada farklı Ni bazlı süper alaşımlarında oluşan hatalar analiz edilmiştir. İlk vakada türbin kanatçığı aşırı yüksek sıcaklığa tabi tutulmuş ve yüksek sıcaklıkta yayınımla gerçekleşen prosesler mikroyapısal değişikliklere neden olmuşlardır. Bu da çatlak oluşumu ile sonuçlanmıştır. İkinci vakada ise bir ısıtma işlemi uygulaması sonucu oluşan hataların malzemenin performansına etkileri incelenmiştir.

#### 4.3.1.2 Numuneler ve Deneysel Çalışma

Tablo 4.3 ve 4.4’de türbin kanatçığı olarak kullanılmış olan Rene 125 ve Inconel 713 malzemelerin kimyasal bileşimleri verilmiştir.

**Tablo 4.3 :** Rene 125 nikel esaslı süper alaşımının bileşimi

Ni	Cr	Al	Co	W	Ta	Ti	Mo	C
59,0	8,5	4,8	10,0	8,0	3,8	2,5	2,0	0,11

**Tablo 4.4 :** Inconel 713 nikel esaslı süper alaşımının bileşimi

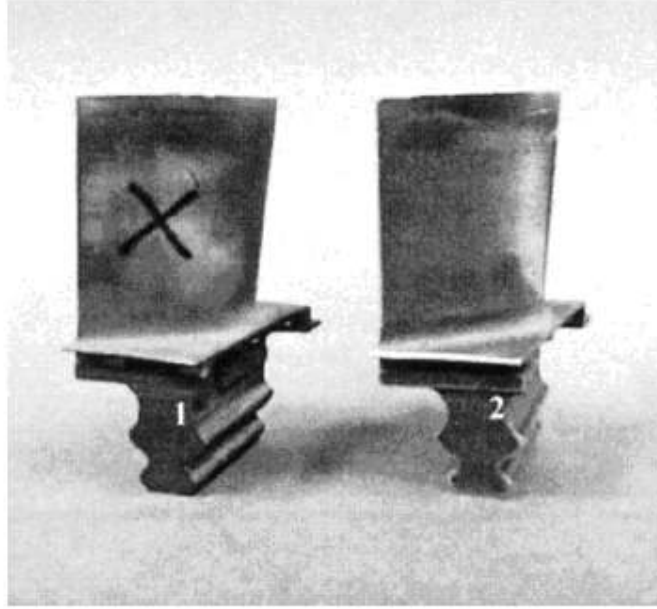
Ni	Cr	Al	Ti	Zr	Mo	Nb	B	C
74,1	12,5	6,1	0,8	0,1	4,2	2	0,012	0,12

Rene 125’ten iki adet numune kullanılmıştır: Numune 1 1000°C’ nin çok üstünde sıcaklıklara maruz bırakılırken, Numune 2 oda koşullarında tutulmuş ve iki malzeme mukayese edilmiştir. Bu iki numunenin 0.5 kg’lık yük altında vickers sertlik ölçümleri yapılmış, her iki numuneye de 5’er test uygulanmıştır. Numuneler, standart metalografi yöntemleri kullanılarak taramalı elektron mikroskobu (SEM) için hazırlanmış, mikroyapıları incelenmiştir. Her iki numuneden alınan örnekler 40ml HCl, 30ml HNO<sub>3</sub> ve 10ml gliserin solüsyonu kullanılarak dağlanmıştır. Mikroyapı incelemeleri, ani ve yüksek sertlik değişimi gözlenen alanlara odaklanmıştır.

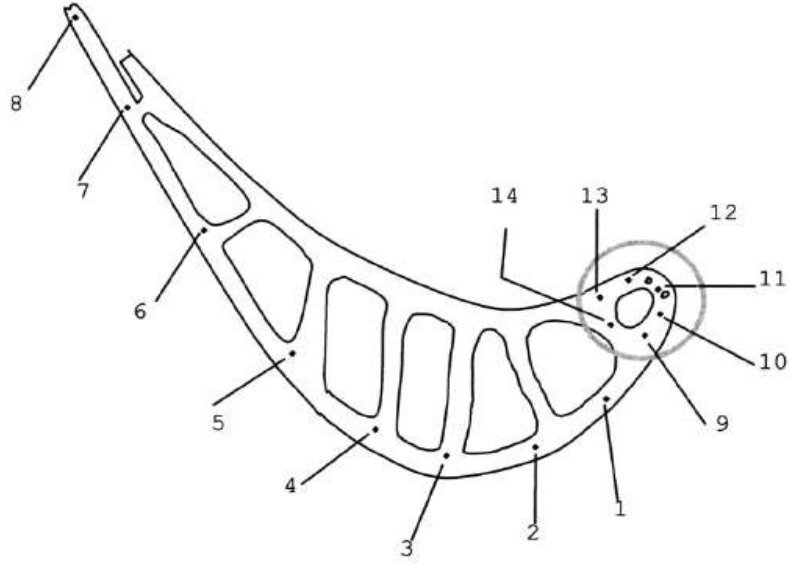
HVOF yöntemi ile kaplanmış olan Inconel 713 malzemedan alınan numuneler de benzer yöntemlerle incelenmiştir. Numune 3 herhangi bir zorlamayla karşılaşmamış standart halde numune iken Numune 4 1120 ° C'da 8 saat ısıtılma tabi tutulmuştur. Numune 3 ve 4 0,3kg yük altında vickers sertlik testlerine tabi tutulmuş, her iki numunede de 10 ölçüm yapılmıştır. Numune 1 ve 2 için uygulanan metalografik hazırlama, dağlama çalışmaları Numune 3 ve 4'e de aynen uygulanmıştır. Tüm numuneler 20kV'da X ışınları difraksiyon analizi ile çalışan tarayıcı elektron mikroskopunda incelenmiştir[10].

#### 4.3.1.3 Sonuçlar

Şekil 4.14.'de numuneler görülmektedir. Şekil 4.15'de ise numuneler üzerinde sertlik ölçümlerinin yapıldığı noktaları göstermektedir. Tablo 4.5., numuneler üzerinde değişik bölgelerin sertlik değerlerini göstermekte, Tablo 4.6. ise yuvarlak içine alınmış olan uç bölgeden alınan sertlik ölçümlerini göstermektedir.



Şekil 4.3 : İncelenen Numuneler



**Şekil 4.4 : Sertlik Ölçümlerinin Alındığı Noktalar**

Birinci numunenin uç bölgesinden alınan sertlik değerlerinin ortalaması (387HV) numunenin gövde bölgesinden alınan sertlik değerleri ortalamasının (421HV) oldukça altındadır. Numune 2’de ise sertlik değerleri bölgeler arasında farklılık göstermemiştir. Her iki bölgede de sertlik ortalaması 403 HV çıkmıştır.

**Tablo 4.5 : Gövde bölgesinden alınan sertlik değerleri**

Bölgeler	Numune 1	Numune 2
1	355	404
2	445	391
3	436	378
4	424	390
5	431	400
6	426	429
7	431	421
8	421	411
Ortalama	421	403

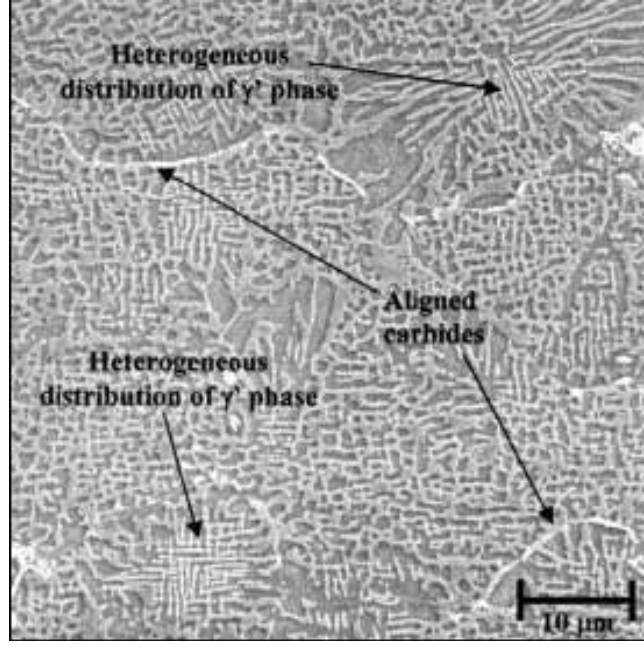


**Tablo 4.6 :** Uç bölgelerden alınan sertlik değerleri

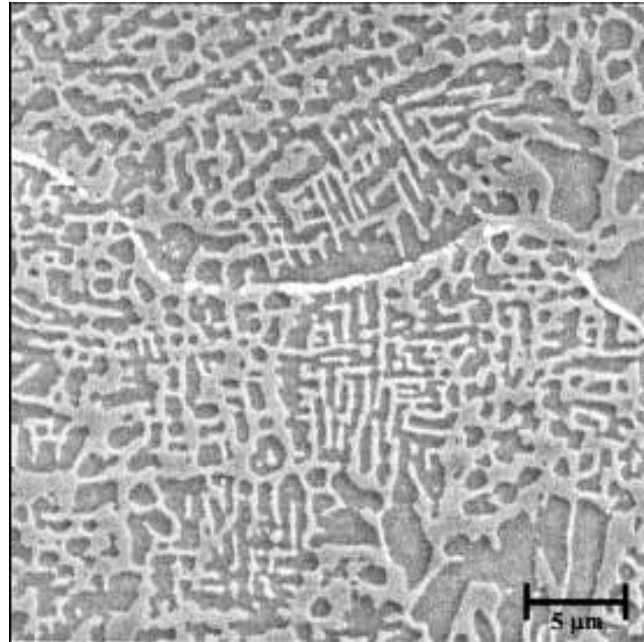
Bölgeler	Numune 1	Numune 2
9	400	397
10	384	399
11	385	390
12	386	409
13	391	428
14	377	397
Ortalama	387	403

#### 4.3.1.4 Değerlendirmeler

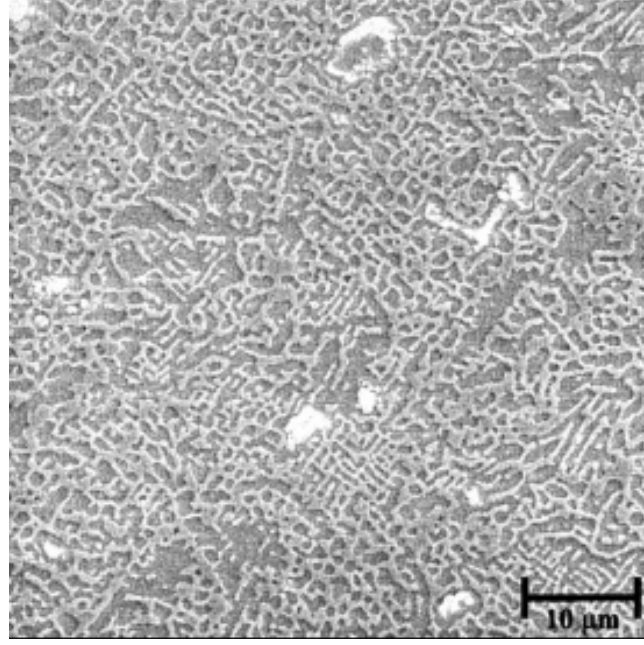
Şekil 4.5.'de numune 1'in mikroyapısı görülmektedir: Koyu gri  $\gamma$  matrisi içerisinde açık gri karbürler ve orta derecede gri renkli  $\gamma'$  çökeltileri görülmektedir. Bu parçacıkların dağılımı homojen değildir. Oklarla işaretli bölgelerde karbürlerin birleşik şekilde olduğu,  $\gamma'$  çökeltilerinin ise heterojen olarak dağıldığı görülmektedir. Karbürlerin birleşik bir şekilde yerleşmeleri çekirdeklenme ve çatlak oluşumunun en önemli nedenidir. Şekil 4.6.'da karbürlerin dağılımı daha detaylı olarak gösterilmiştir. Şekil 4.7.'de ise numune 2'nin mikro yapısının daha homojen dağılımda olduğu görülmektedir: Koyu gri matrisi içerisinde karbürler ve  $\gamma'$  çökeltileri daha ince yapıda dağılmışlardır [10].



Şekil 4.5 : Numune 1'in mikro yapısı

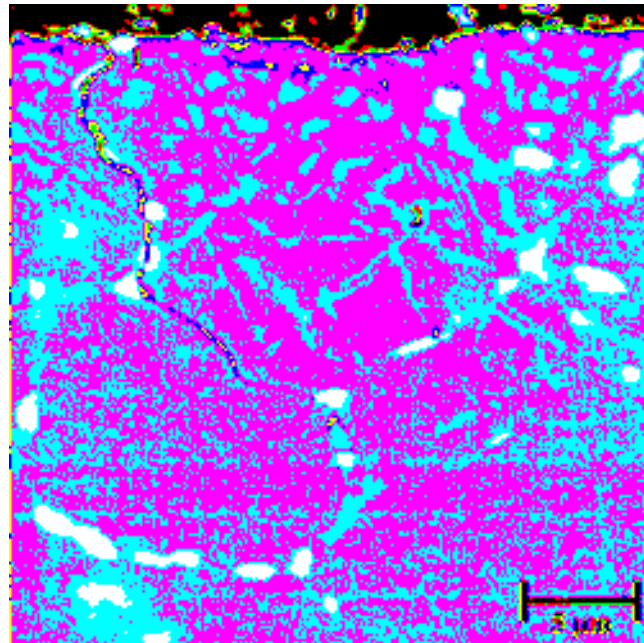


Şekil 4.6 : Numune 1 mikro yapısında karbür hattı

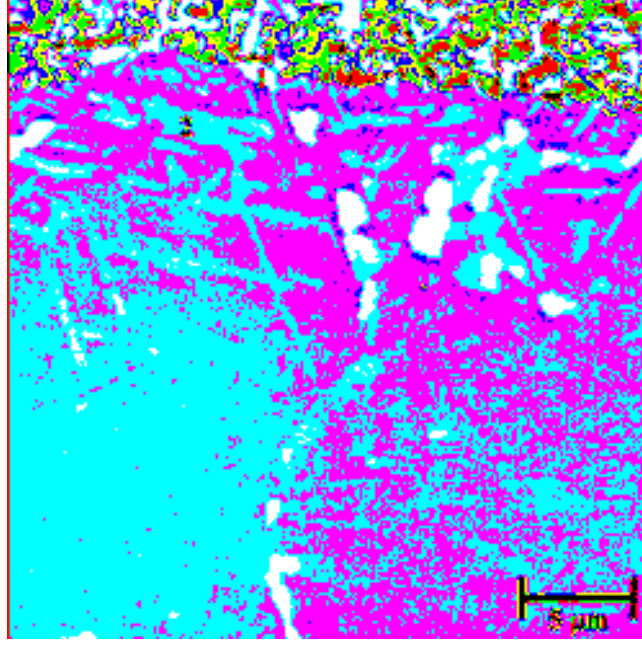


**Şekil 4.7 :** Numune 2 mikro yapısı

Şekil 4.8’de nedeni karbürler olduğu karbürler boyunca ilerlemesinden anlaşılan bir çatlak oluşumu görülmektedir. Aynı şekilde orta derecede gri renkli iğne yapılı tungsten ve tungsten karbürler ve bu karbürlerin  $\gamma$  matris içerisinde segregasyona uğrayarak yok oldukları görülebilmektedir. Şekil 4.9’da numune 2’nin benzer yapıda olmakla birlikte daha az karbür içerdiği görülmektedir[10].

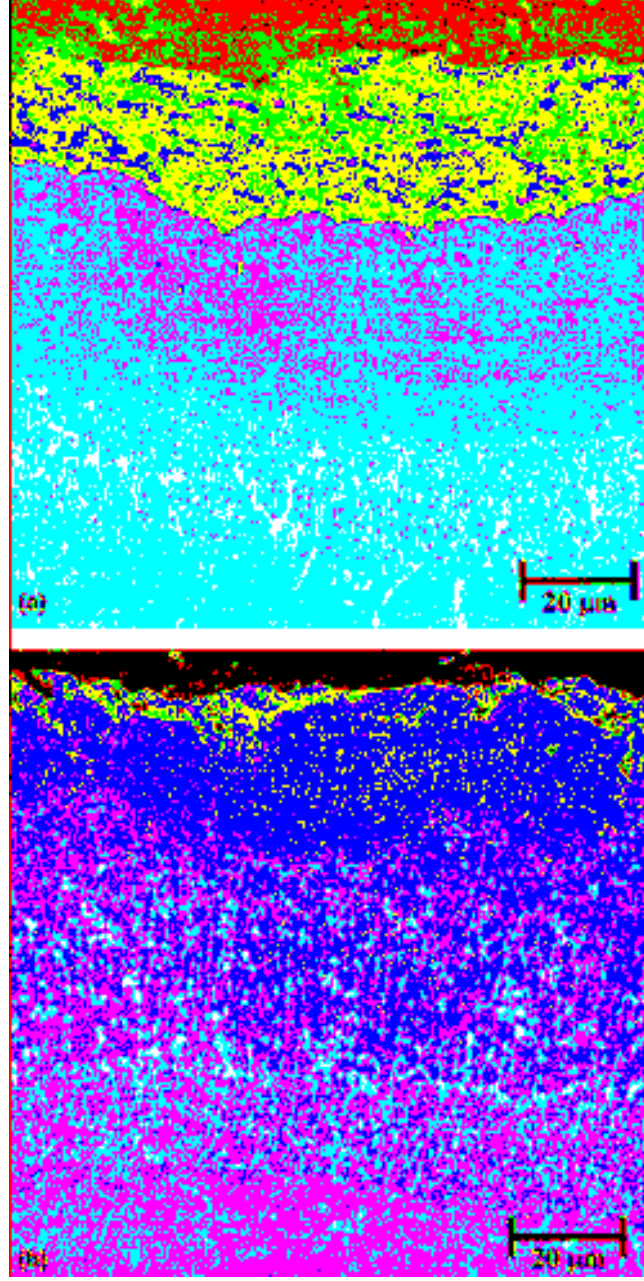


**Şekil 4.8 :** Karbür hattı boyunca ilerleyen çatlak görüntüsü



**Şekil 4.9 :** Numune 2’de karbürlerin görünümü

Şekil 4.10 (a) ve (b)’de numunelerin kaplamaları görülmektedir. Bu iki şekilde görülen üç bölge, katı hal difüzyon prosesinin sonucudur. Bu difüzyon, alaşım ve kaplama elementleri arasında servis şartlarında 900°C sıcaklıklarda oluşmaktadır. Codep isimli kaplamanın bileşiminde titanyum, alüminyum, karbon, nikel, magnezyum, krom, demir, manganez, bakır ve kalay bulunmaktadır. Bu çalışmada değişik servis sıcaklıklarının etkisi analiz edilmemiştir fakat her iki numunede de kaplama-matris arayüzeyi net olarak görülmektedir [10].



