

OTOMATİK KONTROLLÜ ELEKTROKİMYASAL İŞLEMENİN (EKİ) İNCELENMESİ VE UYGULAMASI

Selis ÖNEL

Hacettepe Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Beytepe, 06800, Ankara, Türkiye
selis@hacettepe.edu.tr

(Geliş/Received: 20.06.2012; Kabul/Accepted: 23.01.2014)

ÖZET

Bu çalışmada ülkemizde henüz uygulama imkanı bulamayan ileri bir metal işleme yöntemi olan elektrokimyasal işleme (EKİ) yöntemi incelenmiştir. Yeni bir EKİ tezgâhı, üç-eksenli bilgisayarlı sayısal denetimli (CNC) bir tezgâhın elektrokimyasal işlemeye uygun şekilde geliştirilerek darbeli doğru akım güç kaynağı, dikey yönde elektrot aralığı kontrolünü sağlayan servo kontrol sistemi, elektrolit vakumlama, arıtma ve geri-çevrim sistemi ile bütünleştirilmesi ile elde edilmiştir. EKİ sisteminin istenilen sınırlarda kontrollü çalışması katot ucu tasarımının doğru yapılması, katot ile anot arasındaki mesafenin hassas ayarlanması, akım ve gerilim değerlerinin kontrol altında tutulması ve elektrot yüzeylerinin maskelenmesi ile sağlanmıştır. Sistemin kararlı çalışabilmesi için elektrolit derişiminin sabit tutulması gerektiği tespit edilmiştir.

Anahtar kelimeler: Elektrokimyasal işleme, metal işleme, bilgisayarlı sayısal denetim (CNC), servo kontrol

INVESTIGATION AND APPLICATION OF AUTOMATIC CONTROLLED ELECTROCHEMICAL MACHINING (ECM)

ABSTRACT

In this study, electrochemical machining (ECM), an advanced metal processing method that has not found application in Turkey, has been investigated. A new ECM device was developed by customizing a three-dimensional CNC machine for electro-chemical applications and integrating it with pulsed DC power supply, servo motor control system that provides vertical gap control, electrolyte vacuum, purification and recycle system. Controlled operation of the system within desired limits was achieved by correct design of the cathode tool, effective adjustment of the vertical gap between the anode and the cathode, accurate control of electric current and voltage values, and masking the surface of the electrodes. It was found that keeping the electrolyte concentration constant was necessary for the system stability.

Keywords: Electrochemical machining, metal machining, computer numerical control (CNC), servo control

1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Özel metal parça imalatında kullanılan elektrokimyasal işleme (EKİ) yöntemi, talaşlı imalata dayanan geleneksel işleme yöntemlerine ve gelişmekte olan yeni teknolojilere göre özellikle yüksek mukavemet ve ergime sıcaklığına sahip metal parçalarda, aşırı kırılmalı malzemelerde ve ince metal filmlerde ileri yüzey kalitesiyle üstün nitelikli işleme yapılmasını sağlamaktadır. Daha hızlı ve ekonomik olması, yüksek enerji tüketimi gerektirmemesi gibi önemli kullanım avantajları da getirmektedir [1-3]. EKİ yönteminin ilk patenti 1929 yılında alınmıştır.

Karmaşık bir sistem olmasından dolayı gelişmesi ve kullanılması ikinci dünya savaşı ardından ileri malzemeler alanında yapılan gelişmeleri takiben olmuştur [4]. 1950'lerde roket ve uzay sanayiindeki gelişmelerle yüksek mukavemetli ve ısıya dayanıklı alaşımların gündeme gelmesi [3] ile EKİ yöntemi tekrar incelenerek seri üretimlerde ve daha kontrollü uygulaması için sayısal kontrollü olarak gelişmesi üzerine çalışmalar yapılmıştır [5, 6].

EKİ yöntemi ile elektrik iletkenliğine sahip olmak koşuluyla sert ve karmaşık şekle sahip her parça işlenebilir. Özellikle türbin bıçakları, motor gövdesi,

bilya yatağı, dişliler, dişi ve erkek kalıplar, top mermileri, cerrahi aletler ve vücuda yerleştirilen pürüzsüz yüzeye sahip olması gereken cerrahi malzemelerin yapımında kullanılmaktadır [7]. Yakın zamanda elektronik sanayi tarafından işleme hassasiyetinde yapılan geliştirmeler ile elektronik parçaların mikroişleminde [8-14] ve yakıt pillerinde metalik (paslanmaz çelik) mikrokanallar açılmasında [15] kullanılmaya başlanmıştır. Hassas işleme için sayısal kontrollü elektrokimyasal mikroişleme (EMİ) yapan freze tezgâhları önerilmiştir [16] ve mikroişleme koşullarının iyileştirilmesi amacıyla deneysel ve matematiksel modelleme çalışmaları devam etmektedir [17-21]. Yarı iletken sanayinde transistör boyutlarının Moore kanunu [22] ile belirtildiği üzere yıllara göre eksponensiyel olarak küçülmesi ve şekillerin karmaşıklaşması ile kaplama, parlatma, kesme ve işleme için kullanılan elektrokimyasal süreçler içeren yöntemlerin önemi giderek artmıştır. Manyetik saklama, mikroelektronik paketleme, mikro-elektro-mekanik sistemler (MEMS) ve gelişmeye devam eden nano ve piko ölçekte elektronik teknolojileri özellikle mekanik kuvvet gerektirmeyen EKİ tekniğinin etkili olacağı alanlar olarak belirtilmektedir [11]. Teknolojik sistemlerin giderek küçülmesi tıbbi uygulamalar için kullanılan özel parçaların küçülmesinde, mikrokanallı reaktörlerin [23] ve mini algılayıcıların gelişmesinde de önemli rol oynamakta ve bu parçaların üretimi için EKİ'nin önemini arttırmaktadır.

