

## GAZ TÜRBİNLİ MOTORLARIN İMALATI VE ONARIMINDA KULLANILAN GELİŞMİŞ İŞLEME YÖNTEMLERİ

**Arş. Grv. Serdar DALKILIÇ,**  
Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu  
2 Eylül Kampüsü, 26470 ESKİŞEHİR  
sdalkilic@anadolu.edu.tr

**Yrd. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ**  
Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu  
2 Eylül Kampüsü, 26470 ESKİŞEHİR  
atanatmi@anadolu.edu.tr

### ÖZET

Gaz türbinli motorlardaki oldukça güç çalışma şartlarından dolayı, belirli bir süre sonra parçalar kopabilir, servis limitlerinin altında aşınabilir ya da parçalarda çatlaklar oluşabilir. Bu parçaların bir kısmı yenisi ile değiştirilirken, bir kısmı da özel tekniklerle onarılır. Kullanılan tekniklerin bir grubunu da gelişmiş işleme yöntemleri oluşturmaktadır. Metal işleme endüstrisinde takım tezgahları geleneksel (tornalama, frezeleme, taşlama vb.) ve gelişmiş olmak üzere ikiye ayrılır. Bu çalışmada Elektrokimyasal İşleme (ECM), Elektriksel Deşarjla İşleme (EDM), Elektrokimyasal Taşlama (ECG) ve Lazer Işınıyla İşleme (LBM) gibi gelişmiş işleme yöntemleri tanıtılmış, avantaj ve dezavantajları belirtilmiş ve gaz türbinli motorlarda onarım işlemi olarak uygulama alanları verilmiştir. Ayrıca Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan F-16 savaş uçaklarında kullanılan ve General Electric firması tarafından üretilen F110-GE-100/129 turbofan motorlarına, Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Jet Revizyon Müdürlüğü'nde uygulanan yenileme işlemleri sayesinde elde edilen kazanımlara örnekler verilmiştir.

**Anahtar Sözcükler:** Gelişmiş işleme yöntemleri, elektrokimyasal işleme (ECM), elektriksel deşarjla işleme (EDM), elektrokimyasal taşlama (ECG), lazer ışınıyla işleme (LBM).

### ABSTRACT

Due to the hard working conditions in the gas turbine engines, after a certain time parts may break off, may worn out of service limits or may crack. While some of these parts are replaced with new ones, some are repaired with special techniques. Advanced methods of machining are a group of the techniques used in repair. In metal machining industry, workbenches are divided into two groups: traditional (lathing, boring, grinding etc.) and advanced. In this study advanced methods of machining like Electrochemical Machining (ECM), Electro Discharge Machining (EDM), Electrochemical Grinding (ECG) and Laser Beam Machining (LBM) are introduced, advantages and disadvantages are stated and applications on gas turbine engine repair are given. Also some examples of benefits gained by part renewal operations applied by Eskişehir 1<sup>st</sup> Air Support and Maintenance Center to F110-GE-100/129 turbofan engines which powers F-16 fighter of Turkish Air Force are given.

**Keywords:** Advanced methods of machining, electrochemical machining (ECM), electro discharge machining (EDM), electrochemical grinding (ECG), laser beam machining (LBM).

### GİRİŞ

Gaz türbinli motorlar oldukça yüksek basınç ve sıcaklıklarda son derece güç şartlarda çalışmaktadırlar. Çalışma esnasında parçalar kopabilir, servis limitlerinin altında aşınabilir ya da parçalarda çatlaklar oluşabilir. Revizyon esnasında bu parçalar ya yenileri ile değiştirilir ya da bir takım onarım teknikleriyle eski yapılarına ve boyutlarına tekrar geri getirilerek işlevlerini emniyetli bir şekilde yerine getirmeleri sağlanır.

Modern gaz türbinli motorların maliyeti, motor başına yıllık 50.000 \$'ı [1] aşan yeni yedek parça masrafları

ile milyonlarca doları bulmaktadır. Bu maliyetin büyük bir kısmını türbin sıcak kısmındaki pahalı komponentlerin değişimi oluşturmaktadır. Ayrıca onarım ve revizyon masrafları tek başına yedek parça maliyetleri hariç, motor başına 100.000 \$'ı [1] aşmaktadır.

Bir uçağın kullanım ömrü boyunca maliyetinin (Life Cycle Cost) yaklaşık %30'u motorlara bağlanabilir ve parçanın değiştirilmesi yerine yenilenmesi ile önemli bir maliyet düşüşü sağlanabilir [1]. Bununla beraber yenileme işlemi görmüş komponentler kullanıma verilmeden önce uçuşa elverişlilik açısından kalifiye edilmelidir. Bunun nedeni yenileme işlemleri sonunda

boyutların, titreşim karakteristiklerinin ve komponentlerin mekanik özelliklerinin değişebilmesidir.

Yenileme işlemlerinde kullanılan teknikler kaynak ve sert lehim, koruyucu kaplamalar ve gelişmiş işleme yöntemleri olmak üzere üç ana grupta toplanabilir. Bunların yanında temizleme, kumlama, boyama ve ısı işlemler de kullanılan yardımcı yöntemler arasındadır.

Metal işleme endüstrisinde takım tezgahları geleneksel ve gelişmiş olmak üzere ikiye ayrılır. Tornalama, frezeleme, taşlama gibi geleneksel operasyonlarda elektrik enerjisi mekanik enerjiye dönüştürülür. Daha sonra bu mekanik enerji kesme takımları veya aşındırıcı tanecikler üzerinden iş parçasına uygulanır. Parçaları belirlenen şekil ve boyutta biçimlendirmek için metalin kaldırılmasında, kaldırılan metal talaş oluştururken plastik deformasyona uğrar ve iş parçasında ısı ve gerilmeye neden olur. Gelişmiş yöntemlerde metal, elektrik enerjisinin iş parçasına doğrudan uygulanmasıyla kaldırılır. Bu yöntemler Elektrokimyasal İşleme (ECM), Elektriksel Deşarjla İşleme (EDM), Elektrokimyasal Taşlama (ECG) ve Lazer Işınıyla İşleme (LBM)'dir [2,3,4].

Bu çalışmada yukarıda adı geçen gelişmiş işleme yöntemleri tanıtılmış ve gaz türbinli motorlarda onarım işlemi olarak uygulama alanları verilmiştir. Ayrıca Türk Hava Kuvvetleri envanterinde bulunan F-16 savaş uçaklarında kullanılan ve General Electric firması tarafından üretilen F110-GE-100/129 turbofan motorlarına, Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkezi

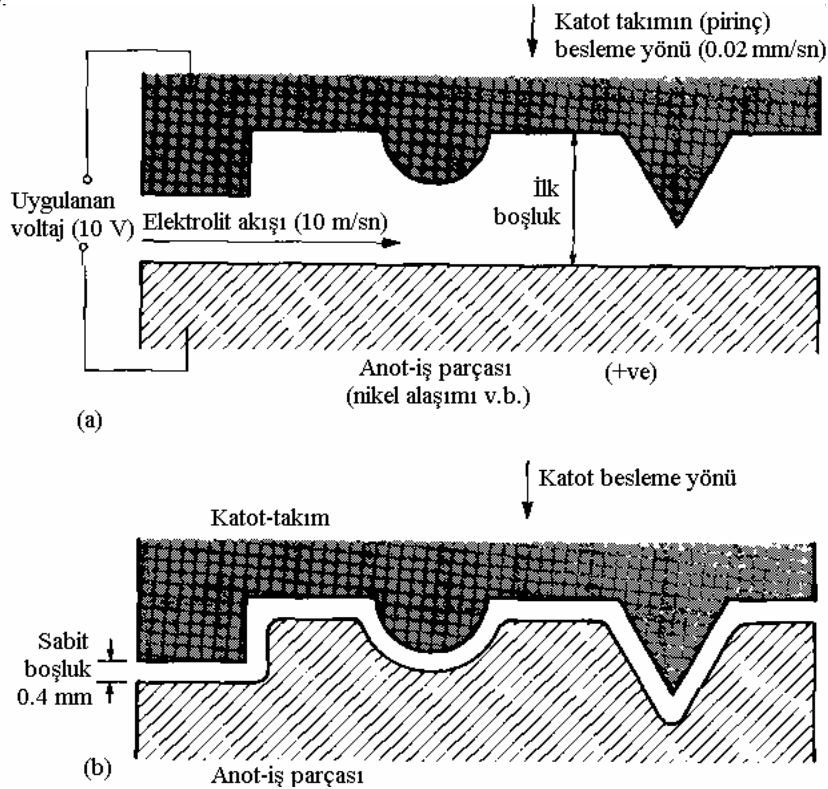
Jet Revizyon Müdürlüğü'nde uygulanan yenileme işlemleri sayesinde elde edilen kazanımlara örnekler verilmiştir.