**Şekil 4.10 :** a – b :Numunelerin Kaplama-Matris Arayüzey Görüntüsü

Tablo 4.7 ve 4.8’de numune 3(ısıtıl işlem görmemiş) ve 4 (ısıtıl işlem görmüş)’ün sertlik değerleri görülmektedir. Numune 3’ün ortalama sertliği 370.69 HV olarak ölçülmüştür. Numune 4’ün ise 364.56’dır. Her iki numune için de sertlik değerleri özellikle numune 1’e kıyasla düşük çıkmıştır.

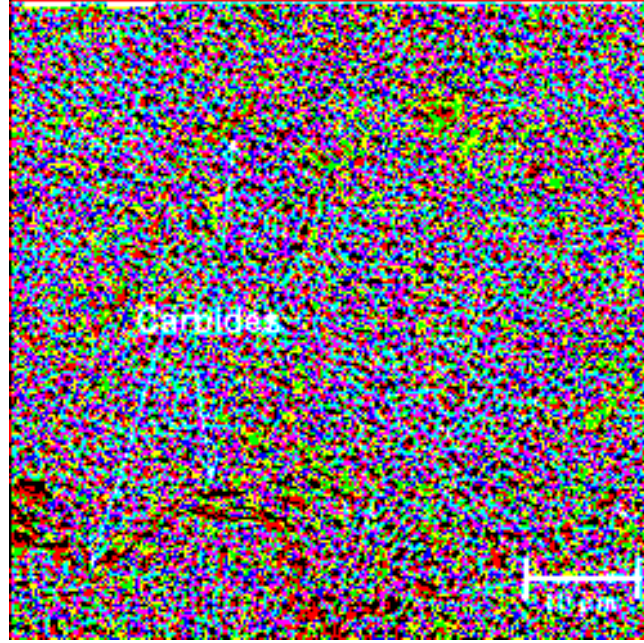
**Tablo 4.7 : Isıl İşlem Görmemiş Numunenin(Numune 3) Sertlik Değerleri**

Noktalar	HV
1	379,19
2	373,78
3	373,59
4	368,25
5	371,06
6	376,45
7	348,12
8	371,13
9	387,25
10	358,05
Ortalama	370,69

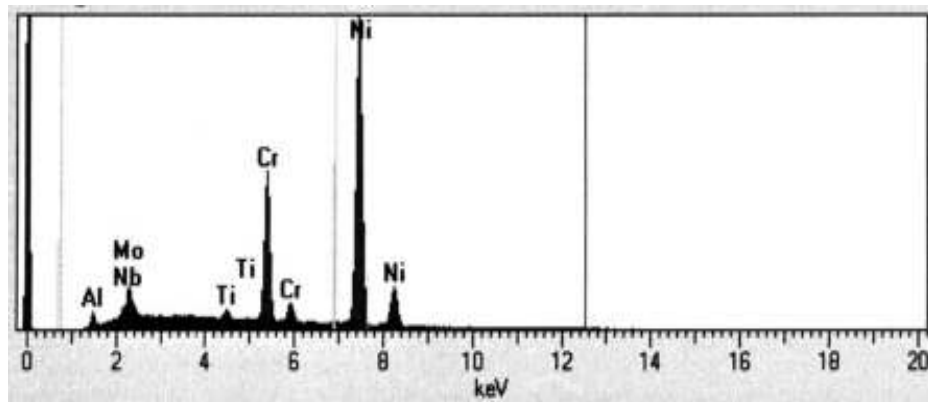
**Tablo 4.8 : Isıl İşlem Görmüş Numunenin(Numune 4) Sertlik Değerleri**

Noktalar	HV
1	373,65
2	376,50
3	379,10
4	331,93
5	355,50
6	368,47
7	360,50
8	358,12
9	370,92
10	370,90
Ortalama	364,56

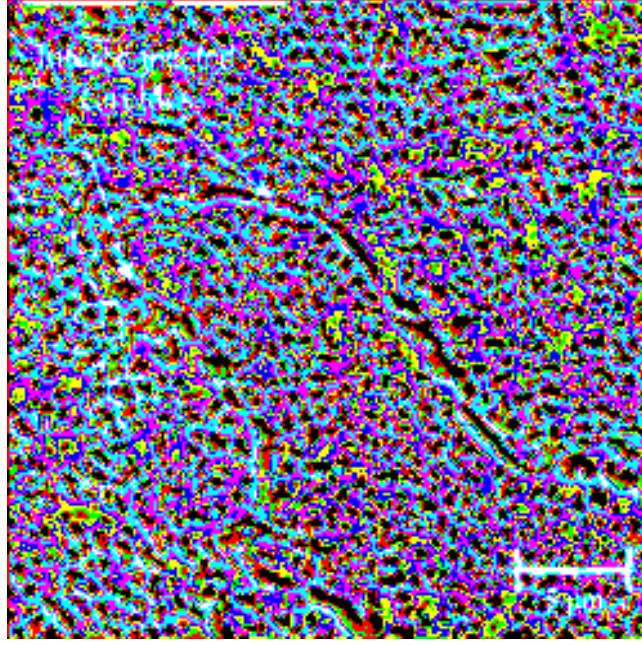
Şekil 4.11, numune 3'ün mikroyapısını koyu gri renkli  $\gamma$  fazı içerisinde orta derecede gri  $\gamma'$  fazı çöktelleri ve daha çok tane sınırlarında birikmiş olan karbürleri göstermektedir. Şekil 4.12, süper alaşımın EDS spektrumunu göstermektedir. Şekil 4.13, ısıtılmış numune 4'ün mikroyapısını göstermektedir. Isıtılmış numunede karbürler çoğunlukla temas halinde olduklarından çekirdeklenme ve çatlak oluşumuna neden olabilecek bir yapı oluşturmuşlardır. Şekil 4.14'de ise  $\gamma$  matrisinde boşluk oluşumu görülmektedir[10].



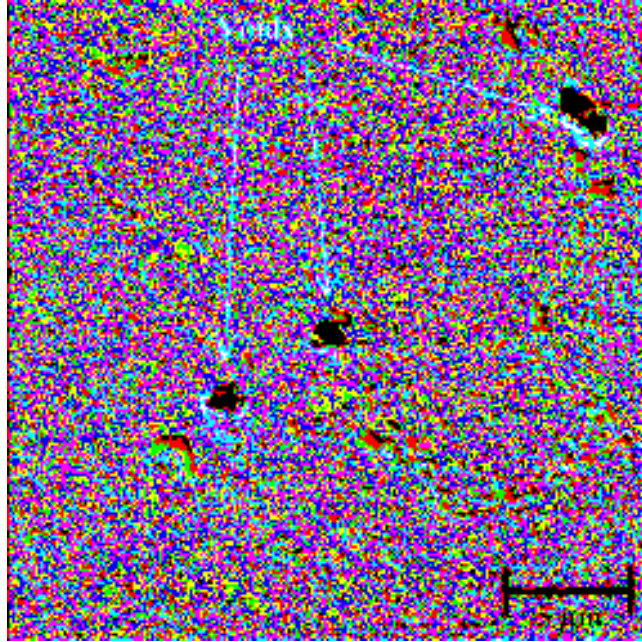
Şekil 4.11 : Numune 3 mikro yapı görüntüsü



Şekil 4.12 : Rene 125 Ni esaslı süper alaşımın EDS analizi



**Şekil 4.13 :** Isıl işlem görmüş (numune 4) mikro yapısı

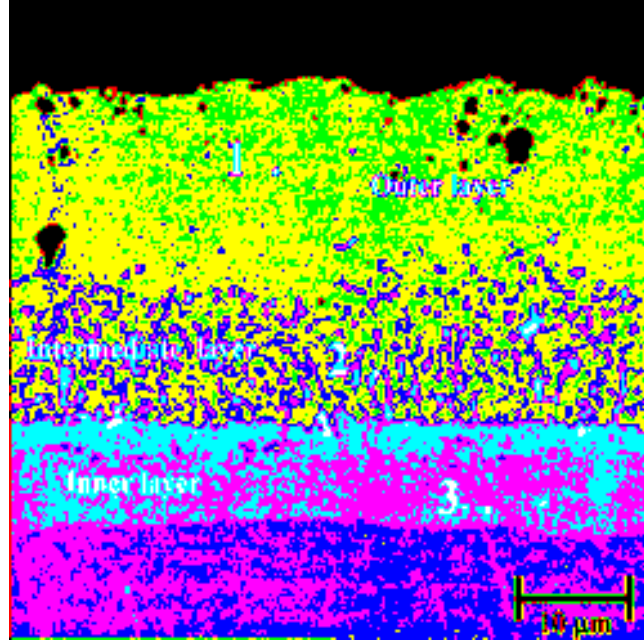


**Şekil 4.14 :**  $\gamma$  Matrisinde boşluk oluşumu

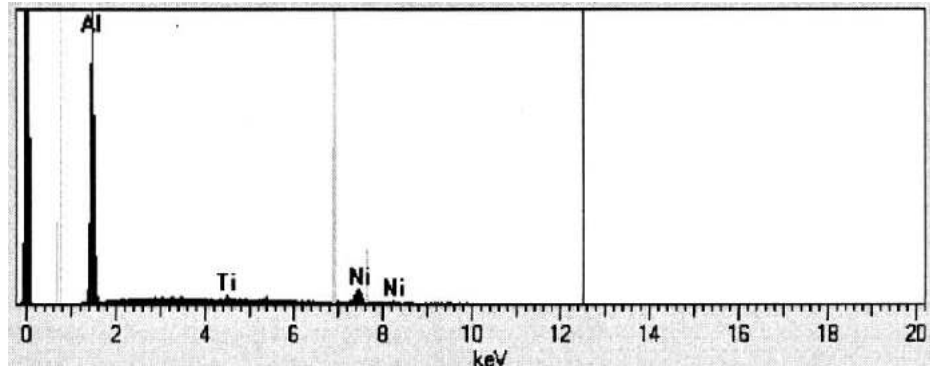
Şekil 4.15., standart numune üzerindeki kaplamanın mikroyapısını göstermektedir. Burada alüminyum, nikel ve krom içeren bir dış tabaka, krom, molibden ve niobyum içeren bir orta tabaka ve kompozisyonu alt alaşım malzemesine yakın olan bir iç tabaka görülmektedir. Şekil 4.16'de Şekil 4.15'da gösterilen 1, 2 ve 3 noktalarına



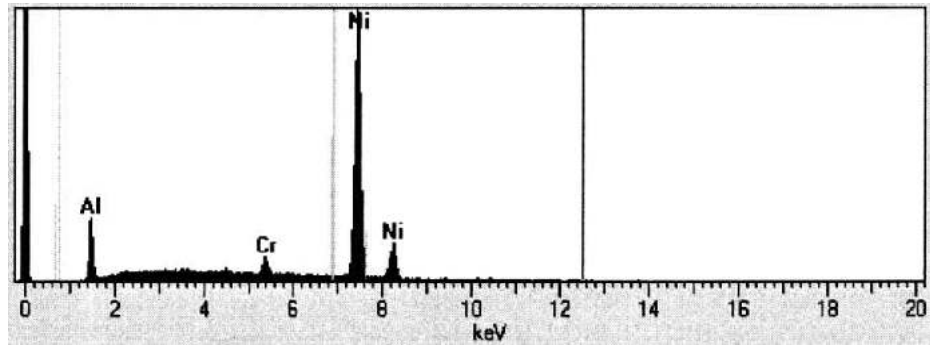
göre EDS analiz sonuçları görülmektedir. Kaplamanın alaşıma bağlılığı iyi durumda ve kalınlığı 44 $\mu\text{m}$ 'dir [10].



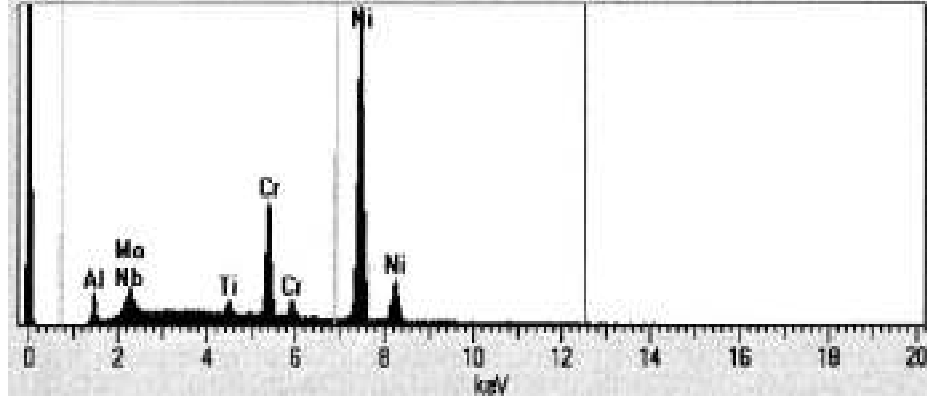
Şekil 4.15 : Standart malzeme üzerindeki kaplamanın mikro yapısı



(a)



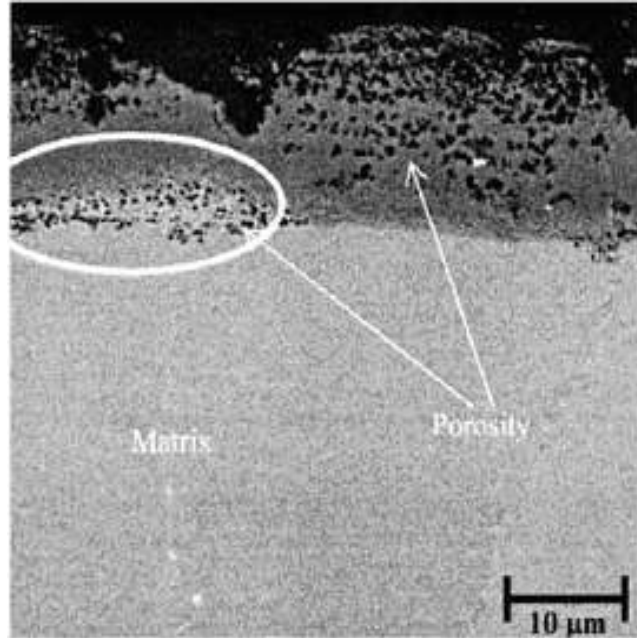
(b)



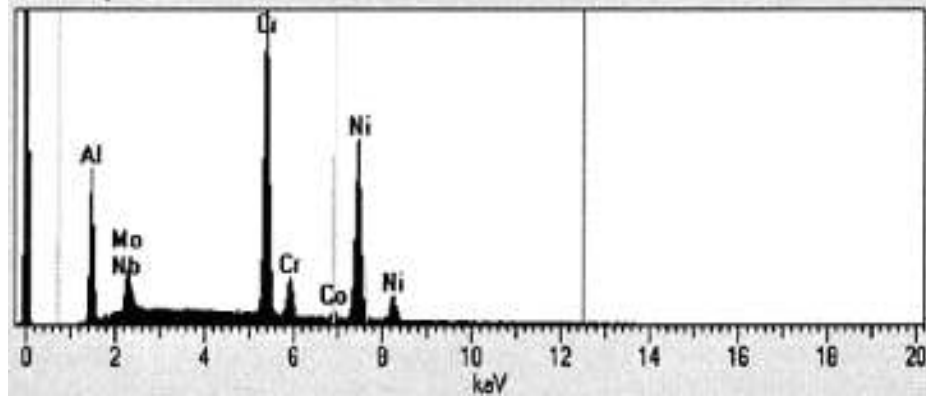
(c)

**Şekil 4.16 :** Şekil 4.15’da gösterilen 1, 2 ve 3 noktalarına göre EDS analiz sonuçları görülmektedir.

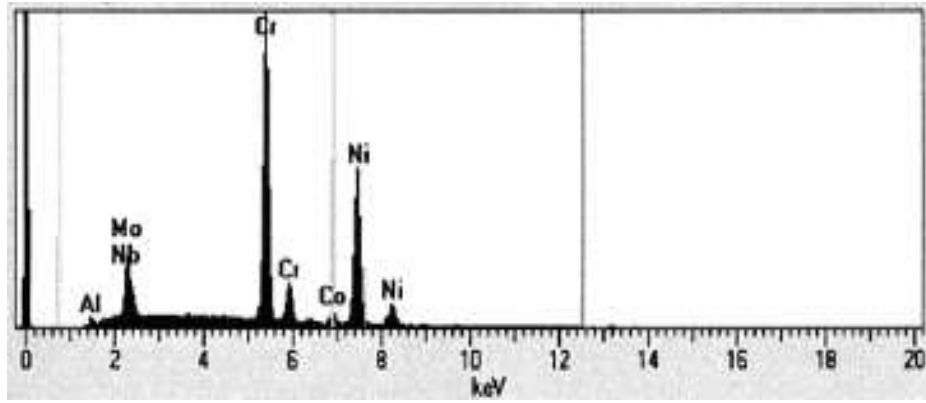
Şekil 4.17’de ısıl işlem görmüş numunenin kaplamasının mikrosafı görülmektedir. Burada yapısında alüminyum, nikel, krom, molibden, niobyum ve kobalt bulunan düzensiz bir tabaka görülmektedir. Bazı bölgelerde bu ilk tabakanın bileşimine benzer bileşimde alt alaşıma yakın, süreksiz bir iç tabaka daha görülmektedir. Her iki tabakada da porozite(gözenekli yapı) görülmektedir. Kaplamanın ortalama kalınlığı 26µm olarak tespit edilmiştir.



(a)



(b)



(c)

**Şekil 4.17 :** Isıl işlem görmüş numunenin kaplamasının mikrografı ve EDS analiz sonuçları

#### 4.3.2 GTD111 Nikel Esaslı Süper Alaşımında Mikroyapının Sıcaklıkla Değişimi

GTD 111'in yüksek sıcaklığa maruz kaldıktan sonraki mikro yapısı ve MC bozunumu incelenmiştir. Standart ısıl işlem görmüş çok kristalli GTD 111 malzeme 10000 saat boyunca 871–882 °C sıcaklıklara maruz bırakılmıştır. Uygulamadan sonra nitel ve nicel metalografik analizler yapılarak yapıda bulunan fazların dağılımı ve bileşimi belirlenmiştir. Alaşımın  $\gamma'$  büyüme oranının sıcaklığa maruz kalma süresinin 1/3'üncü kuvvetine eşit olduğu görülmüştür.  $\gamma'$  tane büyüme aktivasyon enerjisi 256kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Metal karbidlerin (MC) 871 ve 927°C sıcaklıklarda bozunma sonrası  $\gamma'$  ve  $M_{23}C_6$  yerine  $\eta$  ve  $M_{23}C_6$  'ya dönüştüğü görülmüştür. Özellikle 871°C 'da tutulan numunede  $M_{23}C_6$  ve MC'lerin yakınlarında sigma ( $\sigma$ ) fazının çökeldiği görülmüştür. Tane sınırları boyunca  $\gamma'$  ve  $M_{23}C_6$  filmi çökmesi ve 982°C'de  $\gamma' - \gamma$  ötektiğinde ince yapıda  $\eta$  çözüldüğü gözlenmiştir[11].