Ülkemizde elektronik, havacılık, savunma, uzay ve tıbbi malzeme sanayilerinin geleneksel talaşlı imalat yöntemleri ile karşılanamayan özel üretim taleplerinde EKİ yöntemi avantaj sağlayacaktır. Daha hassas, verimli, güvenilir ve çevre dostu olarak kabul görebilmesi için algılama, kontrol, makina ucu tasarımı, atık azaltma-işleme-uzaklaştırma süreçleri gibi alanlardaki teknolojik gelişmelerin EKİ tezgâhlarına dahil edilmesi gerekmektedir [7]. EKİ süreç değişkenlerinin eniyilemesi için matematiksel modelleme ve simülasyon çalışmaları yapılmakla birlikte [8-11] konuyla ilgili sınırlı araştırmaları sanayi uygulamalarında kullanmak oldukça zordur. Bu çalışmada, işleme mekanizmasının karmaşık ve kontrolünün zor olması nedeni ile ülkemizde uygulama alanı bulamayan EKİ yöntemi, avantajları dolayısıyla incelenmiş ve prototip tezgâh üretilerek iyileştirilmesi amacıyla şu çalışmalar yapılmıştır:

1. EKİ için takım ucu ve servo kontrol sistemi geliştirilmesi,
2. Darbeli doğru akım güç kaynağı kullanılması,
3. Elektrolit arıtma ve geri-çevrim sistemi geliştirilmesi,
4. Kullanılan işparçası için uygun elektrolit cinsi ve derişiminin tespit edilmesi,
5. Katot yan yüzeylerinin ve anot yüzeyinin yalıtkan malzeme ile maskelenmesi,
6. Malzeme kaldırma hızı ve makina verimliliğinin tespit edilmesi.

2. YÖNTEM (METHOD)

Elektrokimyasal işleme (EKİ) tezgâhında takım ucu ve işlenecek parça elektrolitik bir hücre içindeki elektrotlar olarak düşünülebilir (Şekil 1). Bu elektrolitik hücrede anodik kutbu oluşturan işparçası yüzeyindeki metal atomları, katodik kutuptaki takım üzerinden aradaki iletken sıvı (elektrolit) aracılığı ile geçirilen doğru akım yardımıyla parçalanarak iyon haline dönüştürülür. Bu metal iyonları elektrolit akışı ile işleme bölgesinden uzaklaştırılır. Elektrolit olarak işlenecek metalin cinsine göre genellikle NaNO_3 , NaCl veya NaOH tuzlarının veya karışımlarının sulu çözeltileri kullanılmaktadır.

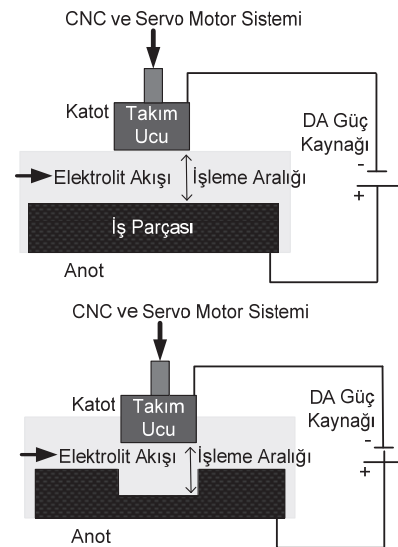
2.1. Mekanik İşleme Yöntemleri ile Farklar (Differences with Mechanical Machining Methods)

Geleneksel talaşlı imalatta ve sesötesi aşındırma ile işleme (Ultrasonic Abrasive Machining, UAM) gibi yeni mekanik yöntemlerde takım ucunun işparçasıyla fiziksel temasından kaynaklanan takım aşınması gibi mekanik ve ısıl sorunlar işparçasından sert takım ucu kullanılmasını gerektirmektedir [7, 24]. EKİ'de işparçası ile mekanik temas olmadığından takım ucu malzeme sertliği etken değildir.

2.2. Diğer İşleme Yöntemleri ile Farklar (Differences with Other Machining Methods)

2.2.1 Elektroparlatma (Electropolishing)

EKİ, anot yüzeyinin çözünmesinden dolayı elektroparlatmaya benzetilebilir; ancak elektroparlatmada kullanılan elektrolit bir asit çözeltilisidir ve metal kaldırma hızı metal işlemede gerekenin çok altındadır [3, 25]. EKİ hızlıdır ve imalat sonrası pürüzlü metal yüzeylerin düzeltilmesinde elektroparlatma amacıyla kullanılabilir [25].



Şekil 1. Elektrokimyasal işlemede elektrolitik hücrenin basit şematik gösterimi (Simple schematic representation of the electrolytic cell in electrochemical machining)

2.2.2 Elektroerozyon ile İşleme, EEİ (Electro-Discharge Machining, EDM)

Talaşlı imalatın yeterli olmadığı durumlarda tercih edilen EEİ teknolojisi ülkemizde sık kullanılmaktadır [26-29]. EKİ’de katot görevi gören takım ucu EEİ’de güç kaynağının eksi yüklü ucuna bağlanarak anot görevi yapar; işparçası ise artı yüklü kutuba bağlanarak katot görevi yapar. EKİ’den farklı olarak işleme, elektrotlar arasında makina yağı veya deiyonize su gibi dielektrik özelliği olan bir sıvı içinde yüksek gerilim ve yüksek frekans ile oluşturulan kıvılcımların işparçası yüzeyinden parça koparması ile yapılır. Dielektrik sıvı aynı zamanda yüzey işleme sırasında kaldırılan parçacıkların işleme bölgesinden uzaklaştırılmasını sağlar. Kopan parça boyutu kontrolü güç olduğundan elde edilen yüzey pürüzlülüğü yüksektir. EKİ’nin EEİ’ye göre en önemli üstünlüğü yüksek sıcaklık ve ark oluşumunun neden olabileceği ısıl gerilimlerin ve takım aşınmasının oluşmamasıdır. EKİ’de optimum çalışma koşulları sağlandığında elde edilen yüzey kalitesi, hassasiyeti ve tekrar edilebilirliği daha yüksektir.