## 1. ELEKTROKİMYASAL İŞLEME (ECM)

Elektrokimyasal işleme, bir iş parçasının yüzeyinden atomların kaldırılmasına dayanan gelişmiş bir işleme yöntemidir. Bu işleme yönteminde elektroliz teknikleri kullanılır. ECM yönteminde yüksek akım şiddetli ve düşük voltajlı bir doğru akım iş parçası (anot) ile şekillendirilmiş takım (katot) arasından geçirilir. Anodik iş parçası yüzeyindeki metal iyonlarına ayrışır ve böylece takımın şekli iş parçasına kopyalanır. Elektrotlar arasındaki boşluktan akan elektrolit, metal iyonlarını ve oluşan ısıyı kaldırır. Takım iş parçası içine doğru ilerletilerek anot ile katot arasındaki boşluk korunur. Anot metali elektrokimyasal olarak çözüldüğünden, çözünme hızı Faraday Kanunu'na göre sadece atomik ağırlığına, birleşme değerine, geçen akıma ve akımın geçtiği süreye bağlıdır. Çözünme hızı metalin sertliğinden ya da diğer özelliklerinden bağımsızdır. Katotta sadece hidrojen gazı oluştuğundan, bu elektrotun şekli elektroliz boyunca değişmez. Bu özellik ECM'in metal işleme yöntemi olarak kullanılmasındaki en önemli etkidir [5,6,7,8,9,10].

### 1.1. Temel Prensipler

Şekil 1'de görüldüğü gibi iş parçası ve takım bir elektrolit bataryanın anot ve katodunu oluşturur.



Şekil 1. ECM için Katot-Takım ve Anot-İş Parçasının İlk (a) ve son (b) Durumları [6]

Genelde 10-30 V civarlarında sabitlenmiş bir potansiyel fark tatbik edilir. Uygun bir elektrolit seçilir. Böylece elektroliz boyunca katodun şekli değişmez. İşleme ürünlerini temizlemek, katodik gaz oluşumu ve elektriksel ısınma ile yükselen istenmeyen etkilerin azaltılması amacıyla elektrotların arasındaki boşluktan iletkenliği yaklaşık 0.2 W/cm olan elektrolit yaklaşık 3-60 m/s hızla pompalanır. Anotta metal kaldırma hızı yaklaşık olarak elektrotlar arasındaki mesafenin tersiyle orantılıdır. Katodun anoda doğru yaklaşık 0.02-0.03 mm/s'lik bir besleme hızıyla işleme devam etmesi ile elektrotlar arasındaki açıklık sabit bir değere ulaşır. Bu şartlar altında katot şeklinin kabaca simetriği (tamamlayıcısı) anot üzerinde oluşur. Tipik elektrot aralığı 0.025-1.3 mm, ortalama akım şiddeti de 20-300 A/cm<sup>2</sup>'dir [5,6,7,10].

Katot olarak kullanılacak metal elektriksel ve ısı iletkenliğe sahip olmalı, elektrolite karşı kimyasal dirence sahip olmalı ve ECM için gerekli sertliğe ve işlenebilirliğe sahip olmalıdır. Bakır, pirinç, bronz, paslanmaz çelik ve titanyum ECM takımları olarak en çok kullanılan malzemelerdir. Elektriği geçiren neredeyse tüm malzemelerden yapılmış iş parçaları elektrokimyasal olarak işlenebilir. ECM; titanyum, Rene 95, Rene 88 ve IN100 gibi en sert yüksek sıcaklık alaşımlarında bile etkin bir şekilde kullanılabilir [10,11,12].

Elektrolit anot ile katot arasında devreyi tamamlayan iletken bir sıvıdır. Elektrolitler temelde inorganik bileşiklerin sıvı solüsyonlarıdır ve anotta iş parçasını çözündürme yeteneğine sahip olmalıdır. Yüksek elektriksel iletkenlik, özgül ısı, ısı iletkenlik ve kaynama noktası elektrolitlerin temel özellikleridir. Fakat bunlara ilaveten metal alaşımları, 1818 paslanmaz çelik veya titanyumdan yapılan pompa ve ilgili ekipmanda korozyona neden olmamalıdır. Çelik veya nikel alaşımlarını işlemek için içine bir miktar sülfürik ya da hidroklorik asit katılmış %24'lük bir sodyum klorür solüsyonu bir elektrolit için baz oluşturabilir. Gaz türbinli motorların pale (blade) ve kanatçıklarına (vane) uygulanan ECM işlemlerinde genelde sodyum nitrat kullanılır [5,10,11].

## 1.2. ECM'in Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokimyasal işleme ile kazanılan başlıca avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Metal işleme hızı metalin sertliğine bağlı değildir.
2. Sert metaller üzerine karmaşık şekiller işlenebilir.
3. Takım aşınması yoktur.
4. Diğer işleme yöntemlerine göre daha hassastır (0.127 mm bazı durumlarda 0.013 mm'ye düşebilir).
5. Sert ya da yumuşak herhangi bir iletken malzemede kullanılabilir.
6. Takım iş parçasına asla temas etmediğinden iş parçasına zarar verme tehlikesi yoktur.

7. Takımda ve iş parçasında kalıntı gerilme ve termal yorulma yoktur.
8. İş parçasında çapak oluşmaz.

Bu avantajların yanında ECM'in birtakım dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

1. ECM makineleri, kurulması, bakımı ve takımların üretimi çok pahalıdır.
2. Elektrolitin iyi bir şekilde depolanması gerekir. Örneğin sodyum klorür (en çok kullanılan elektrolit) ekipmanda, takımda ve iş parçasında korozyona neden olabilir. Ayrıca asit ve alkali içeren solüsyon atıkları çevreye zarar vermeyecek şekilde depolanmalıdır [5,6,8,9].

## 1.3. ECM'in Uygulama Alanları

Elektrokimyasal işleme, uçak motor endüstrisinde genelde imalatta kullanılır. Bunlara örnek olarak türbin paleleri, pale diskleri gibi geleneksel yöntemlerle işlenmesi güç motor parçaların şekillendirilmesi verilebilir. Onarım işlemlerinde ise en yaygın kullanım alanı çapak alma (pürüzlü yüzeylerin düzeltilmesi) ve delik delme işlemleridir [6,7,8,9,10].

### 1.3.1. Çapak Alma

ECM'in en basit ve en yaygın uygulaması çapak almadır. Elektrokimyasal çapak alma hızlı bir işlemdir. İmal edilmiş veya onarım işlemi görmüş (kaynak vb.) komponent yüzeylerinin düzeltilmesi için tipik işlem süresi 5-30 sn'dir. Hızı ve kullanım kolaylığından dolayı elektrokimyasal çapak alma, sabit bir katot takımı ile gerçekleştirilebilir. İşlem bir çok uygulamada kullanılır ve enine delinmiş deliklerin ara kesit bölgesinin çapaktan arındırılması için özellikle uygundur. Yüzeydeki pürüzlerin giderilmesi için geliştirilen elektrokimyasal parlatma işlemi ile yüzey pürüzlülüğü 0.05 µm'den daha küçüktür [6,10].

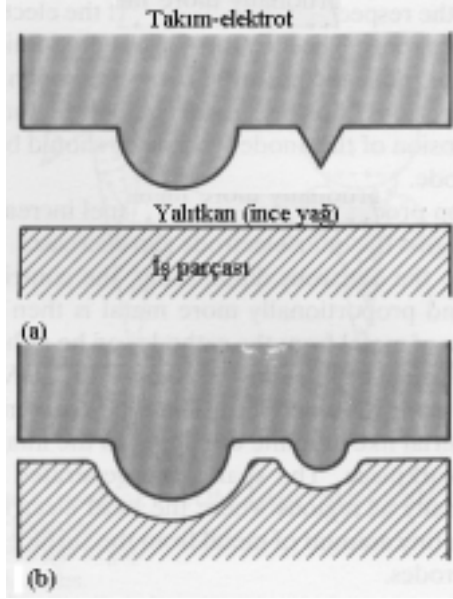
### 1.3.2. Delik Delme

Delik delme ECM'in kullanıldığı bir diğer yaygın işlemdir. ECM ile çok değişik boyutlarda delikler delmek mümkündür. 0.05 mm'den 20 mm çapa kadar delikler rapor edilmiştir. Elektrokimyasal delme işlemi ile elde edilen yaygın sonuçlar 0.001 mm konik, 0.5 mm aşırı kazılmış (iş parçasının yan çeperi ile katot takımının merkez eksenini arasındaki radyal uzunluk ile katodun dış çapı arasındaki yerel fark "aşırı kazıma" (overcut) olarak bilinir) ve 2.5 mm köşe yarıçapına sahip deliklerdir. ECM ile iç çapı 0.8 mm'den ve dış çapı da 0.5 mm'den küçük parçaları işlemek zordur [6,10].