#### 4.3.2.1 Giriş

Nikel esaslı süper alaşım GTD 111 General Elektrik (GE) tarafından endüstriyel gaz türbinlerinde kanatçık malzemesi olarak kullanılmak üzere geliştirilmiştir. GTD 111 diğer bir süper alaşım kanatçık malzemesi IN738CL'ye oranla 20°C sürünme ve kopma avantajına ve daha yüksek yorulma mukavemetine sahiptir[1]. GTD 111, çok fazlı bir mikro yapıya sahiptir. Bu yapıda  $\gamma$  matriste  $\gamma'$  çökeltisi,  $\gamma'-\gamma$  ötektığı, karbürler ve az miktarda da döküm süper alaşımlarda görülen diğer fazlar görülür.

Gaz türbinlerinde kanatçıkların maruz kaldığı yüksek sıcaklıklar, mikro yapı bozunmalarına neden olmaktadır. Örneğin, MC'ler parçalanır ve  $\gamma'$  fazı topaklanır. Çeşitli araştırmalar, yüksek sıcaklıklarda bozunan mikro yapının mekanik özellikleri çok etkilediğini göstermiştir[11]. Bundan dolayı kanatçık malzemesinin yüksek sıcaklıklardaki mikro yapısının stabilitesi, gaz türbininin güvenilirliği açısından çok önemlidir.

Metal karbürler (MC) süper alaşımlar içerisinde katılaşma sırasında oluşurlar[11]. Kanatçığın kullanımı sırasında MC'ler yavaş yavaş parçalanır ve ortama serbest C bırakırlar. Yüksek sıcaklıkta MC'lerin parçalanması çok bilinen bir konu olmasına rağmen, bu parçalanmanın sıcaklıkla ilişkisine dair literatürde fazla bilgi bulunmamaktadır. Ayrıca, GTD 111 Ni esaslı süper alaşımının yüksek sıcaklıklarda gösterdiği performans ve bu şartlarda mikro yapısı, mekanik özellikleri ve dayanıklılığı konularında da literatürde pek az bilgi bulunmaktadır.

Bu çalışmada GTD 111 süper alaşımının yüksek sıcaklıklardaki mikro yapı değişimleri metal karbidlerin bozunmalarının sıcaklıkla ilişkisi göz önüne alınarak incelenmiştir.

#### 4.3.2.2 Deneysel çalışma

Bu çalışmada kullanılan GTD 111 malzemesinin kimyasal bileşimi Tablo 4.9'da görülmektedir. Vakum altında 13mm çaplı çubuklar halinde dökülen numuneler standart ısıl işleme tabi tutulmuştur.(1120°C/2h, 843°C/24h).  $\gamma'$  tane büyümesi ve metal karbürleri parçalanmasını gözlemlenmek amacıyla numuneler, 871, 927 ve 982°C sıcaklıklara 10000h süreyle maruz bırakılmıştır. Mikro yapıdaki değişiklikler SEM ve TEM kullanılarak yapılmıştır.

**Tablo 4.9 : GTD 111 Ni Esaslı Süper Alaşımın Kimyasal Bileşimi**

Ni	Co	Cr	Al	Ti	Ta	Mo	W	Zr	Fe	C	B
Kalan	9,24	13,86	3,05	4,86	2,91	1,57	3,78	0,008	0,051	0,113	0,013

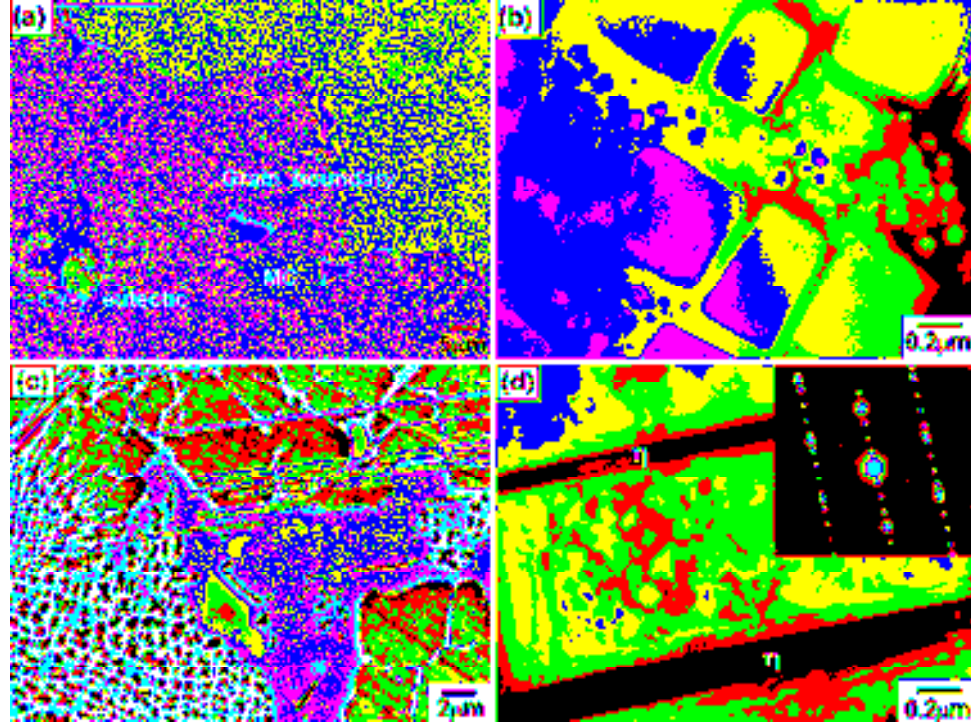
Yapıda bulunan fazların belirlenmesi ve kimyasal analizleri Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) yöntemiyle yapılmıştır. Numuneler mekanik parlatmadan sonra kimyasal dağlama yapılarak hazırlanmıştır. İki farklı dağlama metodu uygulanmıştır. Numune  $\gamma$  fazı, karbür ve diğer fazları SEM’de incelemek amacıyla Kallings II kimyasalı ile birkaç saniye temas ettirilmiştir. EDS analizi ile  $\eta$  ve  $\gamma$  fazlarını incelemek için ise numune kromik asit ile dağlanmıştır. TEM’de incelenen numuneler ise %83 etanol, %7 gliserol ve %10 perklorik asit kullanılarak -20°C/75V’da elektrokimyasal olarak parlatılmışlardır.

#### 4.3.2.3 Sonuçlar

Şekil 4.18’de ısı işlem görmüş standart GTD 111 malzemenin mikro yapısı görülmektedir. MC karbürler  $\gamma$ -  $\gamma$  ötektiği ve tane sınırlarını da içine alan interdentritik bölgelerde yoğun olarak görülmektedir. Tablo 4.10’da görüldüğü üzere EDS yöntemi ile en yoğun olduğu tespit edilen elementler Ti ve Ta’dır. Tane sınırlarında kesintiye uğramış  $\gamma$  fazı, MC ve çok ince yapılı  $M_{23}C_6$  bileşiği görülmüştür. Kübik yapılı iri taneli birincil  $\gamma$  ve küresel yapılı ince taneli ikincil  $\gamma$  Şekil 4.18-b’de görüldüğü gibi  $\gamma$  matris içerisinde dağılmışlardır.  $\gamma$ -  $\gamma$  ötektiği yanında tabaka halinde Ti ve Ta içeriği yüksek olan fazlar Şekil 4.18-d’de görülmektedir. Bu tabakanın seçilmiş bölge difraksiyon paterni bu fazın  $\eta$  ( $Ni_3Ti$ ),  $\gamma$  matrisle kristalografik oryantasyon ilişkisinin  $(111)\gamma // (0001)\eta$  ve  $[0-1\ 1]\gamma // [1-2\ 1\ 0]\eta$  olduğunu göstermektedir [11].

**Tablo 4.10 : GTD 111 Ni Esaslı Süper Alaşımın EDS Analizi Sonuçları**

Elementler	Ti	Cr	Ni	Mo	Ta	W
Ağırlık (%)	27,36	1,28	4,06	2,37	54,68	10,25



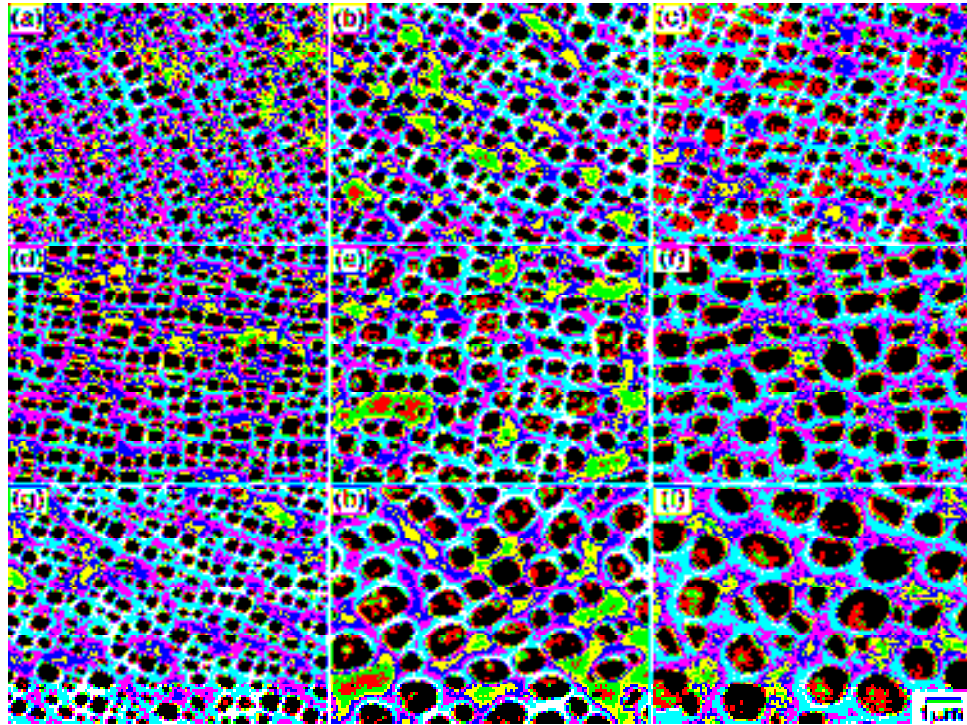
**Şekil 4.18 :** Standart ısıtıl işlem görmüş GTD 111 Ni esaslı süper alaşımın mikroyapısı

Ötektik bölgenin dendritik merkezden farklı mikro yapıya sahip olmasının nedeni, genellikle katılma sırasında meydana gelen ayrışmadır. Katılma sırasında bazı alaşım elementleri merkeze doğru yönelirken, bazıları dendritlerarası sıvı içerisinde yoğunlaşarak dendritlerarası ve  $\gamma'$ - $\gamma$  ötektiği olarak katılırlar. GTD 111'in standart ısıtıl işlemi sırasında sıcaklık ve sürenin değiştirilmesi yapıdaki ayrışmanın homojenizasyonunu kontrol etmek için yeterli değildir. Tablo 4.11'de dendrit merkez ve  $\gamma'$ - $\gamma$  ötektiğinin EDS analizi sonuçları görülmektedir. Ayrışma katsayısı ( $k'$ ) dendrit merkez ve  $\gamma'$ - $\gamma$  ötektiğinin ayrışmasını karakterize etmek amacıyla kullanılmıştır. Bu tabloda  $k'$  dendrit merkez bileşiminin  $\gamma'$ - $\gamma$  ötektiği bileşimine oranını göstermektedir.

**Tablo 4.11 :** Dendrit merkezi ve  $\gamma'$ - $\gamma$  Ötektiğinin EDS Analizi Sonuçları

Elementler	Al	Ti	Cr	Co	Mo	Ta	W
Dendrit Çekirdeği	2,64	3,48	16,43	10,36	1,96	1,88	6,91
$\gamma'$ - $\gamma$ ötektik	2,75	8,59	9,62	8,57	1,31	4,41	3,08
$k'$	0,96	0,41	1,71	1,21	1,50	0,43	2,24

Her element için ölçülen ayrışma katsayısı  $k'$  Tablo 4.11'te görülmektedir. Katılma sırasında dendrit merkezinde fazla miktarda bulunan elementlerin ayrışma katsayısı 1'den büyüktür. Ayrışma katsayısının ( $k'$ ) 1'den küçük olması, o elementin katılma sırasında sıvı içerisinde dağıldığını ve sonunda dendritler arası bölgede katıldığını göstermektedir [11].  $k'$  değerleri 1'den küçük olan Al, Ti ve Ta gibi elementlerin katılma sırasında sıvı içerisinde ayrışma eğilimi gösterdiği, buna karşın  $k'$  değerleri 1'den büyük olan Cr, Co, Mo ve W gibi elementlerin bir araya toplandığı görülmektedir. GTD 111 içerisindeki alaşım elementlerinin dağılımını Ni esaslı süper alaşımlarının genel özelliklerini sergilemektedir[11].



**Şekil 4.19 :** Sıcaklık ve Süreye Bağlı Olarak  $\gamma'$  tanelerinin mikroyapısında oluşan değişimlerin SEM görüntüleri (a)871°C 50 saat (b) 871 °C 5000 saat (c) 871 °C 10000 saat (d) 927°C 50 saat (e) 927 °C 5000 saat (f) 927 °C 10000 saat (g) 982 °C 50 saat (h) 982 °C 5000 saat (i) 982 °C 10000 saat

Standart ısıl işlem sonrası birincil  $\gamma'$  ve ince yapılı ikincil  $\gamma'$  tanelerinin  $\gamma$  matriste dağıldığı görülmektedir. Şekil 4.19'da  $\gamma'$  tanelerinin farklı sıcaklık ve sürelerde değişen durumu görülmektedir. Şekilde ince taneli ikincil  $\gamma'$  tanelerinin bozunduğu, birincil  $\gamma'$  tanelerinin ise büyüdüğü görülmektedir. Sıcaklığa maruz kalınan süre arttıkça birincil  $\gamma'$  tanelerinin kübikten küresel şekle geçtiği görülmektedir. Daha yüksek sıcaklıklarda büyüme oranının daha yüksek ve  $\gamma'$  tanelerinin morfolojisindeki

değişimin daha hızlı olduğu görülmüştür. Gamma prime tanelerinin büyüme davranışının literatürdeki diğer çalışmalara çok benzediği tespit edilmiştir [11,13].

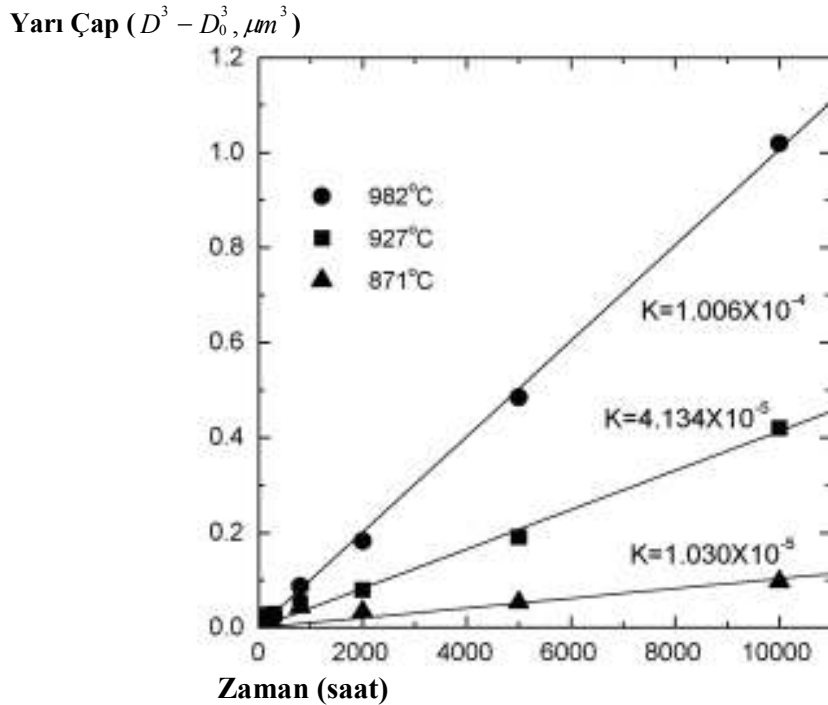
Yüksek yoğunluğa sahip küçük taneler, düşük yoğunlukta daha geniş taneler haline gelerek toplam ara yüzey enerjisini düşürmek eğilimindedirler. Hacim difüzyonunun oran kontrol faktörü olduğunu düşünürsek, yüksek sıcaklıkta  $\gamma'$  büyümesini şu formülle ifade edebiliriz[11].

$$\partial^3 - \partial_0^3 = Kt \quad (4.1)$$

$$K = \frac{64C_e\gamma_s DV_m^2}{9RT} \quad (4.2)$$

Burada  $\bar{d}$  ortalama  $\gamma'$  çapı,  $d_0$  başlangıçtaki  $\gamma'$  çapı,  $C_e$   $\gamma'$ - $\gamma$  çözeltisinin denge konsantrasyonu,  $\gamma_s$  ara yüzey serbest enerjisi, R gaz sabiti, T sıcaklık, D  $\gamma'$ - $\gamma$  çözeltisinin difüzyon katsayısı,  $V_m$  ise  $\gamma'$  tanelerinin molar hacmini temsil etmektedir.

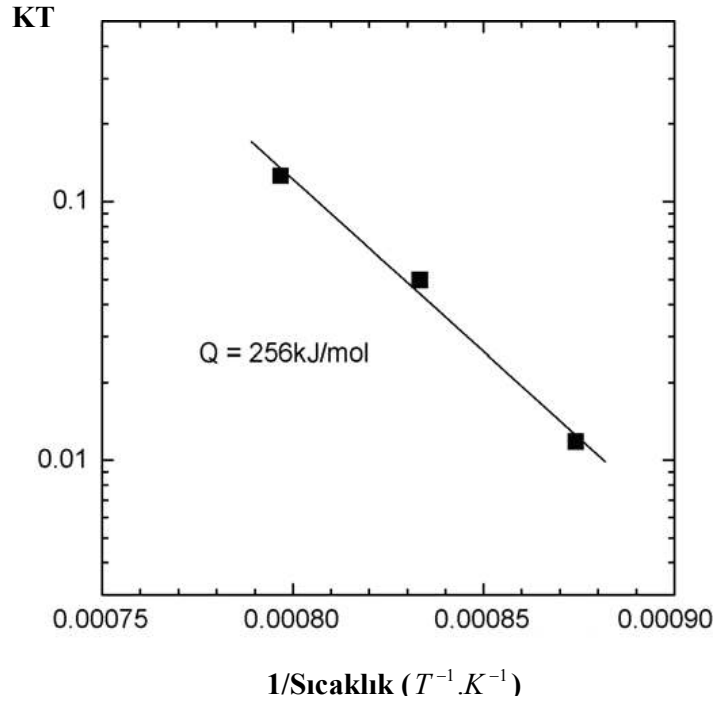
Görüntü analizlerinin sonuçlarından çıkarılan  $\gamma'$  tanelerinin çaplarındaki büyümenin değişen süreler ve sıcaklıklara göre değişimi Şekil 4.20'de görülen doğrular yardımıyla hesaplanabilir, farklı sıcaklıklar için K değerleri bu doğrular yardımıyla hesaplanabilir.