2.3. Hibrit Elektrokimyasal Yöntemler (Hybrid Electrochemical Methods)

Metalik olmayan ileri malzemelerin ve elektrik iletkenliği olmayan alüminyum oksit, zirkonyum oksit, silikon nitrat ve kuvars gibi sanayide sık kullanılan seramiklerin ve kompozit malzemelerin işlenmesinde EKİ ve EEİ yöntemlerinin avantajlarını biraraya getiren yeni hibrit teknolojiler üzerinde günümüzde çalışılmaktadır.

2.3.1. Elektrokimyasal Erozyon ile İşleme, EKEİ (Electrochemical Discharge Machining, ECDM)

EKEİ yönteminde [30, 31] katot ucu, iletken olmayan işparçası ve anot birlikte elektrolit içine daldırılarak kullanılır. Katot ve anot arası mesafenin EKİ yönteminde uygulanan <0.1 mm civarı küçük mesafelerden büyük olmasından dolayı anot üzerinde işleme yavaştır ve ihmal edilebilir. EKİ’de kullanılan daha yüksek 70-90 V elektrik gerilimi uygulanması sonucu katot ucu çevresinde oluşan hidrojen gazı ve ısınan elektrolitin buharından oluşan gaz karışımının elektrolit içinde kıvılcım oluşturarak yüksek sıcaklıkta iyonlaşması ile anot yüzeyinden malzeme kopması sağlanmaktadır.

2.3.2. Elektrokimyasal kıvılcım ile işleme, EKKİ (Electrochemical Spark Machining, ECSM)

EKKİ yöntemi EKEİ ile benzerdir; farkı elektrolit tankı içinde anoda göre daha küçük bir katot kullanılarak daha yüksek enerjili kıvılcımlar oluşturulmasıdır [32]. Yüksek sıcaklık ve hızdaki kıvılcımlar ile elektroerozyon ile işlemede olduğu gibi anot yüzeyi noktasal olarak eritilerek çarpma suretiyle malzeme kopması sağlanmaktadır.

3. EKİ TEZGÂHI ANA BİRİMLERİ (MAIN UNITS OF ECM)

Teknik özellikleri Tablo 1’de verilen özel yapım otomatik kontrollü EKİ tezgâhında ana birimler (Şekil 2) şunlardır:

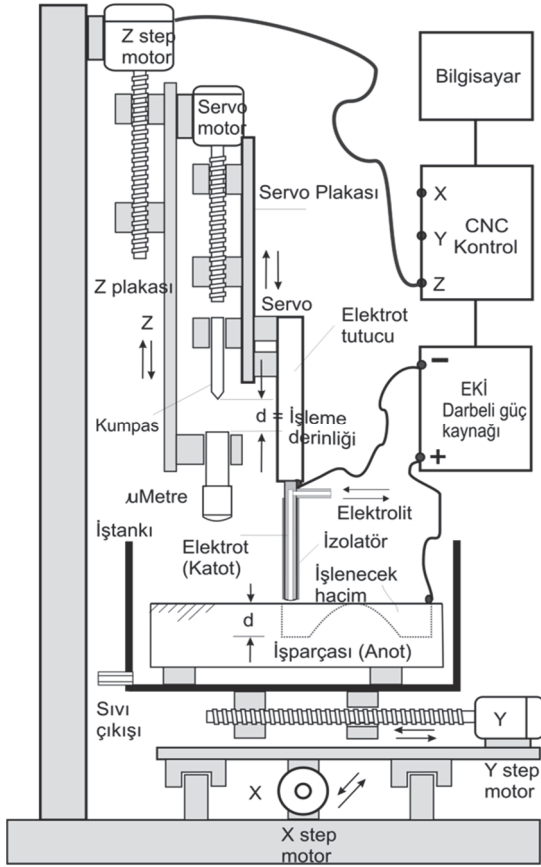
1. Üç-eksende hareketli otomatik kontrollü özel üretim tezgâha bağlı takım ucu sistemi,
2. Takım ucu ve işparçası arasındaki boşluğu dikey yönde kontrol eden servo sistem,
3. Elektrokimyasal işleme için uyumlu darbeli doğru akım güç kaynağı,
4. İşleme sonrası kirli elektrolit vakumlama, arıtma ve geri-çevrim sistemi.

3.1. Takım Ucu Sistemi (Machine Tool System)

Geliştirilen CNC takım ucu sistemi x-y-z eksenlerinde otomatik kontrollü step motorlar ile ~10 µm mekanik hassasiyet ve 300x400x150 mm mesafede hareket kabiliyetine sahiptir (Tablo 1). Metal üzerine işlenecek iki veya üç boyutlu şekil, bilgisayar bağlantısı ve CNC kontrol birimi arayüzü aracılığı ile takım ucunun bağlı olduğu CNC tezgâhına iletilmektedir. İşparçası, bir banyo içerisinde elektrolitten kaynaklanabilecek korozyon etkilerine dayanıklı T-kanallı bir plakaya sabitlenmektedir. Sistemin işparçası üzerinde üç eksenle hareketi sağlanarak istenilen şekil elde edilmektedir. Çalışmada takım ucu olarak 2.5 mm çapta silindir şeklinde bakır tel kullanılmıştır. Sistem, mikro delikler için daha küçük çaplı iletken tellerin kullanılması için uygundur.