## 2. ELEKTRİKSEL DEŞARJLA İŞLEME (EDM)

Elektriksel deşarjla işleme (EDM), iki elektrotun kıvılcım oluşturmak için kullanıldığı bir metal kaldırma işlemidir. Anot (pozitif elektrot) iş

parçasıdır. Katot (negatif elektrot) da istenen detayın simetriği şeklinde biçimlenmiş takımdır. Elektrotlar asla birbirleriyle temas etmezler ve her zaman aralarında tipik olarak 0.001-0.5 mm'lik bir boşluk bulunur. Elektrotlar oluşturulacak elektrik deşarjına yardımcı olan, takımı soğutan ve atık ürünleri temizleyen yalıtkan bir sıvı içine daldırılmıştır. Yalıtkan sıvının direnci, deşarjların frekansını belirlediğinden iyi bir yüzey kalitesi elde etmek için çok önemlidir [6,7,8,13]. Şekil 2'de EDM'in basit bir şekli görülmektedir.



Şekil 2. Elektrot ve İş Parçasının İlk (a) ve Son (b) Şekilleri [6]

Kıvılcım deşarjları, elektrotlara bağlanan ve yalıtkan sıvının içinden geçerek onu iyonize eden bir DC güç kaynağı tarafından oluşturulur. Akım genelde 5 kHz dolaylarında frekansa sahip dikdörtgen formudur ve 80-130 V, 0.1-1000 A dolaylarında ve sadmelidir (pulsed). Termal enerji lokal ısı şeklinde oluşur ve sıcaklıklar 12000°C'ye ulaşır. Bu sıcaklık malzemeyi ergitecek ve buharlaştıracak kadar yüksektir.  $10^{17}$  W/m<sup>2</sup>'ye kadar yükselen ısı akışları sayesinde çok kısa süreli (0.1-2000  $\mu$ s'n tipiktir) kıvılcımlarla bile elektrotların sıcaklıkları bölgesel olarak (10  $\mu$ m'lik bir çap içinde) normal kaynama sıcaklıklarından daha fazla yükseltilebilir. Takım da iş parçası gibi yüksek sıcaklıklara maruz kaldığından takım da aşınma görülür. Takım aşınması, kaldırılan iş parçası malzemesinin kaldırılan takım malzemesine oranı şeklinde ölçülür ve büyük ölçüde kullanılan iş parçası ve takım malzemesine bağlıdır. İş parçasındaki metal erozyonu %99.5'e kadar yükselirken takımdaki aşınma %0.5 kadar küçük bir değerde tutulur [6,7,8,13].

Elektrotlarda kullanılan en yaygın malzemeler grafit, bakır, pirinç, paslanmaz çelik, titanyum, bakır

tungsten, gümüş tungsten ve bakır grafitir. Yalıtkan sıvı olarak da genelde arıtılmış su, kerozen gibi hidrokarbon yağlar ve parafin kullanılır [6,7,8,13].

### 2.1. EDM'in Avantaj ve Dezavantajları

Elektriksel deşarjla işleme ile kazanılan başlıca avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

1. Malzeme işleme hızı işlenen metalin ergime noktasına bağlı olduğundan EDM iş parçasının sertliğinden bağımsızdır.
2. Karmaşık şekiller oldukça hassas bir şekilde işlenebilir. EDM'in hassasiyeti  $\pm 5 \mu$ m'dir.
3. Elektrot ile iş parçası arasında temas olmadığından ince kesitlerin işlenmesi mümkündür. Aynı nedenden dolayı elektrotun iş parçasına zarar verme riski yoktur.
4. EDM'de çapak oluşmaz; yüzey kalitesi iyidir (0.05-0.1 $\mu$ m); işleme sonrası taşlamaya gerek duyulmaz.
5. Geleneksel yöntemlerle işlenmesi güç metaller, alaşımlar ve karpitler sertliklerine bakılmaksızın iletken olmaları şartıyla EDM ile işlenebilir.

Bu avantajların yanında EDM'in birtakım dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

1. İş parçası gibi takım da aşınmaya maruz olduğundan değiştirilmesi gerekir. Bu da maliyetleri artırır.
2. EDM oldukça yavaş bir yöntem olduğundan, mümkün olan durumlarda geleneksel yöntemlerle işleme daha ucuzdur [6,7,8,13].

### 2.2. Uygulama Alanları

EDM sertleştirilmiş çelikler, karpitler, yüksek mukavemetli alaşımlar ve hatta çok kristalli elmas ve bazı seramikler gibi son derece sert iletken malzemeleri işleme yeteneğine sahiptir. Bu yöntem özellikle karmaşık şekilli deliklerin delinmesi için uygundur. Küçük parçalar ve geleneksel mekanik kesme kuvvetlerine dayanamayacak kadar ince veya hassas malzemelerden yapılmış parçalar tipik uygulamadır. Uçak motor endüstrisinde genelde imalatta kullanılmakla beraber delme işlemleri, onarım operasyonları esnasında kullanılmaktadır [6,7,13]

EDM ile 0.05 mm kadar küçük çapta yuvarlak ya da karmaşık şekilli delikler yaklaşık 20:1'lik bir uzunluk:çap oranında delinebilir. Ayrıca 0.05-0.30 mm'ye kadar olan dar kanallar rahatlıkla açılabilir. Delme hızları 25 mm/dk'ya kadar yükselebilir [7,13].

0.1-0.5 mm arasında çapa sahip deliklerin EDM ile açılmasında 0.1 mm/dk'lık besleme hızları tipiktir ve 0.01-0.05 mm'lik bir aşırı kazıma normal sayılır. Delik delme işleminde ana kıvılcım takımın hücum kenarında oluşur. Fakat işleme kalıntıları iç çeperlerden temizlenirken kıvılcım oluşmasına neden

olurlar. Bu da aşırı kazımaya ve konik deliklere neden olur. Bu etki ECM'deki kadar büyük değildir. Bu yüzden EDM genelde yüksek uzunluk/çap oranlarına sahip hassas delikler için tercih edilir [6].

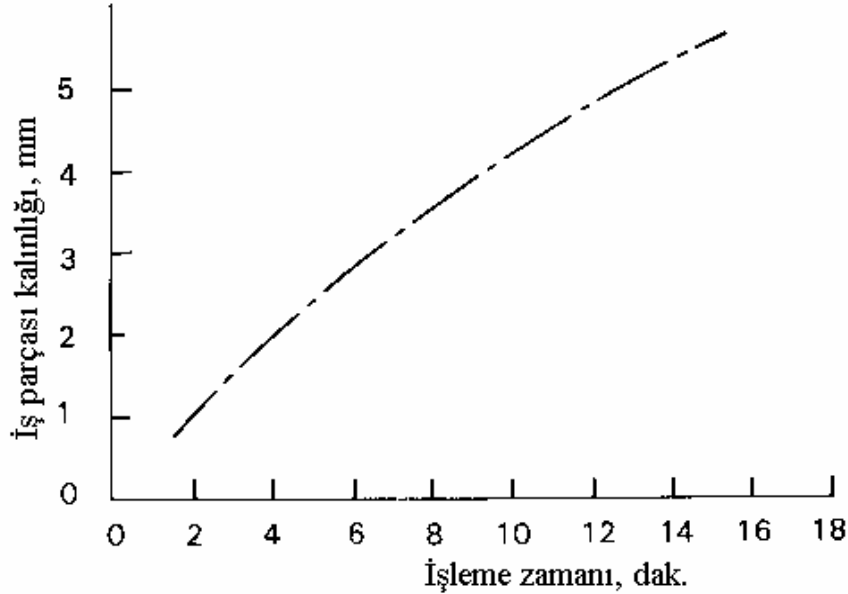
Bu teknik geniş ölçüde uçak motor endüstrisinde örneğin nikel bazlı alaşımlar gibi sert metallere yapılmış türbin palelerindeki soğutma kanallarının açılmasında kullanılmaktadır. Bu endüstride EDM ile delme yönteminin kullanıldığı bir diğer uygulama da jet motorunun halka tipi yanma odalarında tek bir operasyonla 36 delik açılmasıdır. Hastelloy ve HS 188 alaşımlarından yapılmış yanma odaları konik çift çeperli içi boş silindirlere ve sonuçta birbirlerine kaynak ile tutturulurlar. Her iş parçası 1-6.25 mm kalınlığında yüksek kobalt alaşımına açılmış ve çapları 0.75-2.5 mm arasında değişen 7000 deliğe sahiptir. Kullanılan elektrotlar 400 mm uzunluğundadır ve yüksek yoğunluklu bakır-grafitten yapılmıştır. Bir operasyonda 36 delik birden açmak için kullanılan güç kaynağı her biri 2 A'lık 36 kanala sahiptir ve böylece toplam akım oranı 720 A'dır [6].