Şekil 4.20 :  $\gamma'$  Boyutunun Süreye ve Sıcaklığa Bağlı Değişimi



Şekil 4.21’de görüldüğü gibi, Eşitlik (2)’de verilen difüzyon katsayısı  $D=D_0 \exp(-Q/RT)$  olduğunda  $Q$  difüzyon aktivasyon enerjisi,  $\ln KT - 1/T$  fonksiyonu kullanılarak hesaplanabilir. Bu çalışmada  $\gamma'$  tane büyümesi için gerekli aktivasyon enerjisi 256 kJ/mol olarak hesaplanmıştır. Bulunan bu sonuç, bir başka çalışmada bulunan 259 kJ/mol sonuca[11] oldukça yakındır. Bulunan bu sonuç,  $\gamma'$  tanelerinin büyümesinin  $\gamma'$  oluşturan Al ve Ti gibi elementlerinin difüzyonu ile kontrol edildiğini göstermektedir çünkü bulunan aktivasyon enerjisi Ni içinde Ti ve Al’un difüzyonu için gereken enerjiye(257-270kJ/mol oldukça yakındır [11]).



Şekil 4.21 : Aktivasyon enerjisinin  $\gamma'$  büyümesine bağlı olarak hesaplanması

## 5. SÜPER ALAŞIMLARA UYGULANAN KORUYUCU KAPLAMALAR

Gaz Türbinleri gibi ağır termo-mekanik şartlarda başarıyla uygulama alanı bulan süper alaşımlara 3 çeşit kaplama uygulanır;

Termal bariyer kaplamalar

Difüzyon kaplamalar

Plazma Sprey Kaplamalar

Kaplamaların parça yüzeylerinden tamamen soyulup yeniden kaplanabilir, temiz bir yüzey bırakmaları önemlidir. Günümüzde özellikle türbin kanatçıklarında çok katmanlı kaplamalar kullanılmaktadır. Bağ kaplama dediğimiz süper alaşım ile kuvvetli bağlar oluşturan iç kaplama 75 - 500  $\mu m$  arası bir kalınlığa sahiptir. Günümüzden 35-40 yıl önce uygulanmaya başlanan bu kaplamalar genel olarak MCrAlY kaplamalar olarak bilinir. Dış yüzey kaplaması ise Alumina gibi çeşitli difüzyon kaplama malzemeleri olabilir ve genelde 75 - 500  $\mu m$  kalınlığa sahiptir[2]

### 5.1 MCrAlY Plazma Sprey Kaplamalar

Günümüzde oldukça yaygın olarak kullanılmakta olan MCrAlY kaplamalarda M genelde Kobalt veya Nikel-Kobaltın çeşitli oranlarda karışımı olabilir;[2] Bu kaplamaların sık rastlanan kimyasal bileşimleri şunlardır;

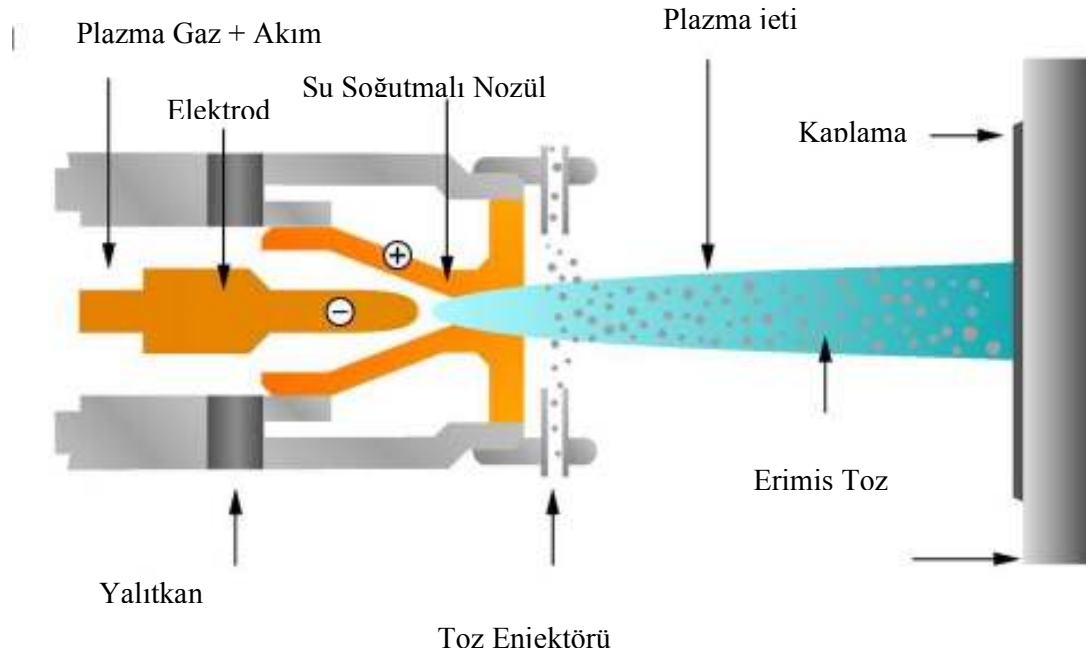
Ni, %18Cr, %12 Al, %0,3Y

Co, %29Cr, %3 Al, %0,3 Y

Co, %25 Ni, %20Cr, %8 Al, %0,3Y

Plazma sprej yönteminde plazma hamlacı kısmen ergitilmiş toz parçacıklarını hazırlanan yüzeylere ileri doğru sevk etmek için bir elektrik arkı ile üretilen ısı olarak iyonize edilmiş bir gazda enerji kullanır. Bu yüzeyler üzerindeki parçacıklar deforme edilir ve darbe üzerine yapışır. Plazma hamlacında bir inert gaz (genellikle argon) hamlaç ve su soğutmalı bakır anot arasında halka aralığa doğru akması için su soğutmalı tungsten katot etrafına gönderilir. Bir doğru akım ark, yüksek ark boşalması ile bu elektrotlar arasında başlatılır. Bu arkın gücü çok yüksek sıcaklıklara

ulaştırılıp (yaklaşık 3000 °C'ye kadar) çok küçük bir hacimde yoğunlaştırılır. Çok ince metal ve seramik tozlar, taşıyıcı bir gazda bu küçük yüksek sıcaklık bölgesine gönderilir ve plastik olarak deforme edilebilmesi için ısıtılır. Güçlü bir doğru akımla tutulan plazmaya ark ile iyonize edilmiş ısıtılmış argon gazı akışı, plazmanın bir memeye doğru gönderilmesini sağlar, toz spray malzemeyi beraberinde götürür. 5 ve 120 kW arasındaki güç tüketimi, 125 – 600 ms<sup>-1</sup> aralığında toz hızına ulaşılmasını sağlayabilir. Kaplama için metalik malzemelerin oksitten arınmış birikintilerini elde etmek için plazma inert gazla doldurulur [12].



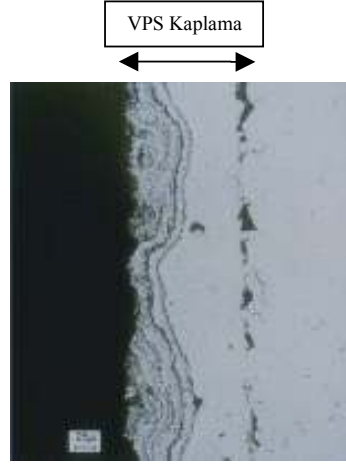
**Şekil 5.1 :** Püskürtme mekanizmasının şematik diyagramı

Plazma – püskürtülmüş kaplamanın önemli bir uygulaması gaz türbini motor parçalarının oksidasyon ve korozyon korumaları içindir. Tablo 5.1’de gaz türbin motorları için nikel esaslı süper alaşımları korumak için kullanılan bazı *MCrAlY*’nin kimyasal kompozisyonları verilmiştir. *M*, *Co* ve *Ni* veya bunların her ikisinin bir alaşımı olabilir. *Al* ve *Cr* ile oluşmuş alüminyum ve krom oksitlerinin her ikisi de koruyucudur. Kaplanmış alaşımların *Cr* ve *Al* içeriklerine dikkat edilirse, bu elementlerin içerikleri, nikel esaslı süper alaşımlardaki seviyelerinden çok daha fazladır [12].

**Tablo 5.1 : Birleşik Karbür (UCAR) MCrAlY Kaplamalarının Örnekleri**

UCAR Tasarımı	Kompozisyon						
	Co	Ni	Fe	Cr	Al	Y	Diğerleri
LCO - 7	63			23	13	0,6	
LCO - 22	39	32		21	7,5	0,5	
LCO - 29	73			18	8	0,5	
LCO - 37	44	23		30	3	0,5	
LCO 40	64			28	7,5	0,4	
LN - 11	23	48		17	12	0,3	
LN - 34	0,5	67		20	11	0,5	0,5 Mo
LF - 24			68	24	8	0,5	

Süper alaşım parçaları üzerine *MCrAlY* alaşımlarının kaplanması, bileşen elementlerinin bir veya daha fazlasının oksidasyonu ile yüksek sıcaklıklarda kendilerini korur. Örneğin alüminyum ve krom süper alaşımların yüzeyinde kararlı, oldukça kuvvetli ve kendi kendine iyileşen (self – heading) oksitler oluşturur. Bu yüzey filmleri aşınma, dökülme veya kimyasal atak ile uzaklaştırılmadıkça alaşım kaplamasını korur. Şekil 5.2’ de Vakum Plazma Spey (VPS) tekniği ile kaplanmış süper alaşımın kaplamasının 40000 saat çalıştıktan sonraki durumu görülmektedir [1].



**Şekil 5.2 :** VPS Kaplamanın 40000 çalışma saati sonunda görünümü

Argon korumalı plazma sprej işlemi havacılık, endüstriyel ve makina uygulamaları için kullanılan süper alaşım gaz türbin kanatçıklarını korumada başarı ile kullanılmıştır. Türbin kanatçıkları operasyon çevrimleri sırasında hem yüksek sıcaklık ve hem de sıcak korozyona maruz kalabilir. Genel uygulama, kanatçıkların yaklaşık 75 – 500  $\mu m$  kalınlıkta *MCrAlY* ile kaplanmasıdır [12].

## 6. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

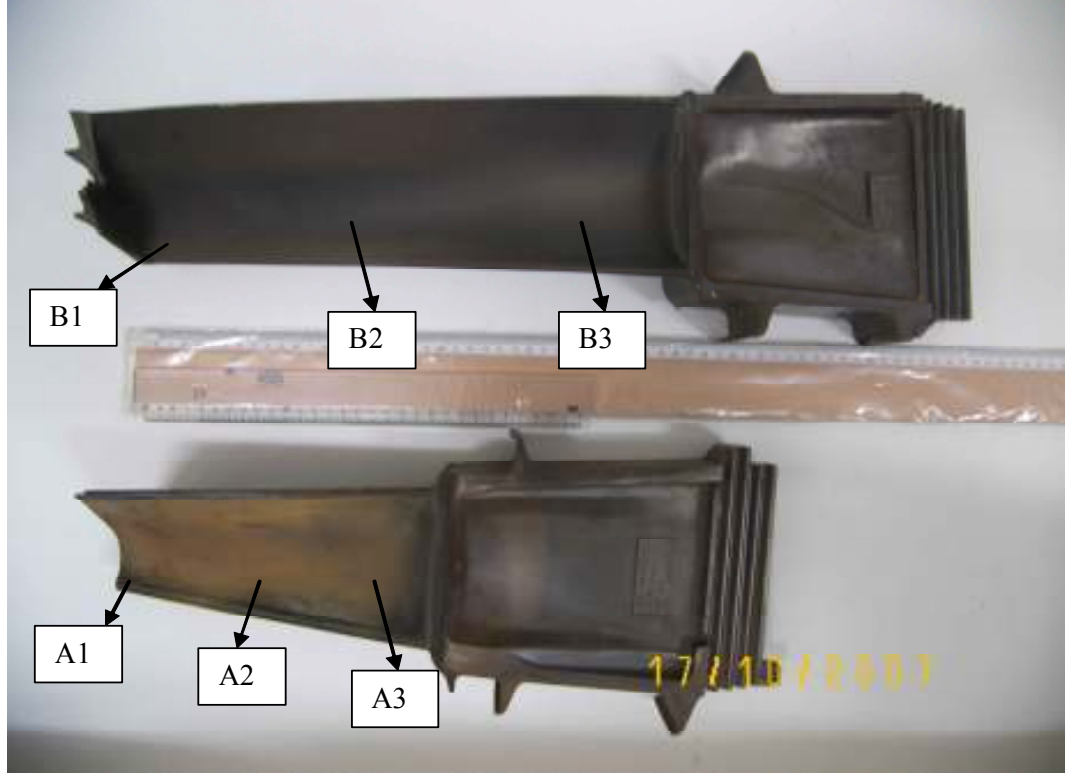
Bu çalışmada elektrik üretiminde kullanılmakta olan endüstriyel gaz türbinlerinin en kritik döner parçalarından olan 1. ve 2. kademe türbin kanatçıklarının 48000 saat çalışma sonunda mikroyapı, kaplama kalınlığı ve mekanik mukavemet özelliklerinde alaşımın servis öncesindeki özelliklerinden ne kadar sapma olduğu incelenmiştir. Bu incelemeler için 1. ve 2. kademe Ni esaslı süper alaşım kanatçıklardan tel erozyon yöntemiyle numuneler kestirilmiş, bu iki kademe servis şartlarında oluşmuş olan mikroyapısal değişiklikler birbirleriyle ve servis öncesi şartlarla mukayese edilmiştir.

### 6.1 Deneylerde Kullanılan Hammaddeler ve Teçhizatlar

Deneyel çalışmalarda Şekil 6.1’de görülmekte olan General Elektrik firmasının ürettiği 9E tipi endüstriyel gaz türbinlerinde yaklaşık olarak 48000 saat çalıştıktan sonra makinanın planlı büyük bakımında hizmet dışı bırakılmasına karar verilen 1. ve 2. kademe kanatçıkları kullanılmıştır.

**Tablo 6.1 :** Deneylerde Kullanılan Ni esaslı GTD 111 Süper Alaşımının Kimyasal İçeriği

Bileşen	Ağırlık Yüzdesi%
Cr	13,5
Co	9,5
Ti	4,75
W	3,8
Al	3,3
Ta	2,7
Mo	1,53
Fe	0,23
C	0,09
B	0,01
Ni	Kalan



**Şekil 6.1 :** Türbin kanatçıkları

A1, A2, A3 ve B1, B2 B3 noktalarından kesilen numuneler, Şekil 6.2’de gösterilen parlatma cihazı (Lam Plan MM 8027) ile metalografik incelemeler için parlatılmış ve yine Şekil 6.2’de gösterilen sıcak bakalite alma cihazı (Lam Plan 8008) kullanılarak bakalite alınmıştır.



**Şekil 6.2 :** Parlatma ve bakalite alma cihazları

Numuneler bakalite alındıktan sonar Şekil 6.3’te görülmekte olan CAMECA SX-100 marka Elektron MikroProb Analiz (EPMA) Cihazı ile incelemeler yapılmıştır. EPMA tekniğinde oldukça kararlı (akım yoğunluğu, hızlandırma voltajı ve sabit

demet çapı) bir elektron demetinin numuneye gönderilmesi sonucunda meydana gelen demet-numune etkileşimiyle açığa çıkan karakteristik x-ışınlarının dalga boylarına sınıflandırılmasıyla elementel analiz yapılır. EDS tekniğine göre çok daha yüksek hassasiyette kalitatif ve tam kantitatif analiz yapabilme yeteneği mevcuttur.



**Şekil 6.3 :** Elektron MikroProb Analiz (EPMA) Cihazı

Numunelerin sertlik ölçümleri Şekil 6.4’te görülmekte olan Struers marka cihazda gerçekleştirilmiştir



**Şekil 6.4 :** Sertlik Ölçüm Cihazı

## 6.2. Deneylerin Yapılışı

GE firmasının ürettiği 9E tipi endüstriyel gaz türbinlerinde yaklaşık olarak 48000 saat çalıştıktan sonra makinanın planlı büyük bakımında hizmet dışı bırakılmasına karar verilen 1. ve 2. kademe kanatçıkları kullanılmıştır. Nikel esaslı süper alaşım GTD 111’den imal edilmiş olan bu kanatçıkların kimyasal içerikleri Tablo 6.1’de verilmiştir. Şekil 6.1’de görülmekte olan A1, A2, A3, B1, B2 ve B3 noktalarından tel erozyon yöntemiyle kesilerek kanatçık gövdelerinden çıkarılan numuneler şekil



6.2’de gösterilen parlatma cihazı (Lam Plan MM 8027) ile metalografik incelemeler için parlatılmış ve yine Şekil 6.2’de gösterilen sıcak bakalite alma cihazı (Lam Plan 8008) kullanılarak bakalite alınmıştır. Bakalite alınan numuneler, Şekil 6.3’de gösterilen EPMA cihazında görüntü alınabilmesi için iletkenliklerinin artırılması amacıyla Bal-Tec marka kaplama cihazı kullanılarak altın ile kaplanmıştır. Sertlik ölçümleri Struers marka Şekil 6.4’de gösterilen sertlik ölçüm cihazında gerçekleştirilmiştir.