Tablo 1. CNC-EKİ Tezgâhı Teknik Özellikleri (Technical Properties of the CNC-ECM Device)

CNC Tezgâhı Özellikleri	
<i>Eksenler</i>	X: 300 mm, Y: 400 mm, Z: 150 mm
<i>Max. Eksen Hızı</i>	40 mm/s
<i>Hareket Kontrolü</i>	Step motorlar: 5 V, 1.5 A, 100 oz-inch (Sanyo-Denki, Japonya) Mikrostep akıllı sürücüler: 0.5-4 A, 200-10000 step/devir (MAR-EL Makina, Türkiye)
<i>Hareket Elemanları</i>	Tüm eksenlerde bilyalı vida ve bilyalı kızaklar (Schneider, Almanya)
<i>Sistem Kontrol</i>	HIZAL kontroler (HIZAL, Türkiye)
<i>Güç Kaynağı</i>	48 V, 10 A (HIZAL, Türkiye)
<i>Yazılımlar</i>	Takım yolu hesaplama: ArtCAM (Delcam, İngiltere) Üç-boyutlu MatkapPro MP43328 (HIZAL, Türkiye)
EKİ Tezgâhı Özellikleri	
<i>Güç Kaynağı</i>	10-30 V, 100-200 A (HIZAL, Türkiye)
<i>Servo Motor</i>	12 V, 4 A (Honeywell, ABD)
<i>Servo Kontrol Sistemi</i>	12 V, 10 A (HIZAL, Türkiye)
<i>İş Kazanı</i>	PVC 500 mm x 300 mm x 200 mm (Yükseklik)
<i>İş Tablası</i>	Paslanmaz çelik 200 mm x 150 mm
<i>Devir Daim Pompası</i>	220 V, 300 W, 50 l/dk Elektrolit akışı
<i>CNC-EKİ Tezgâhı</i>	600 mm x 800 mm x 1500 mm (Yükseklik), 300 kg



Şekil 2. Geliştirilen EKİ sistemi (The developed ECM system)

3.2. Servo Sistem (Servo System)

Takım ucunun dikey yöndeki hareketini akıma bağlı olarak kontrol ederek elektrotlar arası mesafeyi ayarlayan servo kontrollü sistem esas pozisyonla istenilen pozisyonun kıyaslanması sonucu mesafeyi koruyacak yönde hareket sağlayarak işleme sırasında takım ucunun işparçasına temas ederek kısa devre oluşmasına engel olmaktadır. Bu işlem, takım ucu pozisyon bilgisinin elektrotlar arası akım değeri ile tespit edilmesine dayanan tipik bir oransal (P) kontrol sistemidir ve EKİ’de hataların azaltılması bakımından gerekli olmuştur. Hassas işleme için elektrotlar arası mesafenin küçük olması gerekmektedir [33]; ancak elektrolit içinde hidrojen gazı baloncukları oluşması, elektrot yüzeylerinde tepkime ürünleri ve ince oksit tabakası oluşması, elektrotta ark oluşması [34], makinanın kararsız işlemesi ve takım ucu pozisyon hataları hassas işlemede gerekli olan küçük elektrot aralığını kısıtlamaktadır [12, 35].

3.3. Darbeli Güç Kaynağı (Pulsed Power Supply)

Doğru akım (DA) güç kaynağı 220 V, 50 Hz., 6 kVA giriş gücü özelliklerine sahiptir. EKİ tezgâhı ile uyumludur ve daha iyi hassasiyet için 10-30 V ve 100-200 A aralığında zaman kontrollü kare dalgalar

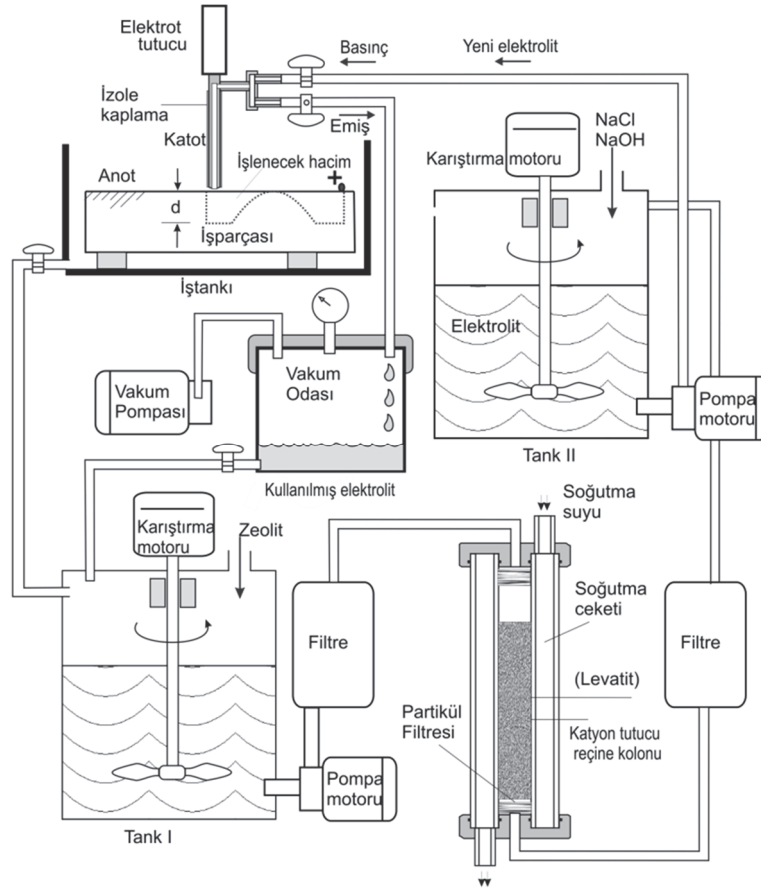
üretebilecek kapasitededir (Tablo 1). Yüksek frekans ile çalıştırıldığında, uygulanan gerilim ve akım değerlerinin küçülmesiyle hassas mikro-işleme yapılmasını sağlamaktadır. Transistörlü darbe akım jeneratörü, akım ve gerilim geri beslemeli kontrol birimi, dijital akım ve gerilim göstergeleri, kısa devre ve aşırı akım koruma sistemi, CNC tezgâhı eksen motorlarını çalıştıran uyumlu sürücüler ve kontrol sistemi içermektedir.