Bir CNC sistemi deliklerin  $\pm 0.25$  mm'lik bir toleransla yerleştirilmesini sağlar. %15-20'lik bir aşınma oranı elde edilmiştir ve elektrotlar 2.5 mm

derinliğinde bir delik açmak için 3 mm'lik bir derinliğe beslenmek zorunda kalmıştır. Bu etki elektrotun ucunda dairevi bir aşınmaya neden olarak "mermi şeklinde bir burun" oluşturmuştur. Bu sorunla başa çıkmak için otomatik bir elektrot ince ayar cihazı kullanılmıştır [6].

Çok sayıda delik delme işlemi statik kanatçıklarda ve dönen palelerde de kullanılmaktadır. Bu uygulamalar otomatik elektrot besleme sistemlerinin, çok yönlü elektrot kılavuzlarının ve iş parçası nakil mekanizmalarının gelişmesine öncülük etmiştir. Sonuç olarak mevcut makineler 0.3 mm'ye kadar küçük çapların 50'den fazla elektrota aynı anda delinmesini mümkün kılmıştır. Şekil 3'de nikel alaşımında 0.5 mm çaplı elektrota 20 delik delmek için gerekli tipik süreler gösterilmiştir. Ayrıca jet motor bileşenlerinde, 1.6 mm kalınlığındaki Stellite süper alaşımından yapılmış ve 45° açığa sahip 1.27 mm çaplı 60 delik, EDM ile delinmektedir [6].

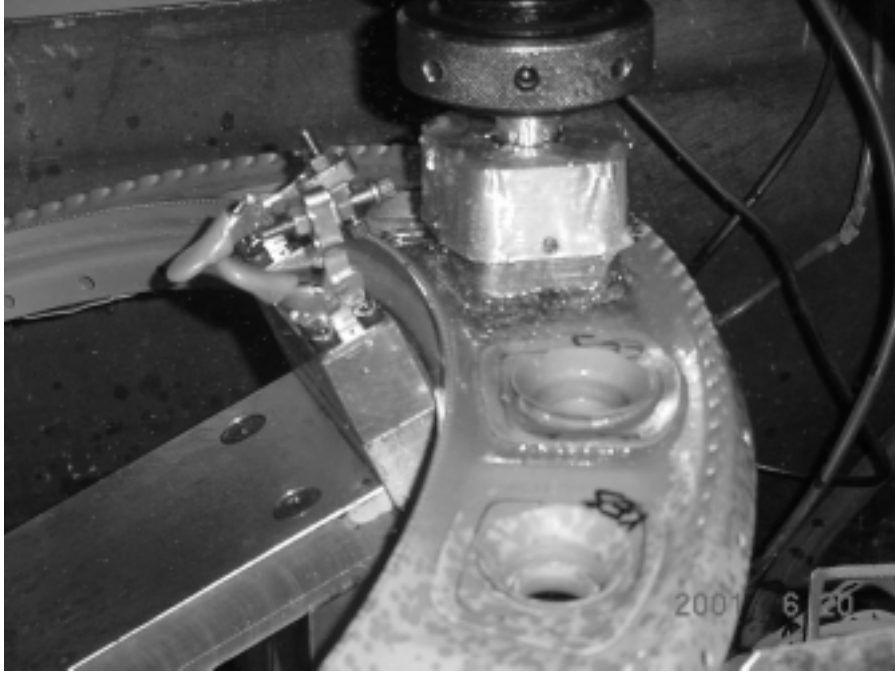
Şekil 4'de bir gaz türbinin yüksek basınç türbini (HPT) nozul kanatçığı üzerinde EDM ile soğutma delikleri görülmektedir



Şekil 3. İşleme Hızının Komponentin Kalınlığı İle Bağlantısı [6]



*Şekil 4. HPT Nozul Kanatığı Üzerinde EDM İle Açılmış Soğutma Delikleri*

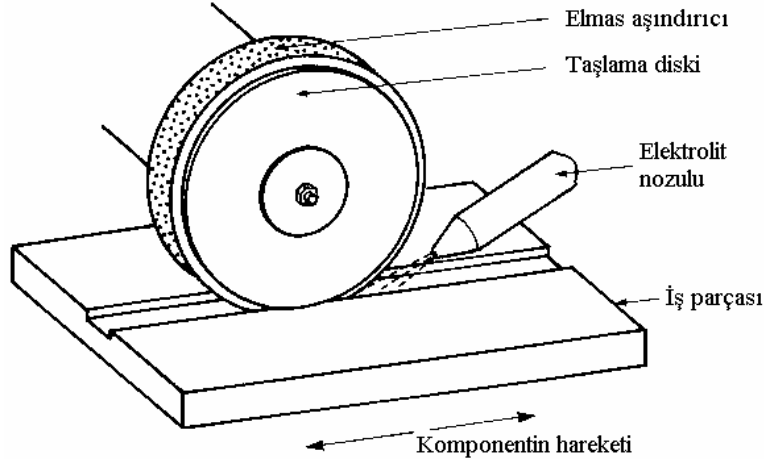


*Şekil 5. Yanma Odasının Bir Bölümüne (Combustion Chamber Dome) Uygulanan EDM İşlemi*

### 3. ELEKTROKİMYASAL TAŞLAMA (ECG)

Elektrokimyasal taşlama ve elektriksel deşarjla işleme endüstride genelde birbirine karıştırılmaktadır. Elektrokimyasal taşlama bir elektrolit sıvının içindeki elektrik akımı pasajından doğan kimyasal etki ile metali kaldıran bir işlemdir. Bir deşarj işlemi değildir. Bu işlem bazen tam tersine elektriksel kaplama ile

karşılaştırılır. Bakır kaplamada olduğu gibi iş parçası üzerinde metal biriktirme yerine metal çözünür ve iş parçasından kaldırılır. Metal deformasyona uğratılmaz, çözündürülür. Bununla birlikte elektrokimyasal taşlama aşındırıcı bir yardıma gerek duyar. Şekil 6'da elektrokimyasal taşlama işleminde kullanılan temel aparatlar görülmektedir.



Şekil 6. Elektrokimyasal Taşlama [6]

Tüm elektrokimyasal işlemler bir DC güç kaynağına bağlanmış ve elektrolit adıyla bilinen elektriksel iletkenliğe sahip bir solüsyona daldırılmış iki elektrotla gerek duyar. Elektrokimyasal taşlamada iş parçası pozitif elektrot (anot) ve elektriksel iletken aşındırıcı disk de negatif elektrottur. Elektrolit genelde tuzdur ya da kimyasal tuzların ve su içinde çözünen diğer katı maddelerin kimyasal bir karışımıdır. Bir lüle içinden iş parçasına ve diske kuvvetli bir akışla pompalanır [4].

Elektrik akımı elektrolitten geçerek iş parçası ile disk arasından akarken, iş parçasında yüzeydeki metalin bir metal okside dönüşmesine neden olan kimyasal bir reaksiyon oluşur. Bu yumuşak yüzeysel metal oksit diskteki aşındırıcılar tarafından süpürülür. Oksit film süpürülürken daha fazla metal yüzeyini kimyasal olarak oksitlenmeye maruz bırakır. İşlem oksit süpürüldüğü müddetçe devam eder. Süpürme işlemi durduğu anda kimyasal reaksiyon durur. Sonuç olarak iş parçasının sadece disk ile temas eden yüzeylerinde metal kaldırılır [4].