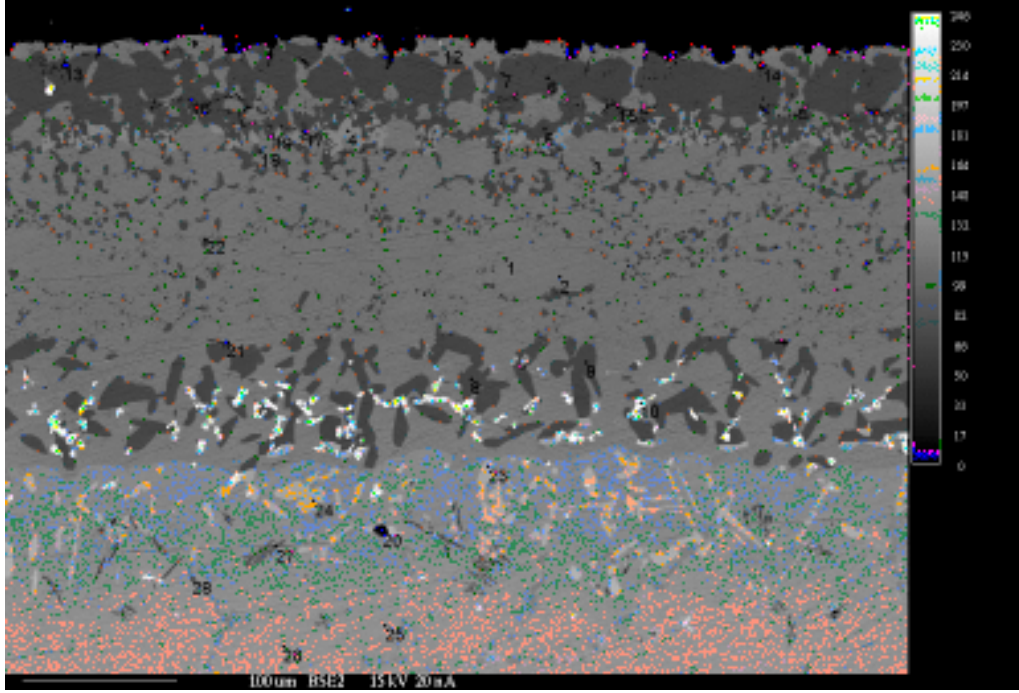
## 7. DENEY SONUÇLARI

### 7.1 Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:

A ve B kanatçıkları sırasıyla 1. ve 2. kademe kanatçıkları simgelemektedir. Şekil 6.1'de gösterilen bölgelerden tel erozyon yöntemiyle kesilen numunelerin kaplamalarında oluşan mikro yapı değişiklikleri incelenmiştir. Bu amaçla kanatçıkların uç, orta ve alt bölgelerinden kesilen, sırasıyla A1, A2, A3, B1, B2 ve B3 numuneleri EPMA cihazı ile analiz edilmiştir. Kimyasal analizleri yapılan noktalar bölüm içerisindeki şekillerde görülmektedir. Bu noktalara ait tüm kimyasal analiz sonuçları ekler bölümünde verilmiştir.

#### 7.1.1 A1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:

A1 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.1'de verilmiştir. Bu analiz neticesinde görüntülenen farklı fazların kantitatif değerlendirilmesi ise EPMA-WDS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerler ekler bölümündeki Tablo A.1'de gösterilmiştir. 2. kademe kanatçıga oranla daha yüksek sıcaklıklara maruz kalmış olan 1. kademe üst bölgesinden kesilerek alınan A1 numunesinde kaplama içerisine altlık malzemedan (GTD 111) yüksek oranda nikel geçmiş olduğu görülmüştür. Kaplamada  $\sigma$  (Cr, Co) intermetalik fazına kaplamanın en üst bölgesinde 11 ve 12 numaralı noktalarda rastlanmıştır. Aluminid ve CoCrAlY bölgelerinde bulunan  $\beta$ - (Co,Al) fazının yerini yüksek oranda  $\gamma$ - (Co,Ni) fazının aldığı görülmüştür. A1 numunesinde Şekil 7.1'de görülmekte olan 5, 6 ve 7 numaralı noktalarda yaklaşık ağırlıkça % 43 oranında Nikel olduğu belirlenmiştir. CoCrAlY bölgesinde bulunan 22 numaralı noktada ise süreksiz alüminyum oksit oluşumuna rastlanmıştır (iç oksitlenme). Bu oluşum, kaplamada bulunan aluminid tabakasının oksitlenmeyi önlemekte yetersiz kaldığının bir göstergesidir.

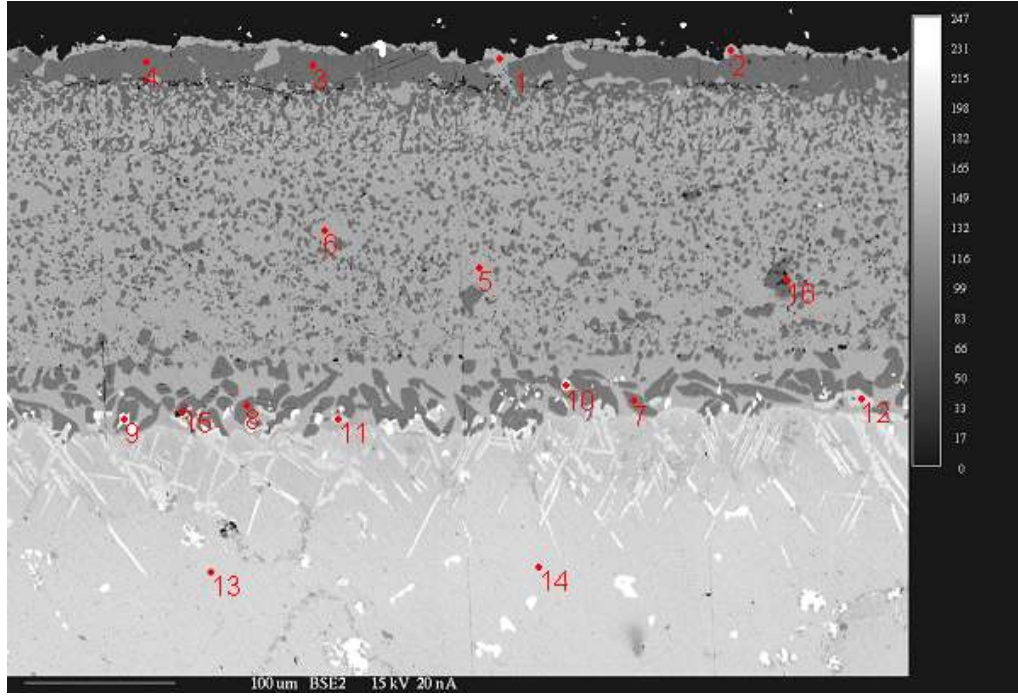


Şekil 7.1 : A1 numunesinin geri saçılmalı elektron mikroskobu görüntüsü

### 7.1.2 A2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:

A2 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.2’de verilmiştir. Şekil üzerinde görülmekte olan noktalar, elementel analizlerin yapıldığı noktalardır. Bu analiz neticesinde görüntülenen farklı fazların kantitatif değerlendirilmesi ise EPMA-WDS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerlerin tamamı ekler bölümünde Tablo A.2’de görülmektedir.

1. kademe kanatçık üzerinde orta bölgeden alınan A2 numunesinde Şekil 7.2’de görülmekte olan kaplamanın en üst bölgesindeki 1 ve 2 noktalarında yaklaşık ağırlıkça % 31 oranında Cr olduğu görülmüştür. Bu noktalarda  $\sigma$  (Cr, Co) fazı tespit edilmiştir. 3 ve 4 numaralı noktalarda ise ağırlıkça % 40 oranında nikel olduğu tespit edilmiştir. A2 numunesinde de aluminid bölgesine yüksek miktarda nikel geçişi ve  $\beta$ - (Co,Al) fazının yerini  $\gamma$ -fazının (Co,Ni) aldığı görülmüştür. Uç bölgeden alınan A1 numunesine oranla A2 numunesinde daha az iç oksitlenme ve daha dar bir ara difüzyon bölgesi olduğu görülmektedir.

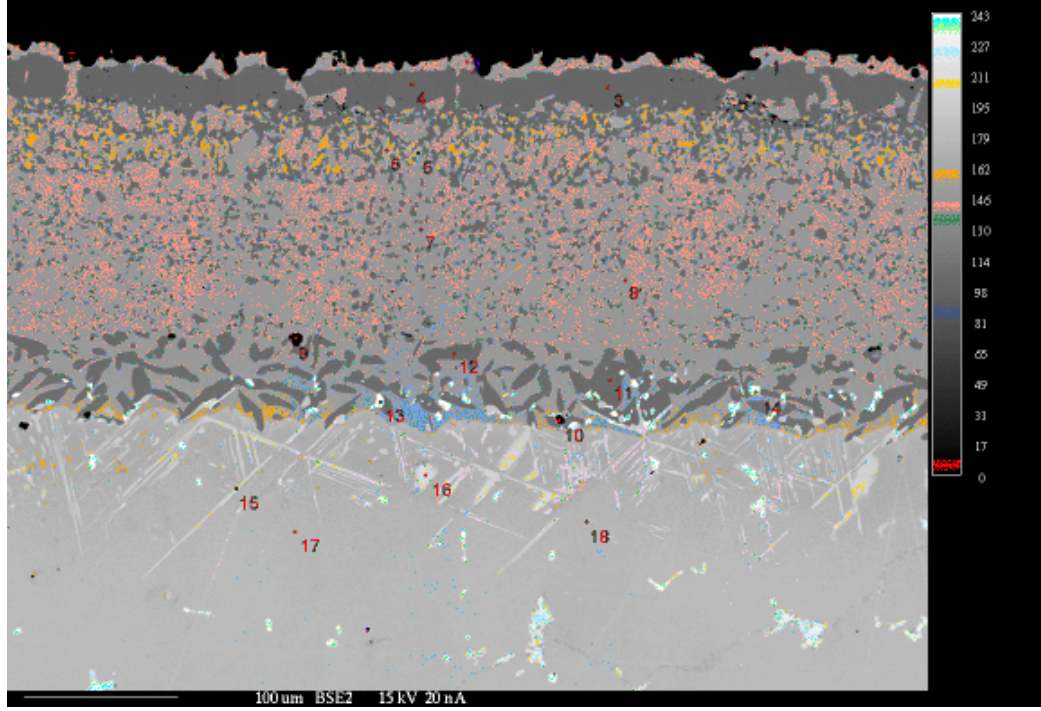


Şekil 7.2 : A2 numunesinin geri saçılmalı elektron mikroskobu görüntüsü

### 7.1.3 A3 Numunesinin noktasal elementel analiz sonuçları

A3 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.3’de verilmiştir. Şekil üzerinde görülmekte olan noktalar, elementel analizlerin yapıldığı noktalardır. Bu analiz neticesinde görüntülenen farklı fazların kantitatif değerlendirilmesi ise EPMA-WDS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerlerin tamamı ekler bölümünde Tablo A.3’de görülmektedir.

1. kademe kanatçığın alt bölgesinden alınan A3 numunesinde şekil 7.3’te gösterilen 3 ve 4 numaralı noktalarda sırasıyla ağırlıkça % 29 ve % 30 oranlarında nikel saptanmakla beraber bu noktalarda ağırlıkça %16 Al varlığı da tespit edilmiştir. Bunun  $\beta$ -(CoAl) fazının  $\gamma$ -fazına (Co, Ni) dönüşme oranının A1 ve A2 numunelerine oranla daha az olduğunu gösterdiği düşünülmektedir. En üst bölgede bulunan 1 ve 2 numaralı noktalarda ise sırasıyla % 4 ve % 8 alüminyum bulunmakla beraber, yoğunlukla  $\sigma$  (Cr, Co) fazı tespit edilmiştir.

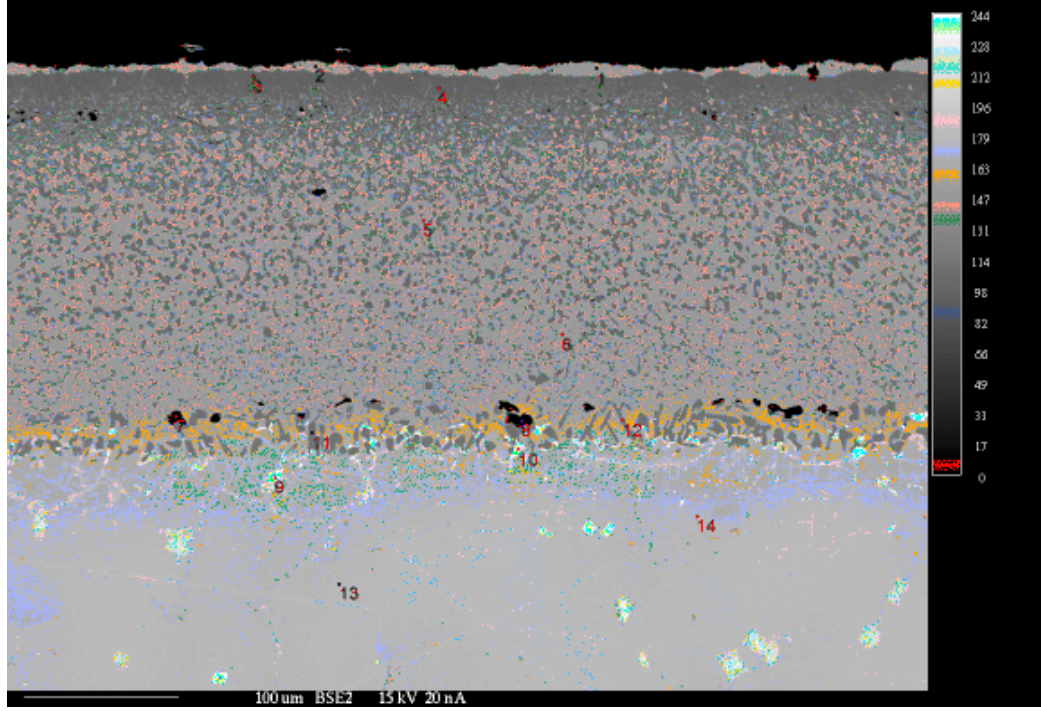


Şekil 7.3 : A3 numunesinin geri saçılmalı elektron mikroskobu görüntüsü

#### 7.1.4 B1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:

B1 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.4’de verilmiştir. Şekil üzerinde görülmekte olan noktalar, elementel analizlerin yapıldığı noktalardır. Bu analiz neticesinde görüntülenen farklı fazların kantitatif değerlendirilmesi ise EPMA-WDS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerlerin tamamı ekler bölümünde Tablo A.4’de görülmektedir.

1. kademe kanatçık numunelerine oranla daha düşük sıcaklıklara maruz kalan 2. kademe kanatçığının B1 numunesinde Şekil 7.4’te görülmekte olan 3 ve 4 numaralı noktalarda ağırlıkça % 13 oranında nikel olduğu görülmüştür. Buna karşılık ağırlıkça % 23 oranında alüminyum tespit edilmiş olması  $\beta$ -(CoAl) fazının  $\gamma$ -fazına (Co, Ni) dönüşme oranının A1, A2 ve A3 numunelerine oranla daha az olduğunu göstermektedir. Şekil 7.4’te görülen 1 ve 2 noktalarında yüksek Cr ve Co varlığı  $\sigma$  (Cr, Co) fazının varlığını göstermektedir. Bu noktalarda nikel ağırlıkça % 4 oranında tespit edilmiştir.

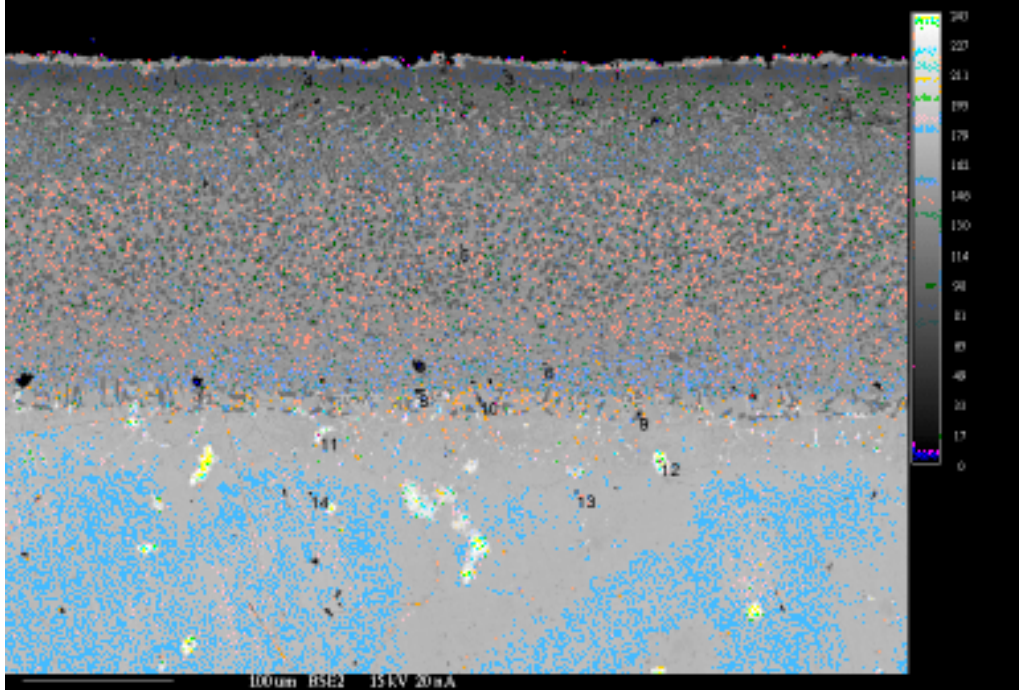


Şekil 7.4 : B1 numunesinin geri saçılmalı elektron mikroskobu görüntüsü

#### 7.1.5 B2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:

B2 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.5’de verilmiştir. Şekil üzerinde görülmekte olan noktalar, elementel analizlerin yapıldığı noktalardır. Bu analiz neticesinde görüntülenen farklı fazların kantitatif değerlendirilmesi ise EPMA-WDS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerlerin tamamı ekler bölümünde Tablo A.5’de görülmektedir.

B2 numunesinde Şekil 7.5’te görülmekte olan 3 ve 4 numaralı noktalarda sırasıyla ağırlıkça % 3 ve % 8 oranlarında nikel olduğu görülmüş, bu noktalardaki alüminyum oranı sırasıyla % 26 ve % 28 olarak tespit edilmiştir. Bu bölgelerde  $\beta$ - (CoAl) fazının  $\gamma$ -fazına (Co, Ni) dönüşme oranının oldukça az olduğu görülmüştür. B2 numunesinde kaplamanın en üst bölgesinde bulunan 1 ve 2 numaralı noktalarda ağırlıkça % 70 mertebelerinde Co ve % 29 mertebelerinde Cr bulunması bu bölgede  $\sigma$  (Cr, Co) fazının oldukça yoğun bulunduğunu göstermektedir.