3.4. Elektrolit Vakumlama, Arıtma ve Geri-Çevrim Sistemi (Electrolyte Vacuum, Purification and Recycle System)

EKİ, elektrolit olarak tuzlu su kullanılması bakımından çevreye zararlı değildir; ancak işleme sırasında işparçası yüzeyinden iyonlaşarak ayrılan ağır metal iyonları ve bunların elektrolit ile tepkimesiyle oluşan metal hidroksit bileşikleriyle çevresel risk yaratmaktadır. Elektrolite karışan metal iyonları elektrotlar arası iletkenliği de arttırdığından sistemin kararlı çalışmasını olumsuz etkilemektedir. Sisteme sürekli taze elektrolit beslenmesi ve kirlenen elektrolitin uzaklaştırılması veya arıtılıp geri beslenmesi gerekmektedir. Çalışmada, sıvı atıktaki ağır metalin giderilmesi için üç aşamalı bir arıtma sistemi tasarlanmıştır. Kirli elektrolit, işparçası yüzeyinden vakumlanarak atık toplama tankına geçtikten sonra, ağır metal iyonu cinsi ve derişimine bağlı olarak doğal zeolit ile bekletme, filtreleme (Whatman 41 kağıt filtre) ve iyon değiştirme işlemlerinden geçirilip (Şekil 3) sistemde yeniden kullanılmaktadır. İşlenen malzemeye göre seçici iyon değiştirici özelliğe sahip reçine kullanılarak ağır metal iyonları tamamıyla giderilebilmiştir. Na iyonlarının bir kısmı da reçine yüzeyine çekildiğinden arıtılan çözeltili sisteme girmeden tuz takviyesi yapılmaktadır.

4. EKİ ÇALIŞMA KOŞULLARI (OPERATING CONDITIONS OF ECM)

Çalışma kapsamında üretilen prototipte (Tablo 2) yaklaşık olarak 15-25 V gerilim ile çalışılmaktadır. Malzemeye ve elektrolit cinsi ve derişimine bağlı olarak işleme bölgesinde akım değerleri 1-5 A arasında değişmektedir. Özellikle mikro boyutta çalışabilme özelliği temel alınarak takım ucu boyutları ve hızı, elektrotlar arası işleme mesafesi (machining gap), elektrolit akış hızı ve sıcaklığı gibi değişkenler de incelenmiştir [19, 36, 37]. Bakır işleme için çalışma parametreleri şöyledir: Takım ucu olarak 2.5 mm çapa sahip çevresi yalıtılmış silindir şeklinde bakır bir telin kullanıldığı işlemlerde 240 g/l NaCl ile hazırlanan ve 1.6 ml/s hızla akan elektrolit için 15 V civarında gerilim uygulanarak akımın 1.2-3.0 A arasında değiştiği belirlenmiştir. Tungsten karbür malzemelerin işleme sürecinde aynı takım ucu kullanılarak (Şekil 4) 10-150 g/l aralığında farklı derişimlerde NaCl ve NaOH karışımı içeren elektrolit



Şekil 3. EKİ için elektrolit vakumlama, arıtma ve geri-çevrim sistemi (Electrolyte vacuum, purification and recycle system for ECM)

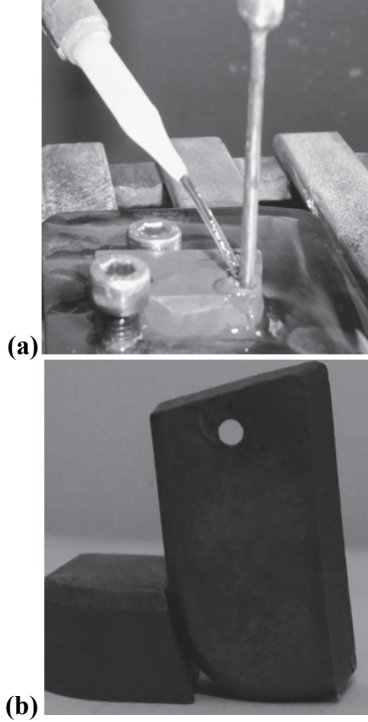
Tablo 2. Elektrokimyasal işleme (EKİ) ve elektrokimyasal mikro işleme (EKİMİ) sistemlerinde [14] ve geliştirilen prototipte çalışma koşulları (Operating conditions in electrochemical machining (ECM) and micro electrochemical machining (MECM) systems [14] and in the developed prototype)

İşleme özellikleri	EKİ [14]	EKİMİ [14]	Prototip
Gerilim	10-30 V	<10 V	15-25 V
Akım	150-10000 A	<1 A	1-5 A
Akım Yoğunluğu	20-200 A/cm ²	75-100 A/cm ²	20-100 A/cm ²
Güç Kaynağı	DA, Sürekli/Darbeli	DA, Darbeli	DA, Darbeli 111 kHz
Elektrolit Akış Hızı	10-60 m/s	<3 m/s	2 m/s
Elektrolit Tipi	Tuz çözeltisi	Tuz/alkalin çözeltisi	NaCl ve NaOH sulu çözeltisi
Elektrolit Sıcaklığı	24-65 °C	37-50 °C	20-30 °C
Elektrolit Derişimi	>20 g/l	<20 g/l	10-150 g/l NaCl-NaOH
Takım Ucu Boyutu	Orta - Büyük boy	Mikro boy	2,5 mm çap
İşlem	Maskesiz	Maskeli/Maskesiz	Maskeli
Elektrot Aralığı	100-600 µm	5-50 µm	50-100 µm
Elektrot Yan Boşluğu	>20 µm	<10 µm	20-50 µm
İşleme Hızı	0,2-10 mm/min	5 µm/min	10-100 µm /min
Hassasiyet	± 0,1 mm	± 0,02-0,1 mm	~0,1 mm
Yüzey Pürüzlülüğü	0,1-1,5 µm	0,05-0,4 µm	Ölçülmemiştir
Çevresel Zararlar	Ağır metal iyonu	Az-Zararsız	Yok