Elektrokimyasal taşlama işleminde, elektrotlar arasındaki 0.013-0.08 mm'lik küçük boşluk yüzünden akım şiddeti oldukça yüksektir. İki elektrot, disk ve iş parçası esasen birbiriyle temas halindedir. Sonuç 500 A/cm<sup>2</sup>'ye kadar yükselebilen akım yoğunluklarıdır (elektrotlar arasındaki cm<sup>2</sup> cinsinden temas yüzeyine düşen amper). Bu, 500 A'lık akımın doğal olması anlamına gelmez. Temas alanları genelde 1 cm<sup>2</sup>'den çok daha küçüktür ve birçok metal, yüksek akım yoğunluklarına izin vermeyecek kadar az iletkenlerdir. Disk ile iş parçası arasına 4-8 V'luk bir voltaj uygulandığında 120-240 A/cm<sup>2</sup>'lik akım yoğunlukları oluşur. ECG'nin normalde düşük voltajlı (0-15 V) ve yüksek akımlı bir elektriksel işlem olduğunun anlaşılması önemlidir. ECG'de metal temelde elektrokimyasal işleme ile kaldırılırken yalıtkan parçacıkların mekanik hareketi toplam kaldırılan metal miktarının %5-10'u kadar ilave bir metali kaldırır [4,6].

Elektrokimyasal taşlamada kullanılan diskler elektriksel iletkenliğe sahip aşındırıcı diskler olmalıdır. Bir çok metal için reçine ile yapıştırılmış alüminyum oksit diskler tavsiye edilir. Elektriksel iletkenliğin sağlanması için reçine bakır içermektedir. Elektriksel direnç ihmal edilebilir olmalıdır. Aşındırıcının görevi ECG işleminin verimini arttırmak ve işlemin devamlılığını sağlamaktır. Oksit filmi süpürür, yalıtkan görevi görür ve elektrolit ile doldurulan bir çukur açar. Aşındırıcılar genelde alüminyum oksit, elmas ya da borazon gibi iletken bir malzemeden yapılırlar. Elektrotlar arasında 0.012-0.050 mm arasında yalıtkan bir boşluk oluştururlar. Eğer bu yalıtkan boşluk olmazsa kısa devre oluşur. Tungsten karpit gibi çok sert malzemeler için tavsiye edilen aşındırıcılar elmas ve borazondur [4].

Alüminyum oksit, elmas ya da borazon aşındırıcıların görevi kimyasal reaksiyon (oksit) ürünlerini iş parçası yüzeyinden süpürmek, elektrotların birbirine temas etmesini önlemek ve elektroliti temas yüzeyine iletmektir. Bu işlevleri yerine getirirken disk iş parçası ile temas etmelidir. Bu da bir miktar malzemenin aşındırıcı tarafından kaldırılmasına neden olur. İdealde, kaldırılan malzemenin sadece %5-10'u aşındırıcı tarafından sağlanır, gerisi elektrokimyasal etkinin sonucudur. Aşındırma etkisinin düşük olmasından dolayı disk ömrü geleneksel disklerin ömründen 8-10 kat daha uzundur [4].

Uygun ayarlarla  $\pm 0.030$  mm'lik toleranslara ulaşılmıştır. ECG parametrelerinin son derece hassas kontrolüyle  $\pm 0.003$  mm ya da 3 mikron'luk toleranslara ulaşmak mümkündür [4].

Anot (iş parçası), üzerinden akım geçtiğinde çözünebilen iletken bir malzeme olmalıdır. Bu özellik iletken olmalarına rağmen çözünmeyen seramik ve kristallerin ECG ile işlenmelerini olanaksız kılar [4].

Elektrokimyasal taşlama ile elde edilen yüzey kalitesi taşlanan metale bağlı olarak 0.2-0.3  $\mu\text{m}$ 'dir, hassasiyet ise genelde 0.125 mm civarındadır [6].

### 3.1. ECG'nin Avantaj ve Dezavantajları

Elektrokimyasal taşlama ile kazanılan başlıca avantajlar şu şekilde sıralanabilir:

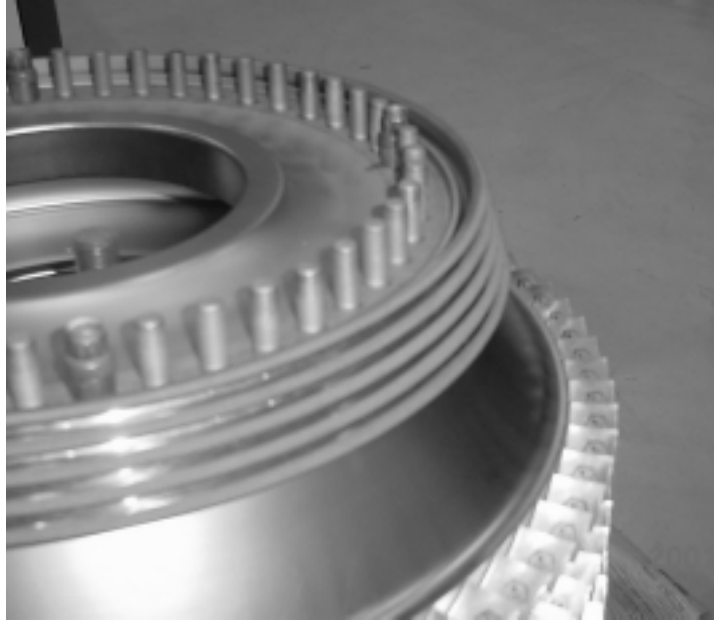
1. İşlenmesi güç sert malzemelerde yüksek bir metal kaldırma oranı sağlar.
2. Taşlama diskinde aşınma az olduğundan disk ömrü geleneksel taşlama yöntemlerinden 8-10 kat daha uzundur.
3. Taşlama diskinin sık sık değiştirilmesi gerekmediğinden hızlı ve ekonomiktir.
4. ECG'de malzeme çözüldüğünden iş parçalarında çapak ve gerilmeler görülmez.
5. İş parçasına uygulanan ısı ve basınç minimum olduğundan malzemede metalürjik hasarlar bırakmaz.
6. İnce çeperli ve ısıya hassas malzemelere uygundur.
7. Sert alaşımlar işlenirken metal kaldırma oranı geleneksel metotların 5-10 katı büyüktür ve işlem 20 kat daha hızlıdır.

8. Yüzey kalitesi genelde 5-40  $\mu\text{m}$  RMS'dir.

Bu avantajların yanında ECG'in birtakım dezavantajları da vardır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir: Köşelerin içleri taşlanırken elektrik alan etkilerinden dolayı hassasiyet kaybolmaktadır. 0.25-0.375 mm'den daha iyi yarıçaplar nadiren elde edilir [4,6].

### 3.2. Uygulama Alanları

Geleneksel taşlama işlemleriyle işlenemeyecek kadar sert alaşımlardan yapılmış motor bileşenlerinde, özellikle dairevi bir şekle sahip olanlarda ECG yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak kompozit malzemeden yapılmış döner sızdırmazlık elemanlarının (rotating honeycomb seal) çürütülmesi, nozul kanatçıklarının çürütülmesi ve borazon gibi sert kaplamaların uygulandığı sızdırmazlık elemanlarından (air seal) bu kaplamaların kaldırılması verilebilir. Şekil 7'de ECG ile taşlanan bir yüksek basınç kompresörü sızdırmazlık elemanı (HPC air seal) görülmektedir.



Şekil 7. ECG İle Taşlanan HPC Sızdırmazlık Elemanı (HPC Air Seal)

## 4. LAZER İŞİNİYLE İŞLEME (LBM)

Lazerle işleme son yıllarda keşfedilen prensiplere dayanmaktadır. Bu yöntem buharlaşma yoluyla malzemenin kaldırılacağı iş parçası ile yoğun, yüksek derecede doğrultulmuş, eş evreli (koherent) ve tek renkli (monokromatik) ışık demetinin etkileşimine bağlıdır.

Lazerler, gaz lazerler ( $\text{CO}_2$ , CO-argon ve helyum-neon) ve katı hal lazerleri (yakut, cam ve YAG) olmak

üzere iki grupta incelenebilir. Onarım işlemlerinde çoğunlukla katı hal lazerleri kullanıldığından bu grup incelenmiştir.