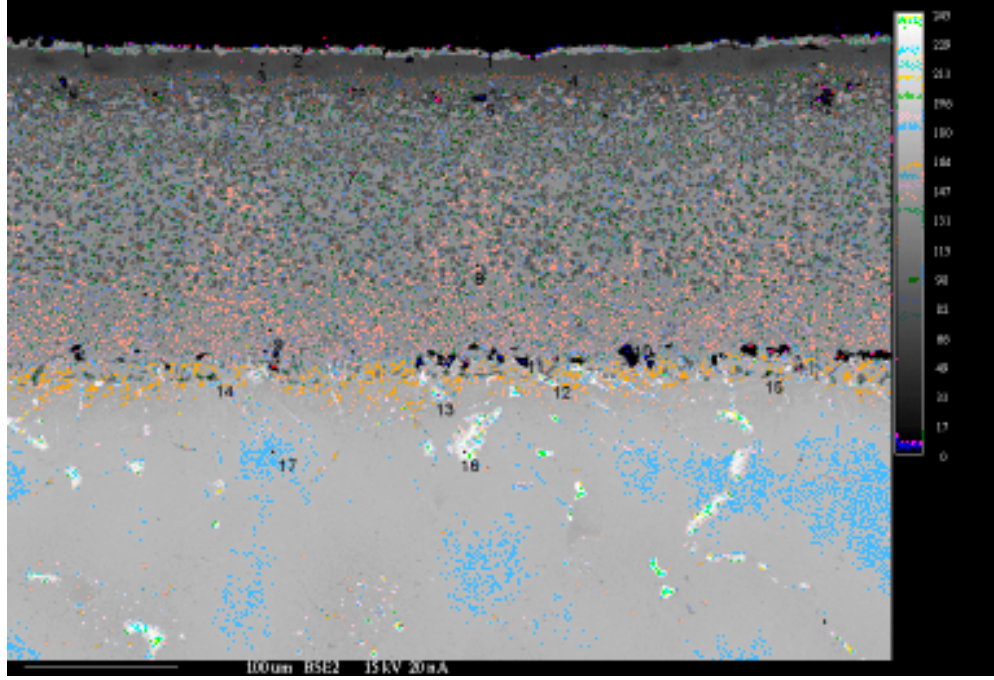


Şekil 7.5 : B2 numunesinin geri saçılmalı elektron mikroskobu görüntüsü

#### 7.1.6 B3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları:

B3 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.6'da verilmiştir. Şekil üzerinde görülmekte olan noktalar, elementel analizlerin yapıldığı noktalardır. Bu analiz neticesinde görüntülenen farklı fazların kantitatif değerlendirilmesi ise EPMA-WDS cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Bulunan değerlerin tamamı ekler bölümünde Tablo A.6'da görülmektedir.

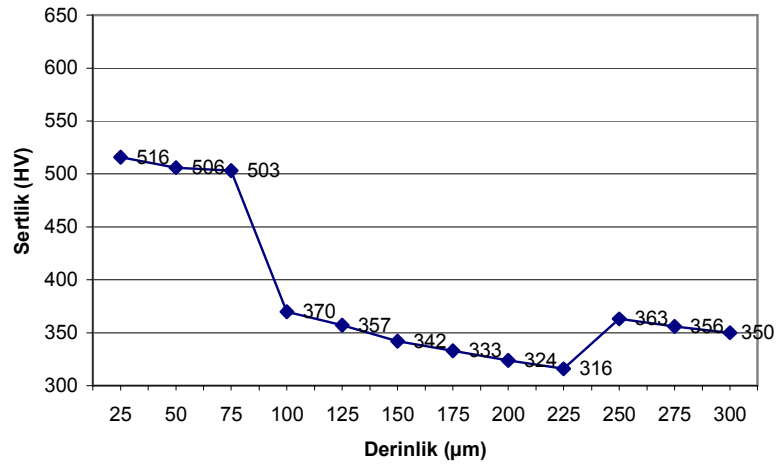
2. kademe kanatçığın alt bölgesinden alınan B3 numunesinde şekil 7.6'te gösterilen 1 ve 2 numaralı noktalarda ağırlıkça % 62 oranında Co ve % 28 oranında Cr varlığı tespit edilmiştir. B2 numunesi gibi B3 numunesi de bu bölgede oldukça yoğun  $\sigma$  (Cr, Co) fazı içermektedir. Bununla beraber 1, 2, 3 ve 4 numaralı noktaların tamamında nikel oranı ağırlıkça %2'nin altında ölçülmüştür. Bu durum, bu bölgelerde  $\beta$ -(CoAl) fazının  $\gamma$ -fazına (Co, Ni) dönüşme oranının oldukça az olduğu göstermektedir. 3 ve 4 numaralı noktalarda alüminyum oranları sırasıyla ağırlıkça % 16 ve %17 olarak saptanmıştır.



Şekil 7.6 : B3 numunesinin geri saçılmalı elektron mikroskobu görüntüsü

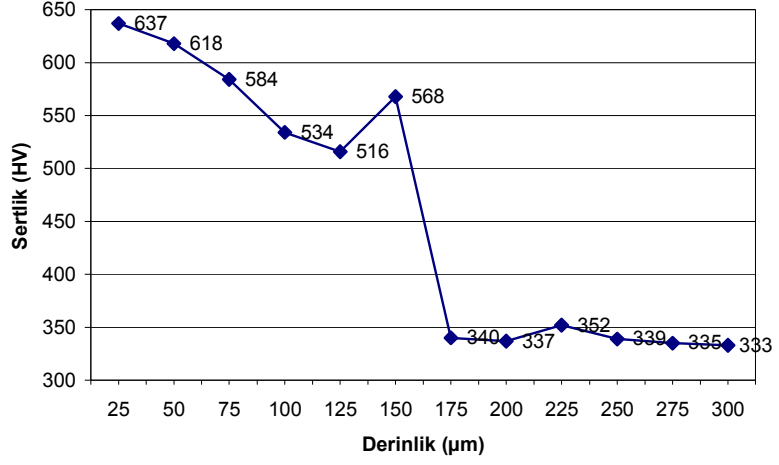
## 7.2 Sertlik Ölçüm Sonuçları

Her numune için (A1, A2, A3, B1, B2, B3) kaplama dış yüzeyinden altlık malzemeye doğru ilerlemek suretiyle 12 noktadan sertlik ölçümleri alınmıştır. Kaplamadan derinlere doğru her seferinde yaklaşık  $25\mu\text{m}$  ilerlenmiştir. Ölçümler vickers sertlik ölçüm ucu ile (HV) 1 kg'lık yük kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

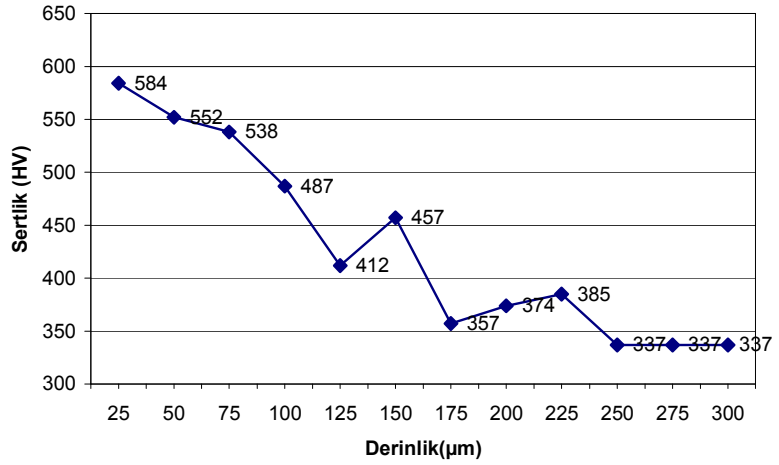


Şekil 7.7 : A1 sertlik ölçüm sonuçları

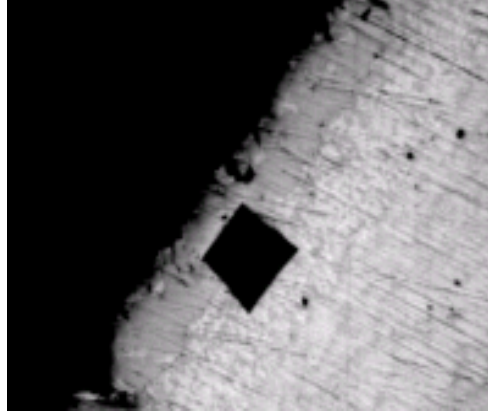




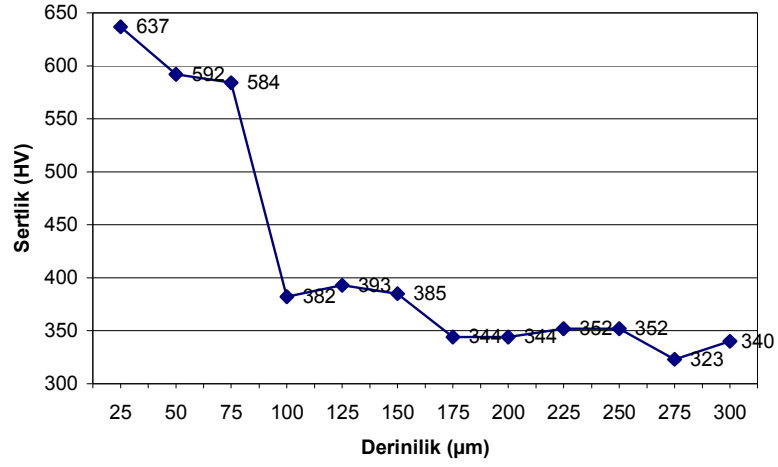
Şekil 7.8 : A2 sertlik ölçüm sonuçları



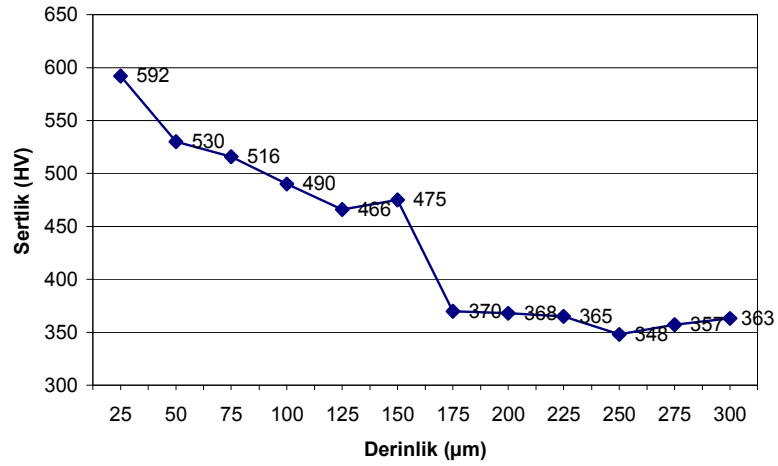
Şekil 7.9 : A3 sertlik ölçüm sonuçları



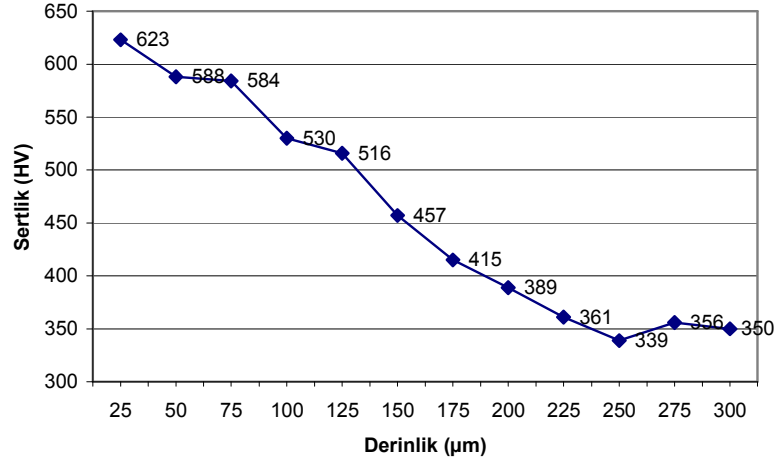
Şekil 7.10 : B1 kaplama sertlik ölçüm noktası optik mikroskop görüntüsü



Şekil 7.11 : B1 sertlik ölçüm sonuçları



Şekil 7.12 : B2 sertlik ölçüm sonuçları



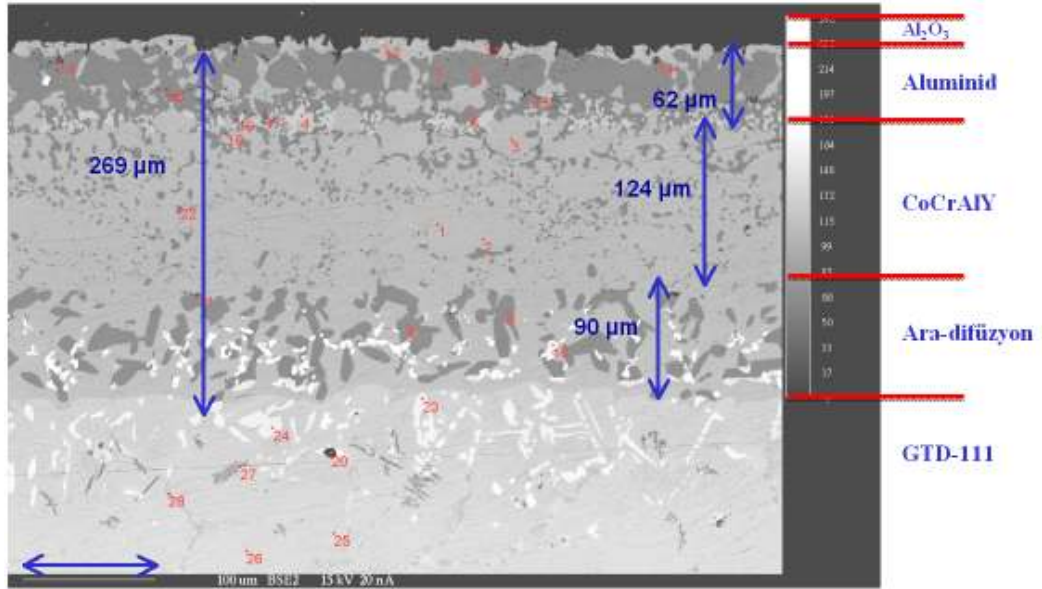
Şekil 7.13 : B3 sertlik ölçüm sonuçları

Her iki kademe için de kaplamadan altlık metale (GTD 111) inildikçe sertlikte düşme olduğu görülmüştür. Ara difüzyon tabakasının olduğu noktalarda gerek intermetalik gerekse karbür yapılarının mevcudiyeti dolayısıyla sertlikte artış meydana geldiği görülmüştür. Daha yüksek sıcaklıklarda çalışmış olan 1. kademe kanatçık numunelerinin (A1, A2, A3) sertliklerinin 2. kademe kanatçık numunelerine (B1, B2, B3) oranla daha düşük olduğu görülmüştür.

### 7.3 Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları

#### 7.3.1 A1 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları

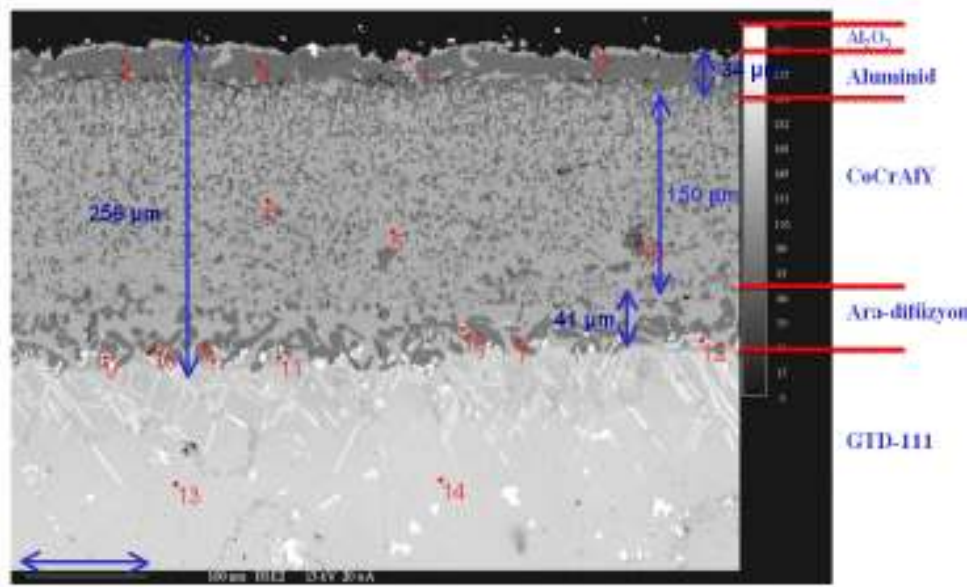
1. kademe kanatçığın üst bölgesinden alınmış olan A1 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.14’de görülmektedir. Bu şekil üzerinde toplam kaplama kalınlığı 269  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür. Kaplamada GTD-111 nikel esaslı süperalaşım üzerinde  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve Aluminid bölgesi, CoCrAlY bölgesi ve ara-difüzyon bölgesinin varlığı tespit edilmiştir.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve aluminid bölgesi arasında Al konsantrasyonununca fakir  $\sigma$  (Cr, Co) ve yüksek oranda  $\gamma$  katı çözelti fazına (Co,Ni) fazı tespit edilmiştir. Aluminid ve CoCrAlY bölgelerinde olması gerekli tek fazlı  $\beta$  (CoAl) katı çözeltilsinin oldukça seyrek olduğu görülmektedir. CoCrAlY/Ara-difüzyon bölgelerinin oranı 1.37 olarak bulunmuştur. Kaplamanın koruma özelliğini kaybetmesinin önemli bir göstergesi olan ara-difüzyon tabakası genişliği 90  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.



Şekil 7.14 : A1 Numunesi kaplama kalınlıkları

### 7.3.2 A2 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları

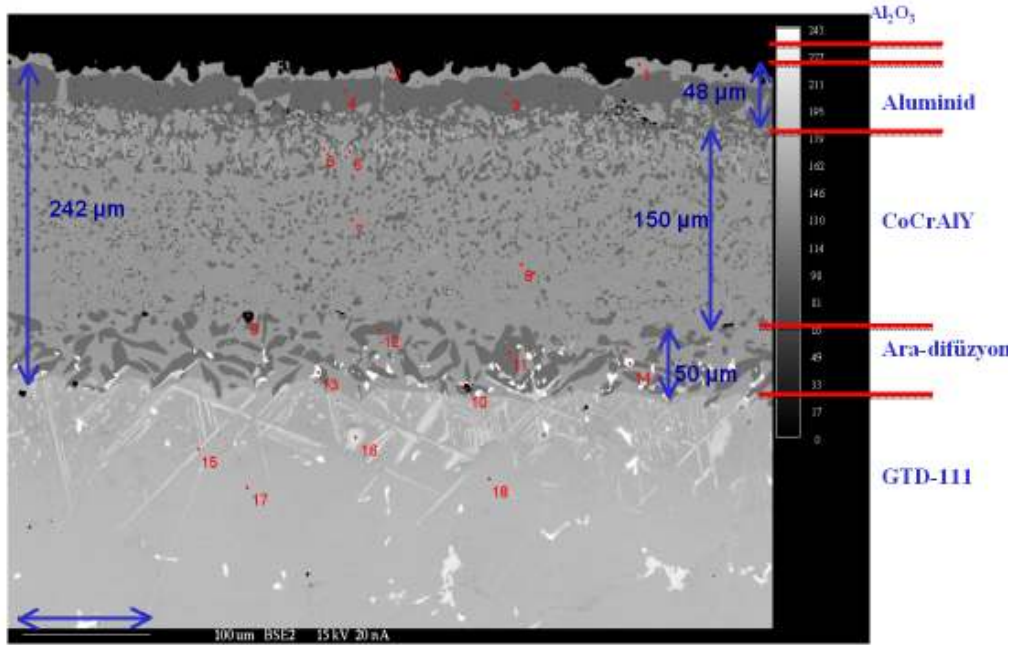
1. kademe kanatçığın orta bölümünden alınmış olan A2 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri sağılnalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.15’de verilmiştir. Bu şekil üzerinde toplam kaplama kalınlığı 256 µm olarak ölçülmüştür. Kaplamada GTD-111 nikel esaslı süperalaşım üzerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Aluminid bölgesi, CoCrAlY bölgesi ve ara-difüzyon bölgesinin varlığı tespit edilmiştir. Aluminid bölgesinde olması gerekli tek fazlı β (CoAl) yerine Ni etkileşimi sonucu (Co, Ni) katı çözeltilisi görülmüştür. CoCrAlY kaplama bölgesinde β (CoAl) çökeltilerinin A1 numunesine oranla daha yoğun olduğu görülmektedir. Kaplamanın koruma özelliğini kaybetmesinin önemli bir göstergesi olan ara-difüzyon tabakası 44 µm olarak ölçülmüştür. A1 numunesine oranla çok daha dardır. CoCrAlY/Ara-difüzyon bölgelerinin oranı 3.65 olarak bulunmuştur.