için 15-20 V arası değişen gerilim değerleri ile 1-5 A arası işleme akım değerleri tespit edilmiştir. Akım yoğunluğu her iki uygulama için, katot ucu yüzey alanı A (cm²) ve işleme sırasında ölçülen akım değeri I (A) kullanılarak I/A ilişkisinden 20-100 A/cm² olarak hesaplanmıştır. İşleme hızını arttırmak amacı ile yapılan ilk EKİ çalışmalarında [34] akım yoğunluğunun işparçasına, elektrolit cinsine ve takım

ucu hızına göre 95-19700 A/in² (~ 15-3535 A/cm²) arasında çok yüksek değerlere, yüzey kalitesinin bozulması pahasına, çıkabildiği belirtilmiştir. Çalışmada başarı sınırı yumuşak (bakır) ve sert (tungsten karbür) metal ve alaşımlarında malzeme kaldırma ve özellikle sert metal malzemelerde ince delik açabilme yeteneğinin kanıtlanmasıdır (Şekil 4(b)). Yüzey kalitesi görsel olarak incelenmiştir ve

pürüzlülük analizi bu aşamada yapılmamıştır. Takip eden çalışmalarda 0,05 µm yüzey pürüzlülüğü hedeflenmektedir.



Şekil 4. (a) 2,5 mm çaplı bakır takım ucu ile elektrokimyasal işleme ve (b) Tungsten karbür işparçasında delik açılması ((a) Electrochemical machining with a 2,5 mm diameter copper tool piece and (b) Hole drilling on a tungsten carbide workpiece)

4.1. Elektrolitin Tespiti (Determination of the Electrolyte)

Elektrolit çözeltisi cinsinin ve derişiminin işlenecek her farklı malzeme için ayrı ayarlanması gerekmektedir. İnorganik tuz çözeltileri iyi elektrik iletkenliği sağladığından kullanışlıdır; ancak mikro boyutta daha hassas işleme için alkalın çözeltiler (Tablo 2) kullanılmaktadır [14, 25, 38]. En iyi elektrolit derişimi, işleme için gerekli akım yükünü iletebilecek, metal yüzeyde paslanmaya sebep olmayacak ve istenilen yüzey pürüzsüzlüğünü sağlayabilecek seviyede olmalıdır. Çalışmada bakır ve tungsten karbür işparçaları için iletkenliği sağlayıcı NaCl ve metal oksidasyon tepkimelerini pasivize edici NaOH sulu çözeltileri 10-150 g/l arasında kullanılmıştır.

4.2. Elektrotların Yalıtımı (Insulation of the Electrodes)

Anot işparçasının işlem görmesi istenmeyen bölgelerinin elektrik yalıtkan bir malzeme ile kaplanması ile işleme maskeli yapılabilmektedir. Çalışmada, derin işleme yapılması ve özellikle delik açılması sırasında takım ucunun yan yüzeylerinden kaynaklanan elektrik alanını engellemek amacı ile takım ucu yan yüzeyleri sağlam bir epoksi akrilik

yapışkan ile kapatılmıştır. İşparçasının işlenmeyecek yüzeyi ise kolay çıkarılabilen nitroselüloz film ile kaplanmıştır. İşleme sonucu hassasiyet 0,1 mm civarında olup 0,02 mm hedeflenmektedir.

4.3. Malzeme Kaldırma (Material Removal)

EKİ’de malzeme kaldırma miktarı m (g) kuramsal olarak, elektrik akımı I (A)’nın t (dk) süre aktığı ve makina verimliliğinin η olduğu durumda Faraday eşitliği $m = \eta EI t / F$ ile hesaplanmaktadır. F Faraday sabitidir (~ 96500 Kulomb), E ise işlenen parça saf metal ise atom ağırlığı A ’nın valans elektron sayısı Z ’ye oranı $E = A/Z$ ’nin elektrokimyadaki dengidir. Malzeme kaldırma hızı $MKH = m/t$ (g/dk) toplam akım ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Çalışmada işlenen malzeme ve çalışma koşullarına bağlı olarak yapılan süreye bağlı kütle değişimine dayanan ölçümlerde MKH 0,007-0,025 g/dk ve kuramsal hesaplarla yapılan kıyaslamalar sonucu makina verimliliği $\eta \sim \% 60$ bulunmuştur. Artan gerilim ve akım ile birlikte işleme alanının, örneğin delik açma sırasında delik çapının, doğru orantılı olarak büyüdüğü görülmüştür [35, 38, 39]. Prototipte, delik çapının sabit kalması amacıyla dikey yönde kontrolü sağlayan servo sistem kullanılarak takım ucu ilerleme hızının akım yoğunluğu ile doğru orantılı değişmesi sağlanmıştır.

5. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

EKİ tezgâhında elektrolit tipi, iletkenliği ve derişimi, elektrik potansiyel (voltaj) farkı, doğru akım güç kaynağı darbe frekansı ve elektrolit akış hızına göre malzeme kaldırma hızı ve işleme kalitesi değişim göstermektedir:

- İşleme sırasında elektrolit derişimindeki değişime bağlı olarak elektrik iletkenliğinin değişmesinin sonuçlarından biri sıcaklığın artması ve malzemenin direncinde değişime sebep olmasıdır. Böylelikle akım yoğunluğunun değişmesi ile tüm sistem zincirleme olarak değişikliğe uğramakta ve kararsız davranmaktadır.