Yakut lazer tipik bir kristalli katı lazerdir. Ana bileşeni ağırlıkça yaklaşık %0.05 krom oksit ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) ile karıştırılmış sentetik kristalimsi safirden ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) yapılmış bir çubuktur. Kristal kafesindeki alüminyum, malzemeye pembe bir renk katan krom ( $\text{Cr}^{+++}$ ) iyonlarıyla yer değiştirir. Tipik olarak 50 mm



uzunluğunda ve 6 mm çapında olan yakut kristalin çevresi, içinde ksenon gazı bulunan sarmal bir kuvars tüp ile sarılmıştır. Bu tüp parlatılmış bir silindirik yansıtıcı içine yerleştirilmiştir. Yakut kristalleri yaklaşık 300 mm boyunda ve 25 mm çapında üretilebilirler. Bu şekilde üretilen malzeme sert ve dayanıklıdır. İyi bir optik kaliteye ve yüksek bir ısı iletkenliğe sahiptir. Böylece çubuğun soğutulması kolayca sağlanmış olur [5,6].

Bazı katı hal lazerleri dört seviye prensibine göre çalışırlar. Dört seviyeli gurubun yaygın bir üyesi YAG lazerinin ( $Nd^{3+}$  ile karıştırılmış kristalimsi  $Y_3Al_5O_{12}$ ) anahtar ögesi olan  $Nd^{3+}$  iyonudur. Burada küçük miktarlarda neodinyum, 1.064  $\mu m$  dalga boyunda kızılötesine yakın lazer çıkışı veren itriyum alüminyum grena (Nd-YAG) kristali çubuklarına

katılır. Nd-YAG lazerleri yakut lazerlerden daha büyük olarak yapılabilirler ve 800 W güçte yaklaşık 800 Hz'e sadmelenebilirler (pulse-up) [5,6].

Üçüncü bir katı hal lazerinde cam çubuk kullanılır. Baryum sıklıkla kullanılan bir silikat cam tipidir ve neodinyum cam lazerler için en önemli uyarıcı iyondur. Belli bir dalga bandının üzerindeki ışığı emmek ve onu neodinyum üzerine transfer etmek için sıklıkla krom kullanılır. Çok yüksek güçlü katı hal lazerlerine ihtiyaç duyulduğunda yaklaşık 1.062  $\mu m$  dalga boyunda yayılan neodinyum katkılı cam lazerler 1 terawatt ( $10^{12}$  W)'a yaklaşan güçle çok kısa sadmeler verecektir [5,6].

Tablo 1'de katı hal lazerlerinin temel fiziksel özellikleri ve performansları görülmektedir.

**Tablo 1. Katı Hal Lazerlerinin Özellikleri [6]**

Malzeme (aktif iyon)	Çıkış dalga boyu, $\mu m$	Çalışma modu	Çıkış
Yakut ( $Cr^{3+}$ )	0.6943	Sadmeli	500 J
YAG ( $Nd^{3+}$ )	1.06	Sürekli	1100 W
		Sadmeli	10 J
		Q-anahtarlı	$2 \times 10^7$ W
Cam ( $Nd^{3+}$ )	1.06	Sadmeli	5000 J

#### 4.1. Lazerle İşleme Uygulamaları

Gelişmiş lazer teknikleri gaz türbinli motorların yanma odası, nozul kılavuz kanatçıkları, pale ve kanatçık gibi elemanlarının parça yenileme işlemlerinde özellikle delme (çarpmayla delme, oyarak delme ve raybalama) ve kesme operasyonlarında ve ısıl işlemlerde kullanılmaktadır.

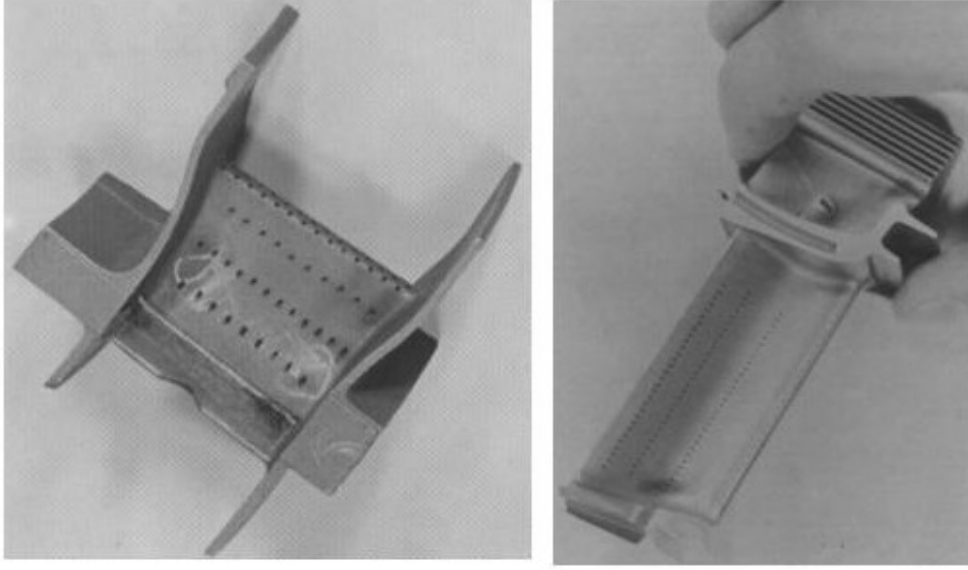
Lazer literatüründe delme, iş parçası içinde bir delik açma anlamına gelir. Yapılan çalışmalar 12.5 mm kalınlığındaki malzemelere 0.127 mm çapında ve 40/1'lik derinlik/çap oranına sahip deliklerin sadmeli lazer ile delinebileceğini göstermektedir. Gaz türbinli motor bileşenleri ve nozul kılavuz kanatçıkları gibi  $1m^3$ - $100m^3$  arasında değişen boyutlara sahip bileşenler üzerinde 8 mm'ye kadar varan uzunluklarda ve 10/1'lik bir derinlik/çap oranına sahip delikler Nd-YAG lazer ile EDM'den %20-30 daha düşük maliyetlerle üretilmektedir. 0.125-1.25 mm çapındaki delikler çarpma ile delme işlemiyle, 0.25 mm ya da daha büyük çaplı delikler de özel optiklerle oyarak delme işlemiyle delinir [6,14].

Tipik bir gaz türbinli uçak motorunda sert ve ısıya dayanıklı nikel alaşımlı malzemelerden yapılmış bileşenlerin soğutulması amacıyla 8 mm'ye kadar metal kalınlığına sahip ve 1.5 mm'den daha küçük

çaplı 30000 dolaylarında delik vardır. Bu delikler EDM, ECM teknikleriyle ve Nd-YAG lazer ile delinerek yapılır. Toz metalürjisiyle imal edilmiş parçaların termal metotlarla kaynak yapılamayacağı ve lazer ya da EDM ile delindiklerinde çatlakların oluşabileceği unutulmamalıdır [5].

Lazerle delme sadece 1 saniye sürer, fakat bu süre esnasında metalin yüzeyi kaynama sıcaklığına ulaşır. Genişleyen buhar sıvı malzemeyi terk ederek bir krater oluşturur. Daha fazla enerji emilir ve proses devam eder. Üretilen deliklerin ağzı etrafında oluşan ısıdan etkilenmiş bölge (HAZ) biraz konik bir yapıya sahiptir ve dairesellik %5'lik bir tam çemberden fazla değildir. Fakat deliğin hassasiyetinden ziyade deliklerin tekrarlanabilme sayısı önemlidir [5].

Bazı deliklerin daire yerine oval olması, köşeli (dikdörtgen) olması ya da malzeme yüzeyi ile  $15^\circ$ 'yi aşmayacak şekilde açılı olması istenir. Bir lazer ile kör delik açmak ya da deliğin bir çeperini diğerine dokunmadan delmek istendiğinde işlemi durdurmak zordur. Bu yüzden böyle durumlarda EDM ya da kılcal ECM ile delme yöntemi kullanılmalıdır [5]. Şekil 8'de lazer ile delinmiş motor bileşenleri görülmektedir.



*Şekil 7. Lazer İle Açılmış Soğutma Delikleri Bulunan Türbin Kanatçı (vane) ve Palesi (blade) [14]*

Malzemelerin kesilmesi ya da dilimlenmesi lazerler için iyi bir uygulamadır. Kesme işlemi çok hızlı olabilir, malzeme üzerinde çok dar çentiklere sahip konturlar ve keskin köşeler bırakır ve çok az çapak giderme işlemi gerektiren, neredeyse tam bitmiş kesikler sağlar. Kesme işlemlerinde YAG lazerin yanında gaz lazerler de kullanılabilir.