Şekil 7.15 : A2 Numunesi kaplama kalınlıkları

### 7.3.3 A3 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları

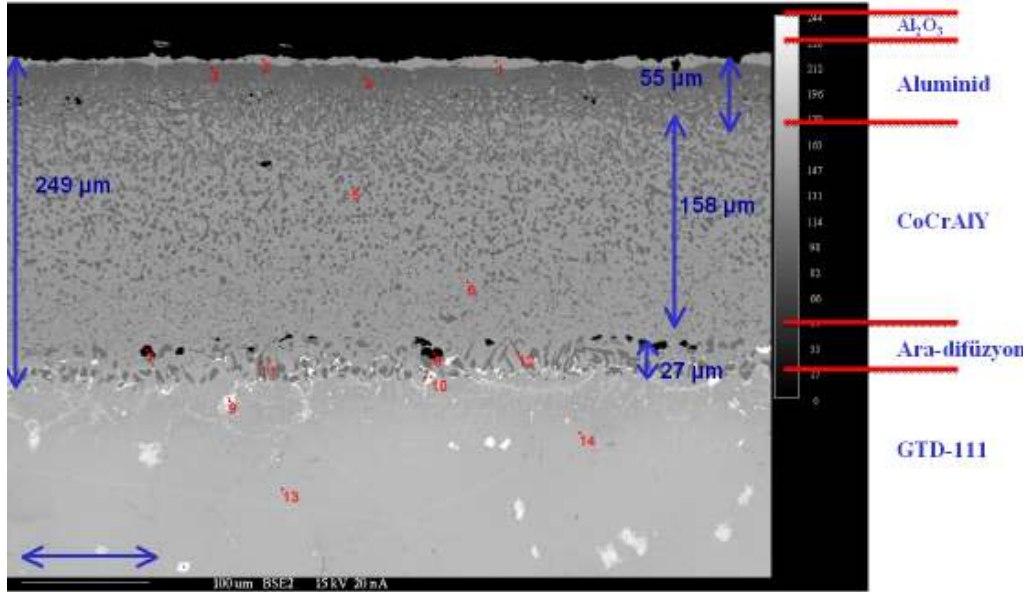
1. kademe kanatçıĝın alt bölümünden alınmış olan A3 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.16'da verilmiştir. Bu şekil üzerinde toplam kaplama kalınlığı 242 µm olarak ölçülmüştür. Kaplamada GTD-111 nikel esaslı süperalaşım üzerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Aluminid bölgesi, CoCrAlY bölgesi ve ara-difüzyon bölgesinin varlığı tespit edilmiştir. Ara-difüzyon tabakası 50 µm olarak hesap edilmiştir. CoCrAlY/Ara-difüzyon bölgelerinin oranı 3.00 olarak bulunmuştur. Aluminid bölgesinde olması gerekli tek fazlı β (CoAl) yerine Ni etkileşimi sonucu (Co, Ni) katı çözeltilisi görülmüştür. CoCrAlY kaplama bölgesinde β (CoAl) çökeltilerinin Al'den daha yoğun, A2'den daha seyrek olduğu görülmüştür.



Şekil 7.16 : A3 Numunesi kaplama kalınlıkları

### 7.3.4 B1 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları

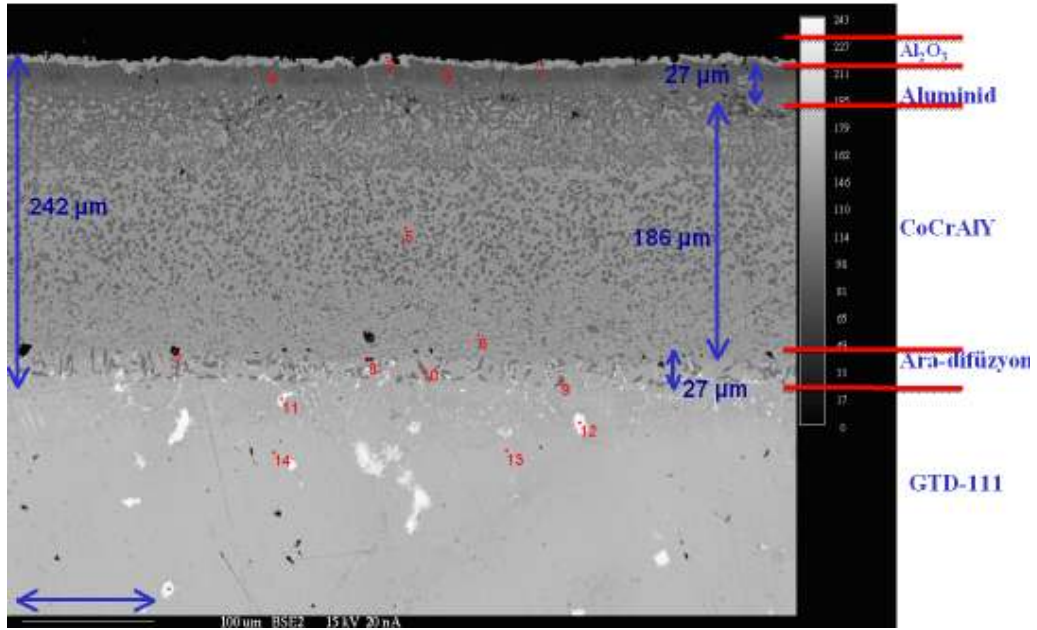
2. kademe kanatçığın üst bölümünden alınmış olan B1 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.17’de görülmektedir. Bu şekil üzerinde toplam kaplama kalınlığı 249  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bölgesinin altında bulunan aluminid bölgesinde Al konsantrasyonunun A1, A2 ve A3 numunelerine oranla daha yüksek olduğunun bir göstergesi olarak daha sürekli bir aluminid bölgesi tespit edilmiştir. Aluminid bölgesinde beklendiği şekilde tek fazlı  $\beta$  (CoAl) katı çözeltisi görülmüştür. CoCrAlY kaplama bölgesinde  $\beta$  (CoAl) çökeltilerinin oldukça yoğun olduğu gözlenmiştir. Ara-difüzyon tabakasının 1. kademe kanatçıktan alınan A numunelerine oranla daha ince olduğu görülmüştür. CoCrAlY/Ara-difüzyon bölgelerinin oranı 5.85 olarak hesap edilmiştir.



Şekil 7.17 : B1 Numunesi kaplama kalınlıkları

### 7.3.5 B2 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları

2. kademe kanatçığın orta bölümünden alınmış olan B2 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.18'de görölmektedir. Bu şekil üzerinde toplam kaplama kalınlığı 242 µm olarak ölçölmüştür. Kaplamada GTD-111 nikel esaslı süperalaşım üzerinde Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Aluminid bölgesi, CoCrAlY bölgesi ve ara-difüzyon bölgesinin varlığı tespit edilmiştir. Ara-difüzyon tabakası 27 µm olarak hesap edilmiştir. Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ve Aluminid bölgesi arasında Al ve Ni konsantrasyonununca fakir (Cr,Co) katı çözelti fazı tespit edilmiştir. Aluminid bölgesinde tek fazlı β (CoAl) katı çözeltisi görölmüştür. CoCrAlY kaplama bölgesinde β (CoAl) çökeltilerinin oldukça yoğun olduğu gözlenmiştir. Ara-difüzyon tabakasının daha ince olduğu görölmüştür. CoCrAlY/Ara-difüzyon bölgelerinin oranı 6.8 olarak hesap edilmiştir.

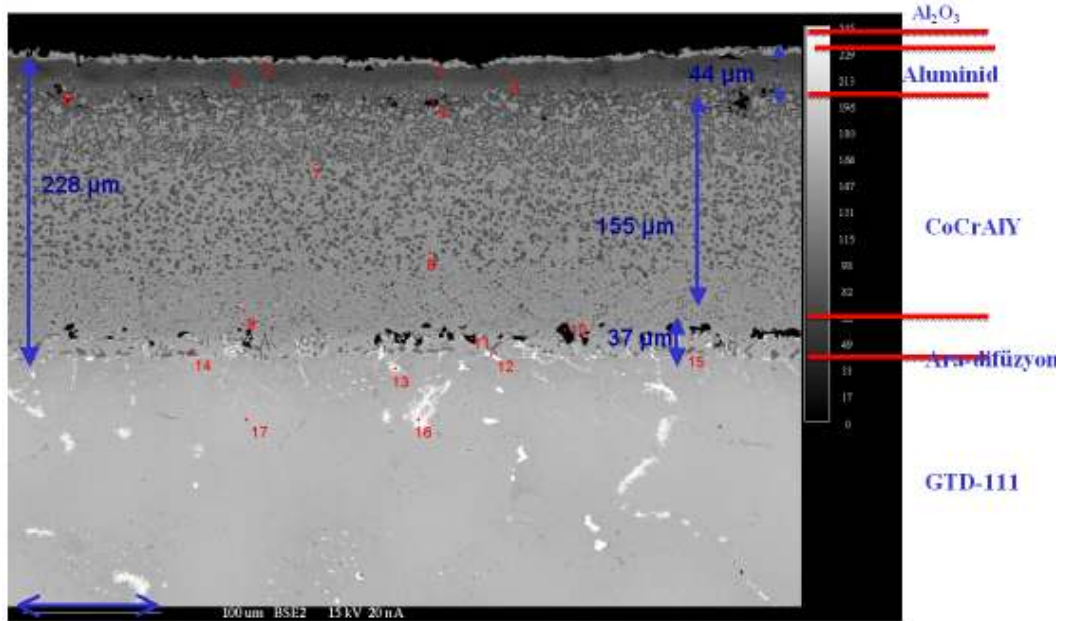


Şekil 7.18 : B2 Numunesi kaplama kalınlıkları



### 7.3.6. B3 Numunesi Kaplama Kalınlık Ölçüm Sonuçları

2. kademe kanatçığın alt bölümünden alınmış olan B3 numunesinin EPMA analiz cihazıyla çekilmiş geri saçılmalı (backscattered) elektron mikroskobu görüntüsü Şekil 7.19'da görülmektedir. Bu şekil üzerinde toplam kaplama kalınlığı 228  $\mu\text{m}$  olarak ölçülmüştür.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  bölgesinin altında bulunan aluminid bölgesinde Al konsantrasyonunun 1. kademe kanatçıktan alınan numunelere oranla daha yüksek olduğunun bir göstergesi olarak sürekli bir aluminid bölgesi tespit edilmiştir. Aluminid bölgesinde beklendiği şekilde tek fazlı  $\beta$  (CoAl) katı çözeltisi görülmüştür. CoCrAlY kaplama bölgesinde  $\beta$  (CoAl) çökeltilerinin en yoğun olduğu numune B3 numunesidir. Ara-difüzyon tabakasının 1. kademe kanatçıktan alınan A numunelerine oranla daha ince olduğu görülmüştür. CoCrAlY/Ara-difüzyon bölgelerinin oranı 4.19 olarak hesaplanmıştır.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve Aluminid bölgesi arasında Al ve Ni konsantrasyonununca fakir (Cr,Co) katı çözelti fazı tespit edilmiştir. Ara difüzyon tabakasının son derece ince olduğu görülmüştür.



Şekil 7.19 : B3 Numunesi kaplama kalınlıkları

## 8. GENEL SONUÇLAR VE ÖNERİLER

- 1) General Elektrik şirketi tarafından üretilmiş 9E tipi endüstriyel gaz türbininde 48000 saat görev yapmış GTD 111 altlık malzeme üzerine GT-29 in+ kaplı 1. ve 2. kademe kanatçıklar incelenmiş, kanatçık kaplamalarında farklı bölgelerde değişen oranlarda bozulmalar tespit edilmiştir.
- 2) Kaplamalarda bozulma, üst aluminid ve CoCrAlY kaplama bölgesinde bulunan  $\beta$ -(Co,Al) fazının  $\gamma$ -fazına (Co,Ni) dönüşmesi ve CoCrAlY tabakası ile GTD 111 altlık arasındaki ara-difüzyon tabakasının genişlemesi ile ispat edilmiştir.
- 3) 1. kademe türbin kanatçığında aluminid bölgesinde bulunan  $\beta$ -(Co,Al) fazına yüksek oranda Ni geçişi olmuştur. Kanatçığın uç, orta ve alt kısımlarından alınan A1, A2 ve A3 numunelerinde yüksek Ni konsantrasyonları görülmüştür. A1, A2 ve A3 numunesinde Ni konsantrasyonları sırasıyla % 43.6, % 40.7 ve % 29.9 olmuştur. 2. kademe türbin kanatçığında aluminid bölgesindeki  $\beta$ -(CoAl) fazının içerisinde Ni konsantrasyonu 1. kademe kanatçığa göre daha azdır. B1, B2 ve B3 numunelerinde Ni konsantrasyonlarının sırasıyla ağırlıkça % 4.2, %3.4 ve % 1.95 olduğu görülmüştür.
- 4) Kaplama bozulmasının bir göstergesi olan ara difüzyon tabakası genişliğinin artması 1. kademe kanatçık numunelerinde daha belirgin şekilde gözlenmiştir. Ara-difüzyon tabakası genişlikleri A1, A2 ve A3 numuneleri için sırasıyla 90  $\mu\text{m}$ , 44  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  iken bu değerler B1, B2 ve B3 numuneleri için 27  $\mu\text{m}$ , 27  $\mu\text{m}$  ve 37  $\mu\text{m}$  olmuştur.
- 5) Kaplama bozulmasının diğer bir göstergesi olan CoCrAlY bölgesinde  $\beta$ -(CoAl) çökeltilerinin çözünüp seyrelmesi 1. kademe türbin kanatçık numunelerinde daha yoğun gözlenmiştir.
- 6) 1. kademe kanatçık numunelerine oranla daha düşük sıcaklıklara maruz kalan 2. kademe kanatçıklarda altlık malzemedan geldiği düşünülen Ni aluminid bölgesinde en fazla ağırlıkça % 13 oranında görülmüştür. Bununla beraber 2. kademe kanatçıklarda aluminid bölgesinde ağırlıkça % 23'e varan oranlarda alüminyum

tespit edilmiş olması  $\beta$ -(CoAl) fazının  $\gamma$ -fazına (Co, Ni) dönüşme oranının A1, A2 ve A3 numunelerine oranla daha az olduğunu göstermektedir.

7) 1. kademe kanatçığın alt bölgesinden alınan A3 numunesinde aluminid bölgesinde ağırlıkça % 29 - 30 oranlarında nikel saptanmakla beraber bu noktalarda ağırlıkça %16 Al varlığı da tespit edilmiştir. Bunun  $\beta$ -(CoAl) fazının  $\gamma$ -fazına (Co, Ni) dönüşme oranının A1 ve A2 numunelerine oranla daha az olduğunu gösterdiği düşünülmektedir. Bu numunede kaplamanın üst bölümünde  $\sigma$  (Cr, Co) fazının görüldüğü noktalarda ağırlıkça % 4 – 8 oranlarında alüminyum bulunduğu görülmektedir. Bu sonuç 1. kademe kanatçığın alt bölümünde kaplamanın durumunun daha iyi olduğunu göstermektedir.

8) Yukarıdaki bilgiler ışığında daha yüksek sıcaklıklara maruz kalan 1. kademe kanatçık kaplamasının 2. kademe kanatçık kaplamasına oranla daha yüksek bozulma sergilediği gözlenmiştir.

9) Sertlik değerleri her iki türbin kanadı için de kaplamanın dış yüzeyinden altlık malzemenin içine doğru azalmakla beraber ara difüzyon tabakasının olduğu noktalarda gerek intermetalik gerekse karbür yapılarının mevcudiyeti dolayısıyla sertlikte artış meydana geldiği görülmüştür.