- Sürekli elektrolit akışı sıcaklığın ve derişimin sabit tutulmasında etkili olmaktadır.

- Kararsız davranış etkileri, darbeli güç kaynağı kullanımı ve “on”-“off” zamanlarının ayarlanması ile azaltılabilmektedir. “off” zamanının uzun tutulması taze elektrolit beslemesi ile sistemin soğuyarak optimum makina işleme sıcaklığında çalışmasını sağlarken darbe “on” zamanı işleme hızı ve hassasiyetini etkilemektedir.

- Darbeli akım frekansının artması ile daha hassas metal kaldırma yeteneği elde edilmiştir. Uzun darbe “on” zamanı işleme süresini kısaltırken kısa işleme zamanı her darbeye düşük MKH ile daha hassas işleme sağlamaktadır.

- Optimum darbe “on-off” zamanları çalışma parametrelerine bağlıdır, istenen besleme hızı ve işparçası şekline göre değişmektedir.

- EKİ'nin en önemli üstünlüklerinden olan yüzey kalitesi ancak düşük akım yoğunluğu aralığında sağlanabilmektedir.
- Takım ucunun hangi metal malzemeden olacağının önemi olmamasına rağmen hedeflenen geometriyi en doğru verecek takım ucu tasarımı ancak deneysel çalışma sonrası elde edilebilecek bir birikim ile yapılabilmektedir.
- Katot ucunun anoda karşı gelen ve elektrik iletkenliği olması gereken alt yüzeyi hariç tüm yan yüzeylerinin ve anodun işlenmeyecek yüzeyinin yalıtkan malzeme ile kaplanması istenmeyen metal iyon kaldırma sorununun önüne geçmiştir.

Sonuç olarak teknoloji ve sanayi açısından önemli fakat işlenmesi zor olan sert malzemelerin yüksek kalite ve düşük masrafla işlenebilmesi çalışmada geliştirilen otomatik kontrollü elektrokimyasal metal işleme tezgâhı ile gerçekleştirilmiştir. İç ve dış piyasadan imalat sektörüne yüksek talep olan Türkiye'de EKİ ile sanayinin özellikle hassas ve karmaşık üretimler gerektiren imalat kabiliyeti arttırılacaktır. Tezgâh üzerinde geliştirilecek olan özgün yöntemler ülke teknolojisine, sanayisine ve ekonomisine ar-ge, tasarım ve üretim yöntemleri bilgisi alanlarında önemli katkı sağlayacaktır.

TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENTS)

Çalışma, T.C. Bilim, Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı 621.TGSD.2010 numaralı Teknogirişim Programı, 111M226 numaralı Tübitak Araştırma desteği ve Hacettepe Üniversitesi 013D01602001 numaralı BAB desteği ile gerçekleşmiştir. Yazar, ODTÜ Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. E. Mirzahan Hızal'a desteği için teşekkürlerini sunmaktadır.

KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Aaron, T. E., "Evaluation and Selection of Parts for Electrochemical Machining (ECM)", Rosemont, IL, USA, 9141-9146, 1984.
2. Grzesik, W., **Advanced Machining Processes of Metallic Materials Theory, Modelling and Applications**, Elsevier, 2008.
3. McGeough, J. A., **Advanced Methods of Machining**, Chapman and Hall, 1988.
4. Jain, V. K. ve Pandey, P. C., "On the Complex Nature of ECM Process [Electrochemical Machining]", **Mechanical Engineering Bulletin**, Cilt 11, No 1, 3-8, 1980.
5. Bin, W., Chengye, Y. ve Jiawen, X., "Numerical-Controlled Electrochemical Machining (NC-ECM)", American Society of Mechanical Engineers, Production Engineering Division, Chicago, IL, USA, 135-140, 1988.
6. Kozak, J., Dabrowski, L., Ruszaj, A. ve Slawinski, R., "Computer Simulation of 3-D Numerically Controlled Electrochemical Machining (Ecm-Nc) with a Spherical Tool Electrode", **11th International Conference on Computer Aided Production Engineering, London, UK**, 205-210, 1995.
7. Rajurkar, K. P., Zhu, D., McGeough, J. A., Kozak, J. ve De Silva, A. K. M., "New Developments in Electro-Chemical Machining", **Annals of the CIRP**, Cilt 48, No 2, 567-579, 1999.
8. Datta, M. ve Romankiw, L. T., "Application of Chemical and Electrochemical Micromachining in the Electronics Industry", **Journal of the Electrochemical Society**, Cilt 136, No 6, 285C-292C, 1989.
9. Datta, M. ve Harris, D., "Electrochemical Micromachining: An Environmentally Friendly, High Speed Processing Technology", **Electrochimica Acta**, Cilt 42, No 20-22, 3007-3013, 1997.
10. Datta, M., "Micromachining by Electrochemical Dissolution", **Micromachining of Engineering Materials**, Marcel Dekker, Inc, New York, 239-276, 2002.
11. Datta, M., "Electrochemical Processing Trends in Micro/Nano Electronics", **8th International Symposium on Magnetic Materials, Processes, and Devices**, Honolulu, Hawaii, 126-143, 2004.
12. Bhattacharyya, B., Doloi, B. ve Sridhar, P. S., "Electrochemical Micro-Machining: New Possibilities for Micro-Manufacturing", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 113, No 1-3, 301-305, 2001.
13. Bhattacharyya, B., Mitra, S. ve Boro, A. K., "Electrochemical Machining: New Possibilities for Micromachining", **Robotics and Computer-Integrated Manufacturing**, Cilt 18, No 3-4, 283-289, 2002.
14. Bhattacharyya, B., Munda, J. ve Malapati, M., "Advancement in Electrochemical Micro-Machining", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 44, No 15, 1577-1589, 2004.
15. Lee, S.-J., Hsu, C.-D., Guan, F.-H. ve Chung, S.-W., "Micro-Electrochemical Machining (Mecm) for Metallic Flow Channels of Fuel Cells", **1st European Fuel Cell Technology and Applications Conference**, Rome, Italy, 213, 2005.
16. Wansheng, Z., Xiaohai, L. ve Zhenlong, W., "Study on Micro Electrochemical Machining at Micro to Meso-Scale", **1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems**, Piscataway, NJ, USA, 5, 2006.
17. Bhattacharyya, B., Malapati, M., Munda, J. ve Sarkar, A., "Influence of Tool Vibration on Machining Performance in Electrochemical Micro-Machining of Copper", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 47, No 2, 335-342, 2007.