Isıl işlemde bir lazerin avantajı oldukça küçük bölgelere bir kerede ısıl işlem uygulayabilme yeteneğidir. Böylece kullanıcının ihtiyacına göre şeritler, noktalar ya da sertleştirilmiş veya tavllanmış seçili yüzeyler yaratır.

## SONUÇ

### A.Gelişmiş İşleme Yöntemlerinin Teknik Sonuçları

Gelişmiş işleme yöntemlerinde metal, elektrik enerjisinin iş parçasına doğrudan uygulanmasıyla kaldırılır. Bu yöntemler; elektrokimyasal işleme (ECM), elektriksel deşarjla işleme (EDM), elektrokimyasal taşlama (ECG) ve lazer ışınıyla işleme (LBM)'dir.

Elektrokimyasal işleme (ECM) ile kazanılan başlıca avantajlar; metal işleme hızının metalin sertliğinden bağımsız olması, takımlarda aşınma olmaması, diğer işleme yöntemlerine göre daha hassas olması, birikmiş gerilme ve termal gerilmeye neden olmamasıdır.

Bu avantajların yanında ECM'in birtakım dezavantajları da vardır. Özetle; ECM makineleri, kurulması, bakımı ve takımları pahalıdır. Ayrıca elektrolitin çevreye zarar vermeyecek bir şekilde depolanması gerekir.

Elektrokimyasal işlemin onarım işlemlerinde en yaygın kullanım alanı çapak alma ve delik delme işlemleridir.

Elektriksel deşarjla işleminin (EDM) başlıca avantajları; iletken olmak kaydıyla sertliklerine bakılmaksızın tüm metallerin ve alaşımların işlenebilmesi, oldukça hassas olması, ince kesitlerin işlenebilmesi, çapaksız ve pürüzsüz bir yüzey oluşturması şeklinde özetlenebilir.

Bununla birlikte EDM'in; takım aşınmasından dolayı maliyetlerin yüksek olması ve yavaş bir yöntem olması gibi birtakım dezavantajları da vardır. EDM, onarım işlemlerinde genelde delik delme ve karmaşık kesitlerin çürütülmesinde kullanılır.

Elektrokimyasal taşlama (ECG); iş parçasının sertliğinden bağımsız olma, işlenmesi güç sert malzemelerde yüksek bir metal kaldırma oranı sağlama, uzun disk ömrü, çapak ve gerilmeye neden olmama, ince çeperli ve ısıya hassas malzemelere uygunluk gibi avantajlara sahiptir.

ECG'in dezavantajları da şu şekilde özetlenebilir: Köşelerin içleri taşlanırken elektrik alan etkilerinden dolayı hassasiyet kaybolmaktadır. 0.25-0.375 mm'den daha iyi yarıçaplar nadiren elde edilir.

Geleneksel taşlama işlemleriyle işlenemeyecek kadar sert alaşımlardan yapılmış motor bileşenlerinde, özellikle dairesel bir şekle sahip olanlarda ECG yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. Bunlara örnek olarak kompozit malzemeden yapılmış döner sızdırmazlık elemanlarının (rotating honeycomb seal) çürütülmesi, nozul kanatçıklarının çürütülmesi ve borazon gibi sert kaplamaların uygulandığı sızdırmazlık elemanlarından (air seal) bu kaplamaların kaldırılması verilebilir.

Gaz türbinli motor bileşenleri ve nozul kılavuz kanatçıkları gibi  $1\text{m}^3$ - $100\text{mm}^3$  arasında değişen boyutlara sahip bileşenler üzerinde  $8\text{mm}$ 'ye kadar varan uzunluklarda ve  $10/1$ 'lik bir derinlik/çap oranına sahip delikler Nd-YAG lazer ile EDM'den %20-30 daha düşük maliyetlerle üretilmektedir.

## **B. Parça Değişirme Yerine Yenileme İşlemi Uygulanmasının Sonuçları**

Çalışmanın başında da belirttiği üzere; bakımlar esnasında işlevlerini yitirdiği tespit edilen motor parçalarının yenilerinin takılması yerine bir takım onarım işlemleriyle tekrar emniyetli bir şekilde kullanılabilir hale getirilmeleri daha avantajlı olacaktır. Bunlar şu şekilde özetlenebilir:

### **1. Ekonomik Kazançlar:**

Eskişehir 1. Hava İkmal Bakım Merkezi Jet Revizyon Müdürlüğü'nde F-16 savaş uçaklarında kullanılan F110-GE-100/129 turbofan motorlarının fabrika seviyesi bakımları yapılmaktadır. Bu motorların her 3000 TAC (Total Accumulated Cycles) sonunda fabrika seviyesi bakıma alınmaları gerekmektedir. Yurt dışında 3000 TAC bakımı yaklaşık 125000 \$, 6000 TAC bakımı ise yaklaşık 500000 \$ tutmaktadır. HİBM'nde ise bu bakımlar yaklaşık %50 daha ucuza yapılabilmektedir. Hava Kuvvetleri envanterindeki F-16 uçaklarının sayısı göz önünde bulundurulduğunda, bu bakımların yurt içinde yapılması sayesinde yıllık kazanç milyon dolarları bulmaktadır [15].

Bakımlar esnasında motor bileşenlerine bir takım kontroller uygulanmaktadır. Bu kontroller sonucunda görevini emniyetli bir şekilde yerine getiremeyecek şekilde hasarlanmış bileşenler ya yenisi ile değiştirilir ya da üretici firmanın onayladığı tekniklerle yenilenir. Örneğin F110-GE-100/129 motorunun 1. kademe fan diskini 3000 TAC'da kontrol edilmesi ve 6000 TAC'da durumu ne olursa olsun değiştirilmesi gerekir. Bu bileşenin yenisinin fiyatı yaklaşık 30000 \$'dır. 3000 TAC'da yapılan kontrolde hasarlı olduğu saptanan bileşen yenisi ile değiştirilmek istendiğinde 30000 \$ üreticiye ödenecektir. Oysa HİBM'nde bu bileşen yaklaşık 1000 \$'a yenilenecek şekilde tekrar kullanılmaktadır [15].

Bir diğer örnek olarak aynı motorun 1. kademe LPT nozulu verilebilir. Bu bileşenin fiyatı 100000 \$'dır ve yapılan kontrollerde bir hasara rastlanmadığı müddetçe sınırsız bir ömre sahiptir. 3000 TAC'da yapılan kontrolde hasarlı olduğu saptanan bileşen yenisi ile değiştirilmek istendiğinde 100000 \$ üreticiye ödenecektir. Yurt dışında yenilenmesi istendiğinde maliyeti yaklaşık 35000 \$'dır. HİBM'nde bu bileşenin yenilenmesi yaklaşık 10000 \$ civarındadır. Birinci kademe LPT nozulunun yenileme kabiliyeti kazanılmadan önce yılda yaklaşık 1 milyon dolar yurt dışına çıkmıştır [15].

### **2. Komponent Servis Ömrünün Arttırılması:**

Genelde yenilenmiş bir bileşenin, yeni bir bileşenin kullanım ömrünün belli bir yüzdesi kadar bir ömrü olacağı kabul edilmesine rağmen yapılan araştırmalar yenilenmiş bir bileşenin servis ömrünün orijinal OEM (Orijinal Ekipman Üreticisi) bileşeninkinden daha uzun olabileceğini göstermektedir [16]. Yenileme işlemi görmüş bir bileşenin bu arttırılmış servis ömrü beklentisini nasıl sağlayabileceğini örneklemek yerinde olacaktır.

F404-GE-400 motorunun Yüksek Basınç Türbin (HPT) kanatçıkları için bir kaplama geliştirilmiş ve sonuçta yenileme işlemi görmüş bir bileşenin yeni HPT nozullarının iki katı bir servis ömrüne sahip olduğu görülmüştür. Fakat buna rağmen kaplama prosesinin yeni bileşenlere uygulanması ekonomik olarak uygun değildir. Yine aynı motorun titanyum Ti-6Al-40V fan palelerinin Sıcak İzostatik Pres (HIP) gençleştirilmesinin, o bileşenin orijinal LCF ömrünün %80 'ini (muhafazakar bir tahmin) yeniden vereceği beklenmektedir [16].