10) Bu çalışmanın devamı olarak, türbin kanatçık kaplamalarında oluşan hasarın SEM ve TEM görüntüleriyle analiz edildiği bir çalışma yapılması düşünülebilir. Kaplama tabakalarının kalınlık oranlarından yola çıkılarak kanatçık çalışma sıcaklığı hesabı yapılabilir. Gaz türbini bakım ve işletmesinde hayati öneme sahip olan kanatçık ömür tespiti ve tamir/değiştirme kararları konusunda yöntemler geliştirilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] **Schilke, P.W.**, 2004. Advanced Gas Turbine Materials and Coatings, GE Energy Schenectady, NY.
- [2] **Boyce, M. P.**, 2006. Gas Turbine Engineering Handbook, 3<sup>rd</sup> ed., 429-497, Gulf Professional Publishing, Elsevier, Oxford.
- [3] **TEİAŞ Genel Müdürlüğü APK Dairesi Başkanlığı** 2006, Türkiye Elektrik Üretim İletim İstatistikleri, <http://www.teias.gov.tr>
- [4] **Eroğlu, İ.**, 2007. Hidrojen Enerji Sistemi, ODTÜ Kimya Mühendisliği Bölümü Hidrojen Eğitim Semineri, Ankara, 2-3 Haziran.
- [5] **Eyice, S.**, 1976. Gaz Türbini Tesisleri, Özarkadaş Matbaası, İstanbul.
- [6] **Çetinkaya, S.**, 1999. Gaz Türbinleri, Nobel Yayın Dağıtım Ltd Şti, Ankara
- [7] **Erdem, H.H., Sevilgen, H.S., Akkaya, A.V., Çetin, B.**, 2004. Gaz Türbinlerinin Kısmi Yüklerdeki Birim Elektrik Üretim Maliyetinin Analizi, *Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, İstanbul **2005/1** 123-132
- [8] **Eyice, S.**, 1982. Gaz Türbinleri Hesap ve Konstrüksiyonları, Ankara Devlet Mimarlık Mühendislik Akademisi Yayın No.5, Ankara
- [9] **Erickson, G.L.**, 1990. Polycrystalline Cast Superalloys in *Metals Handbook 10th*. Ed. Vol 1, pp 981-994. ASM International Hand. Comm., Ohio
- [10] **Barbosa, C., Nascimento, J.L., Caminha, I.M.V., Abud, I.C.**, 2005. Microstructural Aspects of The Failure Analysis of Nickel Base Superalloys Components , *Journal of Engineering Failure Analysis*, **12-2005**, 348-361.
- [11] **Baig G.C., Kim, I.S., Kim, H.D., Chang, Y.J.**, 2007. Temperature Dependence of MC Decomposition Behaviour in Ni Based Superalloy GTD 111, *Journal of Materials Science Engineering, A* **478**, 329-335.
- [12] **Erdoğan, M.**, 2000. Mühendislik Alaşımların Yapı ve Özellikleri, Nobel Yayın Dağıtım Ltd Şti, Ankara

- [13] **Sajjadi, S. A., Nategh, S., Guthrie, R. I. L.,** 2001. Study of Microstructure and Mechanical Properties of High Performance Ni – Base Superalloy GTD 111, *Journal of Materials Science Engineering, A* 325, 484-489

**EKLER**

**Tablo A.1 : A1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları**

A1-1	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.2437								
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0003	0.0372		27.1538	2.2990	37.6617	0.2577	14.9168	
A1-2	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.3012		0.0078	0.4752	0.7242	0.6246			
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0333		24.6820	1.9120	40.5635	0.2843	17.0834	0.2806
A1-3	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0221	0.4454	0.6227				0.0764
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0491	0.0549	25.4019	1.8734	41.8484	0.0228	16.2386	0.1129
A1-4	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0374	0.0064	0.2306	0.7882			0.0701
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0064	0.0443		49.6341	0.7869	39.7599	0.0130	7.6018	3.0375
A1-5	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0355	0.0159	3.1593				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0024	0.0363		7.5135	22.3321	33.8818		42.8983	
A1-6	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.6981			3.0875					0.0856
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0480	0.0076	6.9875	22.7689	34.1670	0.2391	43.5524	
A1-7	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0069	3.1686					0.0460
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0398		7.1264	22.5410	33.1590	0.1020	43.0990	
A1-8	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.5695	0.0440	0.0076	3.3813					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0062	0.0508		7.0558	21.7044	29.6328	0.1819	47.5803	
A1-9	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0187	3.2677					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0377	0.0144	6.9296	21.9515	29.7286	0.2352	47.7581	
A1-10	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	17.9483		0.0065	27.5610	0.7536	51.0075	2.1814	0.1535	0.1838
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0067		0.0176	1.0600		1.8698	1.1560	1.3916	6.1479
A1-11	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.3460	0.0584		0.4290	6.6623				0.0893
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0045	0.0568		26.9545	2.2226	46.2523	0.1035	17.6125	0.0045
A1-12	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0512		0.0065	0.4617	0.6592				0.1081
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0118	0.0491		26.7565	2.1717	46.2400	0.2156	17.5595	
A1-13	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	20.1090	0.2051	0.0273	4.7810				0.0495	0.0077
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0516	0.0900	2.2767	39.8988	7.6829	25.8589	11.8815	

**Tablo A.1 : A1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları(Devamı)**

A1-14	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	21.4982	0.1579	0.0265	5.2335	0.0445			0.0602	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0013	0.0258		2.8435	39.0163	9.1614	13.8678	10.0129	
A1-15	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	16.8397	0.3489	0.0083	1.1500	1.6600				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.1141	0.0071	6.4741	8.2176	19.1549	1.3584	21.6962	
A1-16	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		3.1187		1.7673					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0031	0.0506	0.0264	6.0112	29.9745	23.5824		26.9525	
A1-17	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.6650	0.1273		2.4060	2.2536	2.1283			0.1540
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
			5.9053	28.5730	22.3964	15.2369	28.1681		
A1-18	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		2.4688		0.4762	0.5057				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0302	0.0528	16.8475	21.6454	29.5402	13.1049	16.4438	
A1-19	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	3.4876	0.2596		2.0532	0.0405				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0058	0.0261	0.0019	5.9222	28.3801	21.7527	0.5743	28.6572	
A1-20	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	34.1422		0.1610	8.0627	0.2028				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0456	0.1091	0.2509	2.0149	3.4076	4.8078	0.7361	65.4909	
A1-21	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.9901	0.6472	0.0103	6.6615	0.0208	3.4189			0.2244
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0053	0.0261	0.0053	5.2048	29.9476	8.8644	4.6027	5.0147	0.1403
A1-22	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	4.7565	0.0320	0.0128	1.8926	0.9447				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0026	0.0600	0.0126	5.0644	45.6089	6.5778	33.2826	3.4937	0.7911
A1-23	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.4357	0.0021	0.0197	0.3342	5.6030			0.1281	0.1417
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
			44.8776	0.4683	30.1083	0.0231	10.8411	6.8486	
A1-24	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	2.2801		0.0026	0.3985	0.3500			0.1395	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0122		47.1921	0.5043	32.1680	0.1216	11.6812	7.4679
A1-25	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.8618			0.0530	2.6363				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0030	0.0188		9.8291	4.8376	9.1505	0.2052	72.1186	
A1-26	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.8182		0.0163	4.0750	2.1437			0.0982	0.2166
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0050	16.4726	3.4371	11.3220	0.2947	64.8303		
A1-27	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.2685		0.0051	0.5637	0.5894		0.1601	0.0535	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0111	0.0213	0.0085	59.5572	0.4789	4.5971		25.3202	2.5408
A1-28	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	8.4686		0.0117	0.4099	6.6528			0.0453	0.0266
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0006			71.3437	0.0808	3.1429		6.7733	6.7142

**Tablo A.2 : A2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları**

A2-1	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0058	0.4586	0.7159				0.2481
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0663	0.0139	31.1623	2.9499	50.4729	0.1336	18.6724	
A2-2	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0277		0.0072	0.4728	0.7317				0.0764
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0421		31.0151	3.2390	50.6139	0.0979	18.7533	
A2-3	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0211	0.0097	3.2969					0.0593
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0033	0.0514		7.8533	21.9612	33.6686	0.2396	40.7327	
A2-4	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.0240		0.0214	3.3038					0.1851
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0003	0.0665		7.9793	22.2784	34.0206	0.2027	39.8339	
A2-5	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.5993	0.0364		0.5134	0.5770				0.0064
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0017	0.0441		31.5929	2.9954	50.9389	0.1326	19.0253	
A2-6	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0448	0.0150	0.5111	0.4889				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0073	0.0479		31.0663	2.9060	49.8010	0.1877	19.8447	
A2-7	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.0901		0.0250	3.8155					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0095	0.0523	0.0044	7.3485	21.3977	28.3155	0.2861	46.5738	
A2-8	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0424	0.0014	3.4406	0.0231				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0012	0.0517		7.1723	21.5212	27.5496	0.2895	46.4211	
A2-9	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	16.6884		0.0575	28.6072	0.2934	54.1438	1.1098	0.0801	0.1970
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0419	0.0363	0.0331	1.6446		2.3456	1.9121	1.7975	2.5043
A2-10	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	16.7525		0.0463	22.5669	0.4316	45.1128	0.3588	0.1316	0.2105
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0066	0.0880	0.0181	6.3984	0.2444	8.3522	0.9470	4.7513	3.5232
A2-11	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.6507		0.0296	0.5785	5.3228			0.1985	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0234	0.0452	46.8305	0.4665	29.9704			12.8076	7.7635
A2-12	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0216	0.4481	5.4952			0.1274	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0372	0.0231	47.7080	0.5194	30.2860	0.0780	11.1344	7.4435
A2-13	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.2237		0.0386	5.9402	1.2033			0.1612	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0012	0.0147	0.0223	12.0575	4.9392	11.2590	0.3460	67.7467	
A2-14	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.1453		0.0041	5.4063	1.7029			0.1369	0.1366
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0161	8.4112	4.9604	12.9780	0.3734		63.4542	
A2-15	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	30.1536	0.0218	0.9362	3.3371			2.3730		0.1342
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.7617	0.5218	1.0116	8.7524	6.9194	14.3489	4.2538	13.9439	
A2-16	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	28.3728	0.0323	1.1179	3.6872			2.2371		0.1032
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.8990	0.6592	1.0571	8.7429	7.4628	13.8276	4.2290	13.3117	



**Tablo A.3 : A3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları**

A3-1	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.1178	0.0190	0.5467					0.0064
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
A3-2		0.0773	0.0197	25.0267	4.8943	55.1383	0.0002	15.1522	
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.1465		0.6179	0.0844				0.0257
A3-3	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0621	0.0126	21.5104	8.2684	50.2202	0.0001	18.3153	
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
A3-4		0.0669	0.0178	2.1327					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0448		7.5498	16.5307	39.8547	0.2714	29.8662	
A3-5	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.5120	0.0130	1.9109				0.0693	0.0846
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
A3-6		0.0577		7.6455	16.4538	41.0314	0.3091	30.0947	
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0080	0.2855		0.1539	2.1330			
A3-7	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
			0.0278	49.8374	0.6145	42.8629		4.8686	1.8769
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
A3-8		0.0006	0.6385	0.0116	0.2026	1.8073			
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0045	0.0225		49.9270	0.5827	41.5819		4.9283
A3-9				49.9270	0.5827	41.5819		4.9283	1.9858
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.1648	0.2231	0.0032	0.3078	0.3704			0.0253
A3-10	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0050	0.0514		30.7456	1.8457	56.8476	0.0950	13.2710
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
A3-11		0.1352	0.3220	0.0117	0.2706	0.3009			0.1074
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0775	0.0163	29.6497	1.8370	56.7075	0.1786	13.9807	
A3-12	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.3414		0.0354	0.7328	0.1553	39.6399		0.2557
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
A3-13		0.0136	0.0078	2.0404	0.1968	6.0408	47.9698	6.1327	0.2249
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.7300	0.4567	0.0055	2.5917	0.3515			0.1220
A3-14	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0098	0.0279	0.0209	17.1911	21.3453	22.7285	30.0320	8.1096
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
A3-15		0.0364		3.0584					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0442	0.0159	6.6326	15.5423	32.7165	0.3813	37.2271	
A3-16	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.1440		0.0260	3.3712				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
A3-17		0.0441		6.7036	15.5546	32.8002	0.3403	36.5766	
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		9.6787		0.0229	24.0749	3.6810	45.9764	5.3253	0.1326
A3-18	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
			0.0049	1.2526		1.7042	0.6816	1.1353	8.1929
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
A3-19		10.2337		0.0235	26.3571	3.4376	46.5819	8.1442	0.2909
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
			0.0133	0.9985		1.7915	1.2432	1.1857	6.3341
A3-20	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0094		0.0327	0.4037	6.5679			0.1555
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
A3-21			0.0517	47.2251	0.1941	27.9703		11.0527	7.0457
	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0054		0.0427	0.8759	6.4718			0.2185
A3-22	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0134		0.0070	44.9252	0.4137	29.6406		11.8659
								7.8961	

**Tablo A.3 : A3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları(Devamı)**

A3-17	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.1816			5.9084	1.6049			0.0125	0.1692
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0235	12.6504	2.9958	10.6565	0.0770	56.3384		
A3-18	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.3330		0.0314	2.4632	2.6029			0.0592	0.1430
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0046		0.0208	20.6046	1.8068	11.9578	0.1099	52.4716	

**Tablo A.4 : B1 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları**

B1-1	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.0165	0.0371		0.0569					0.0251
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0860	0.0116	26.6192	1.8637	59.8751	0.1204	4.2343		
B1-2	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0673	0.0808	0.0167	0.0118					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0867		25.5774	1.8757	57.6924	0.0258	4.0822	0.1032	
B1-3	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.6092		0.0034	0.2101					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0881		7.9001	23.6615	51.9339	0.6530	13.6154		
B1-4	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
				0.1697					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0077	0.0649	7.9187	23.4265	51.7750	0.0005	13.7360		
B1-5	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0516	0.0511		0.1777					0.1010
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0017	0.0623	0.0069	26.2967	3.2597	56.1898	0.1090	6.9628	
B1-6	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.2487	0.3174		0.2837	0.2429				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0406	0.0081	30.2002	1.8931	50.0998	0.1028	11.9345	0.1170	
B1-7	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	8.5325	0.0915	0.0964	0.8363	0.0155				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0251	0.0463	0.8700	57.8758	1.2921	22.1417	1.3489	0.0305	
B1-8	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0424	0.0152	0.6973	0.1082				0.0775
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0115	0.0161	0.0028	1.0797	57.3840	1.4144		1.6668	
B1-9	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	8.3664		0.0007	24.0168	0.7751	48.9799	3.0896		0.2737
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0079	0.0275	1.3738		2.7863	0.5888	1.8812		
B1-10	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	9.3345		0.0057	26.3244	3.6230	45.6779	3.7228		0.6914
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0109		0.0105	0.5340		0.5263	0.8176	1.9222	3.7119
B1-11	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.6237	0.0248	0.0152	3.0829					0.0528
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0502		6.2608	19.5543	28.8349	0.5126	38.5581		
B1-12	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	5.3487			3.2317					0.0132
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0365	0.0165	6.0384	19.6355	27.2988	0.3027	40.0496		
B1-13	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0041	5.4880	1.6684			0.0081	0.0066
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0070		0.0187	14.6195	3.4643	10.5737	0.1233	62.7806	
B1-14	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0163	3.8126	2.2948			0.0333	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
			0.0546	16.8037	3.4819	11.2660	0.0543	61.6832	

**Tablo A.5 : B2 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları**

B2-1	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.1627		0.0225	0.0118					0.1070
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0111	0.0998		32.5733	2.0678	70.6139	0.3763	2.1074	
B2-2	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.6766	0.0027	0.0071	0.0453					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0790		32.9939	1.5629	67.9034	1.2845	1.9886	
B2-3	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.7767	0.0176		0.0128	0.6493				0.0583
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0024				26.0075	61.5753	0.4417	3.3965	0.0371
B2-4	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.5403	0.0373		0.1066					0.0656
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0885	0.0020	9.2050	27.8845	65.6410	0.4647	8.4215	
B2-5	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0275	0.0173	0.2707					0.1700
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0706	0.0266	26.8680	3.1416	61.8637		8.1718	
B2-6	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.4967	0.0868		0.3952					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0090	0.0792	0.0356	25.1642	4.3532	60.1484	0.1556	8.4481	
B2-7	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	3.1752	0.1146	0.0579	2.6601	0.0291	0.2944			
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0081	0.0480	0.0134	4.6894	36.0371	4.2433	40.6495	2.0206	
B2-8	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.9280	0.3223	0.0523	1.7539	0.0405				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0314	0.0339	0.0476	3.9765	37.8996	4.0457	39.7085	2.3294	
B2-9	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.2525		0.0062	2.5046					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0033	0.0397	0.0148	5.1079	16.0135	29.0803	0.4264	39.4700	
B2-10	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
		0.0266	0.0035	2.2423					0.0524
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0412		4.7524	16.3287	26.0850	0.0011	42.8973	
B2-11	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	22.1993		0.0291	14.6706	1.9103	19.9730		0.1773	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0018		0.0190	9.0524	1.6541	7.6307	2.5063	21.5223	4.9705
B2-12	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	9.5512			25.4726	2.4531	46.4160		0.2522	0.2626
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0398		0.8631		1.7263	2.5341	2.2657	4.6905
B2-13	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0047	2.9270	1.9115			0.0798	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0047		0.0188	15.5765	2.2404	7.7193	0.0012	59.1660	
B2-14	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0040	4.0132	2.2766				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0012		0.0493	17.1731	1.8507	11.4387	0.0016	53.7624	

**Tablo A.6 : B3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları**

B3-1	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	1.2157	0.0543							
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0863	0.0035	29.5607	0.9713	61.9016	0.3838	1.4970		
B3-2	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.9756			0.0352					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0006	0.0693		28.5929	0.6324	62.1711	0.0125	1.4378	
B3-3	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0929		0.0197						0.2429
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0873		5.5406	15.9098	58.7209	0.4913	1.9520	
B3-4	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.6361	0.0360	0.0014						
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0018	0.0809	0.0453	4.8521	17.0490	60.8868	0.3962	1.0133	
B3-5	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	37.4821	3.0911	0.0593	0.2193					0.0130
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0030	0.0716	0.0732	7.4109	16.3055	48.1590	4.0590	5.3507	
B3-6	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	10.0896	0.1464	0.0040	0.0827					0.0580
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
		0.0715	0.0043	23.7046	9.9725	50.6273	1.7095	3.2820	
B3-7	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.1862	0.4223	0.0140		0.1723				
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0141	0.0665	0.0296	46.2462	0.8710	43.6500	0.0585	1.1128	
B3-8	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0241	0.2868		0.3030					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0042	0.0587	0.0403	26.2053	2.9891	56.7150		6.1927	
B3-9	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0039	0.0888	0.0058	0.1215					0.0692
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0086	0.0518		28.2002	1.4044	56.2646		6.4063	
B3-10	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	5.1860		0.1336	1.5072					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0112	0.0485	0.0349	5.4024	13.4890	27.0103	0.4227	29.8327	
B3-11	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	15.8276		0.0755	2.9020					0.0655
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0094	0.0523	0.0068	6.0601	12.3342	23.5458	7.5997	29.7544	
B3-12	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	15.2477		0.0050	23.4508	2.6178	47.5784		0.3091	0.2427
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0124		0.0361	0.8254		1.5174	0.6312	0.7502	7.2305
B3-13	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	9.3620		0.0136	25.1046	2.0637	47.3940	3.6094	0.1985	0.1642
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0050			0.5072		0.8885	0.7893	1.0903	6.1051
B3-14	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.2295	0.0180		2.4951					
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0006	0.0376	0.0045	5.1791	13.9275	26.9799	0.3358	33.9205	
B3-15	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
				2.6279					0.0784
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
	0.0027	0.0259		5.7555	14.2674	29.9709	0.0004	30.3941	
B3-16	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
	0.0037			23.7852	2.9639	46.9734		0.1883	0.3525
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
			0.0032	0.6647		0.3914	0.4798	1.7694	7.0214

**Tablo A.6 : B3 Numunesinin Noktasal Elementel Analiz Sonuçları(Devamı)**

B3-17	C	Y	Cl	Ti	Mo	Ta	N	Zr	V
			0.0074	4.1650	2.0418			0.0338	
	K	S	Na	Cr	Al	Co	O	Ni	W
				13.9291	1.8978	9.5669	0.0005	48.5351	

## **ÖZGEÇMİŞ**

1976 yılında Adana'da doğmuştur. Ortaokul ve lise öğrenimini Adana Anadolu Lisesi'nde tamamladıktan sonra 1994 yılında İ.T.Ü. Kimya-Metalürji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü'ne girmiştir. 1999 yılında Metalurji ve Malzeme Mühendisi olarak mezun olduktan sonra aynı yıl İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Seramik Mühendisliği Programında yüksek lisans öğrenimine başlamıştır. Halen General Elektrik Şirketi Enerji Hizmetleri Türkiye satış organizasyonunda çalışmaktadır.