18. Bhattacharyya, B. ve Munda, J., "Experimental Investigation into Electrochemical Micromachining (Emm) Process", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 140, 287-291, 2003.
19. Bhattacharyya, B. ve Munda, J., "Experimental Investigation on the Influence of Electrochemical Machining Parameters on Machining Rate and Accuracy in Micromachining Domain", **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, Cilt 43, No 13, 1301-1310, 2003.
20. Munda, J. ve Bhattacharyya, B., "Investigation into Electrochemical Micromachining (EMM) through Response Surface Methodology Based Approach", **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Cilt 35, No 7-8, 821-832, 2008.
21. Munda, J., Malapati, M. ve Bhattacharyya, B., "Control of Micro-Spark and Stray-Current Effect During Emm Process", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 194, No 1-3, 151-158, 2007.
22. Moore, G. E., "Cramming More Components onto Integrated Circuits", **Electronics**, Cilt 38, No 8, 114-117, 1965.
23. Martin, P. M., Matson, D. W. ve Bennett, W. D., "Microfabrication Methods for Microchannel Reactors and Separations Systems", **Chemical Engineering Communications**, Cilt 173, Taylor & Francis, 245-254, 1999.
24. Erden, A., Geleneksel Olmayan Yapım Yöntemleri, **Makina Mühendisliği El Kitabı, Üretim ve Tasarım**, Cilt 2, TMMOB Makina Mühendisleri Odası, Ankara, 15.01-15.53, 1996.
25. Sun, J. J., Taylor, E. J., Gebhart, L. E., Renz, R. P. ve Zhou, C. D., "Final Finishing of a Metal Surface by an Electrochemical Machining (Ecm) Process", **AESF Annual Technical Conference**, Cincinnati, OH, USA, 189-199, 1999.
26. Çoğun, C., Kocabaş, B. ve Özgedik, A., "Elektro Erozyon İle İşlemede (EEİ) İşparçası Yüzey Pürüzlülük Profiline Deneysel ve Teorik Olarak İncelenmesi", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 19, No 1, 97-106, 2004.
27. Ekmekçi, B., Tekkaya, A. E. ve Erden, A., "A Semi-Empirical Approach for Residual Stresses in Electric Discharge Machining (EDM)", **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, Cilt 46, No 7-8, 858-868, 2006.
28. Ergun, Z. E. ve Çoğun, C., "Elektro Erozyon İle İşleme (EEİ) İş Parçası Yüzey Karakteristiklerinin Deneysel İncelenmesi", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 21, No 3, 427-441, 2006.
29. Sarıkavak, Y. ve Can, C., "Elektro Erozyon İşlemede İşleme Mekanizmasının Isıl Modellenmesi", **Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University**, Cilt 25, No 3, 517-531, 2010.
30. Bhattacharyya, B., Doloi, B. N. ve Sorkhel, S. K., "Experimental Investigations into Electrochemical Discharge Machining (Ecdm) of Non-Conductive Ceramic Materials", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 95, No 1-3, 145-154, 1999.
31. Doloi, B., Bhattacharyya, B. ve Sorkhel, S. K., "Electrochemical Discharge Machining of Non-Conducting Ceramics", **Defence Science Journal**, Cilt 49, No 4, 331-338, 1999.
32. Jain, V. K. ve Adhikary, S., "On the Mechanism of Material Removal in Electrochemical Spark Machining of Quartz under Different Polarity Conditions", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 200, No 1-3, 460-470, 2008.
33. De Silva, A. K. M., Altena, H. S. J. ve McGeough, J. A., "Precision Ecm by Process Characteristic Modelling", **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Cilt 49, No 1, 151-156, 2000.
34. Cook, N. H., Loutrel, S. P. ve Meslink, M. C., Increasing Electrochemical Machining Rates - Final Report, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Massachusetts, Sonuç Raporu, 1967.
35. Bilgi, D. S., Jain, V. K., Shekhar, R. ve Mehrotra, S., "Electrochemical Deep Hole Drilling in Super Alloy for Turbine Application", **Journal of Material Processing Technology**, Cilt 149, 445-452, 2004.
36. Bhattacharyya, B. ve Sorkhel, S. K., "Investigation for Controlled Electrochemical Machining through Response Surface Methodology-Based Approach", **Journal of Materials Processing Technology**, Cilt 86, No 1-3, 200-207, 1999.
37. Li, Z. ve Niu, Z., "Process Parameter Optimization and Experiment Study of Aero-Engine Blade in Electrochemical Machining", **Advanced Materials Research**, Cilt 135, 418-423, 2010.
38. Sun, C.-H., Zhu, D. ve Li, Z.-Y., "Prediction of the Workpiece Accuracy During the Electrochemical Machining Based on Bp Neural Network", **Huanan Ligong Daxue Xuebao/Journal of South China University of Technology (Natural Science)**, Cilt 32, No 10, 24-27, 2004.
39. Li, Z. ve Niu, Z., "Process Parameter Optimization and Experimental Study of Micro-Holes in Electrochemical Micromachining Using Pulse Current", **Advanced Materials Research**, Cilt 135, 293-297, 2010.