### **3. Uçuş emniyetinin geliştirilmesi:**

Bir bileşene herhangi bir yenileme işlemi uygulamadan önce, o bileşendeki operasyonel yüklem ve kritik hasar modlarıyla ilgili ayrıntılı bilgi temelinin oluşturulması gerekmektedir. Bu da bir Hasar Modları, Etkileri ve Kritiklik Analizi (FMECA) prosesinin geliştirilmesiyle mümkündür. Bu sayede gaz türbinli motor kullanıcısı bileşenlerin arızalarını önceden görme ve bu arızaların sonuçlarını anlama kabiliyetini geliştirmek zorunda kalacaktır ve bu da ilgili personelin beklenmedik arızaların sonuçlarını değerlendirmelerini ve uçuş emniyetini arttırmalarını sağlayacaktır [16].

### **4. İkmal güvenliği:**

Hem askeri hem de sivil işletmeler ekonomik nedenlerden dolayı yedek malzeme stoklarını en düşük seviyede tutmak istemektedirler. Eğer işletme parça yenileme kabiliyetine sahip değilse uçakların uçuşa hazır bulunabilmesi tamamen yedek parça stokuna bağlıdır. Yedek parça ikmalindeki herhangi bir aksaklık ticari hava yolunu uçakların programlanan zamanlarda seferlerini yapamamalarından dolayı ekonomik yönden sarsacakken askeri açıdan bu, ülkenin ulusal güvenliğinin tehdit altına girmesi gibi çok daha vahim sonuçlar doğuracaktır.

### **5. Endüstriyel tabanın gelişmesi:**

Uçak, motor ve bileşenlere yapılan büyük revizyon işlemlerinin genelde taşeron şirketlere yaptırıldığı göz önünde bulundurulduğunda ticari havayolları ya da askeri kuruluşların parça değiştirme yerine yenileme işlemlerini tercih etmesi ülke içindeki endüstriyel tabanı geliştirecektir. Çünkü bu taşeron işletmeler ancak yeterli talep olduğunda teknolojik

yenileme işlemlerini tasarlayıp yürütecek ve kendilerini geliştireceklerdir.

Tüm bu avantajlara rağmen bir parça yenileme işlemine karar vermede bir takım sınırlayıcı etkenler de mevcuttur. Yenileme/değiştirme opsiyonunun en temel ön şartı gaz türbini komponentlerine ait metalürjik prensiplerin anlaşılmasıdır. Gaz türbini parçalarının fiziksel özellikleri ve hasar modları motor boyunca çok değişkendir ve detaylı bir şekilde anlaşılmalıdır. Yenileme/değiştirme opsiyonu ile ilgili ikinci yeterlilik alanı bu komponentlerin tasarım işlevlerini yerine getirdikleri gerçek çalışma ortamının anlaşılmasıyla ilgilidir. Bu bilgilerin çoğunluğu OEM tarafından sıkıca saklanan tescilli tasarım verileridir. Bununla birlikte tasarım varsayımları sıklıkla tüm çalışma aralığına yeterince hitap etmez. Bu yüzden servis deneyimini analiz etmek gerekir. Bilgi tabanının bu kısmı ileri göstergeli aletlerinin gelişimi, deneysel metodların gelişimi, arızalı komponentlerin mevcut hikayelerinin analizi, özel göstergeli motorlar ve uçuş testleri ve arıza sonrası analizlerle geliştirilebilir. F-404-GE-400 motorlarındaki Bakım Sinyal Veri Kayıt Sistemi ( Maintenance Signal Data Record System-MSDRS) ve Uçuş Esnasında Motor Durum İzleme Sistemi (In-flight Engine Condition Monitoring System-IECMS) ile F110-GE-100/129 motorlarındaki Motor İzleme Sistemi (Engine Monitoring System-EMS) veri tabanı oluşturulmasında kullanılan sistemlere örnek olarak verilebilir [16].

Birçok işletici için uçuşa elverişlilikteki en büyük engel yenileme işlemi sonrasında ortaya çıkan tasarım ve işlev değişiklikleri için komponent ve tam ölçekli motor doğrulama test kolaylıklarının mevcudiyetidir. Ayrıca yenileme işlemi görmüş komponentlerin uçuşa elverişlilik açısından sertifikalandırılmaları gerekir [16]. Bunun için yenileme işlemi yapacak işletmenin ulusal havacılık otoritesi tarafından, eğer yapılan işlemin uluslararası geçerliliği isteniyorsa da FAA ya da JAA tarafından onaylanması gerekir. NATO ülkeleri arasında askeri standart AQAP'dır.

## KAYNAKÇA

1. Patnaick, P.C. ve Thamburaj R., "Development of a Qualification Methodology for Advanced Gas Turbine Engine Repairs/Reworks", *NATO RTO Meeting Proceedings 17*, Canada Communication Group Inc., Quebec, Canada, 11 p. (1999)
2. Irwin, E.T., "Aircraft Gas Turbine Engine Technology", 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., UK (1979)
3. Rajurkar, K. P., Kozak J., ve Chatterjee, A., "Nonabrasive Finishing Methods", *ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering*, ASM International, USA, 110-116 (1996)

4. Phillips, R.E., "What Is Electrochemical Grinding and How Does It Work", *Nontraditional Conference Proceedings*, ASM International, USA, 65-70 (1986)
5. HORNE, D.F., "Aircraft Production Technology", Cambridge University Press, UK (1985)
6. McGeough, J. A., "Advanced Methods of Machining", Chapman and Hall, USA (1988)
7. Rajurkar, K. P., Kozak J., ve Chatterjee, A., "Nonabrasive Finishing Methods", *ASM Handbook Volume 5 Surface Engineering*, ASM International, USA, 110-116 (1996)
8. Stefan, D., "Manufacturing by Electrochemical and Spark Discharge Machining", Department of Mechanical Engineering University of Bath, UK, <http://www.bath.ac.uk> (2001)
9. Rajurkar, K. P., "Electrochemical Machining", University of Nebraska Nontraditional Research Center, US, <http://www.unl.edu/nmrc> (2001)
10. Lievestro, T.L., "Electrochemical Machining", *ASM Handbook Volume 16 Machining*, ASM International, USA, 533-541 (1997)
11. Technical Description of ECM Components, US, [http://www.rose\\_hulman.edu](http://www.rose_hulman.edu) (2001)
12. How ECM Works and Benefits of ECM, US, <http://www.sermatec.com> (2001)
13. Fuller, J.E., "Electrical Discharge Machining", *ASM Handbook Volume 16 Machining*, ASM International, USA, 557-561 (1997)
14. Tausch, D.R., "YAG Laser Processing In The Aircraft Industry", *Nontraditional Conference Proceedings*, ASM International, USA, 79-95 (1986)
15. Dalkılıç, S., "Jet Motorlarına Uygulanan Parça Yenileme İşlemleri", Yüksek Lisans Tezi, Anadolu Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, Türkiye (2001)
16. Hastings, R.R., "Aero-Engine Component Repair/Replacement Decision Factors", *NATO RTO Meeting Proceedings 17*, Canada Communication Group Inc., Quebec, Canada, 6 p. (1999)

## ÖZGEÇMİŞLER

### Arş. Grv. Serdar DALKILIÇ

Eskişehir, 1973 doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Eskişehir'de tamamladı. 1998 yılında Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksekokulu Uçak Motor Bakım bölümünden mezun oldu ve aynı okulda Araştırma Görevlisi olarak göreve başladı. 2001 yılında A.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Sivil Havacılık Ana Bilim Dalı'nda "Jet Motorlarına Uygulanan Parça Yenileme İşlemleri" konulu yüksek lisans tezini tamamladı. Halen aynı Ana Bilim Dalı'nda doktora eğitimini sürdürmektedir.

**Yrd. Doç. Dr. A. Akile TANATMIŞ**

Eskişehir, 1963 doğumludur. İlk, orta ve lise öğrenimini Eskişehir’de tamamladı. 1985 yılında Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Makine Bölümünden mezun oldu. 1987 yılında A. Ü. Sivil Havacılık Meslek Yüksek Okulu’na araştırma görevlisi olarak girdi. 1988 yılında ise aynı üniversitenin Fen Bilimleri Enstitüsünde Makine Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İmalat ve Konstrüksiyon Bilim Dalında “Spektrometrik Yağ Analizi” konulu yüksek lisans tezini, 1995 yılında ise Osman Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde kabul edilen “Hafif Temel Eğitim Uçağı Yapımında Konstrüksiyon Tekniklerine Uçuş Performans Özellikleri Etkisinin Etüdü” konulu doktora tez çalışmasını tamamladı. Halen Anadolu Üniversitesi Sivil Havacılık Yüksek Okulunda yardımcı doçent doktor olarak görevini sürdürmektedir.