

**Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE
GRAFİT TOZU KARIŞIMLI DİELEKTRİK SIVININ
İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Emre ÜNSES

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2012

ANKARA

**Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE
GRAFİT TOZU KARIŞIMLI DİELEKTRİK SIVININ
İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN
DENEYSEL İNCELENMESİ**

Emre ÜNSES

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ**

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

MAYIS 2012

ANKARA

Emre ÜNSES tarafından hazırlanan “Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE GRAFİT TOZU KARIŞIMLI DİELEKTRİK SIVININ İŞLEME PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ” adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

.....

Tez Danışmanı, Mak.Müh. Ana Bilim Dalı, ODTÜ

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans tezi olarak kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Bedri TUÇ

.....

Mak.Müh. Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Can ÇOĞUN

.....

Mak.Müh. Ana Bilim Dalı, ODTÜ

Prof. Dr. İbrahim USLAN

.....

Mak.Müh. Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Prof. Dr. Haluk DARENDELİLER

.....

Mak.Müh. Ana Bilim Dalı, ODTÜ

Prof. Dr. Mustafa YURDAKUL

.....

Mak.Müh. Ana Bilim Dalı, G.Ü.

Tarih: 28/05/2012

Bu tez ile G.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Bilal TOKLU

.....

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Emre ÜNSES

**Ti-6Al-4V ALAŞIMININ ELEKTRO EROZYON İLE İŞLENMESİNDE
GRAFİT TOZU KARIŞIMLI DİELEKTRİK SIVININ İŞLEME
PERFORMANSINA ETKİSİNİN DENEYSEL İNCELENMESİ
(Yüksek Lisans Tezi)**

Emre ÜNSES

**GAZİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Mayıs 2012**

ÖZET

Ti-6Al-4V alaşımı talaşlı imalatla olduğu kadar alımlanmamış imalat yöntemlerinden elektro erozyon işlemede (EEİ) de sıkıntılar yaratmaktadır. EEİ ile işlemede bu alaşım çok düşük işleme hızı yanında oldukça yüksek elektrot aşınması değerleri vermektedir. Bu çalışmada EEİ’de kullanılan dielektrik gazyağına grafit tozu katılarak işleme performansının (işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma ve yüzey pürüzlülüğü) artırılması hedeflenmiştir. Gazyağına 5 g/l konsantrasyonunda karıştırılan grafit tozunun işleme hızını toz katkısız EEİ’ye göre %24,3 ile %103,6 arasında arttırdığı, yüzey pürüzlülüğünü %1,2 ile %17,03 arasında iyileştirdiği (düşürdüğü), bağıl aşınmayı %0,7 ile %25 arasında azalttığı, elektrot aşınmasını ise %8,2 ile %55 arasında arttırdığı gözlemlenmiştir. Her iki koşulda işlenen işparçası yüzeylerinin üç boyutlu topografik görüntüleri kullanılarak elde edilen yüzeylerin karakteristikleri karşılaştırılmıştır. Grafit toz katkılı işlemlerde, işparçası $R_{z(DIN)}$ değerlerinin %5 ile %16 arasında azaldığı görülmüştür.

Bilim Kodu : 914.1.140
Anahtar Kelimeler :Elektro erozyon ile işleme, Ti-6Al-4V, toz katkılı dielektrik, yüzey pürüzlülüğü, işleme hızı, elektrot aşınması, yüzey topoğrafyası
Sayfa adedi : 56
Tez Danışmanı : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

**AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON EFFECT OF THE GRAPHITE
POWDER MIXED DIELECTRIC FLUID ON ELECTRO DISCHARGE
MACHINING OF Ti-6Al-4V ALLOY
(M.Sc. Thesis)**

Emre ÜNSES

**GAZİ UNIVERSITY
INSTITUTE OF SCIENCE and TECHNOLOGY
May 2012**

ABSTRACT

Ti-6Al-4V alloy creates difficulties in electric discharge machining (EDM) - one of the non-conventional machining methods - as well as conventional machining methods. It is observed that material removal rate of the titanium alloys are very low besides their high electrode wear ratio in EDM. The goal of this study is to improve the EDM performance characteristics (namely, material removal rate, electrode wear ratio, relative wear and surface roughness) with the addition of graphite powder into the dielectric fluid. The conducted experiments in this study have shown that 5 g/l concentration of graphite powder increased the material removal rate between 24.3% and 103.6%, reduced the surface roughness between 1.2% and 17.03%, decreased the relative wear between 0.7% and 25% and increased the electrode wear ratio between 8.2% and 55%. Three dimensional topographic views of the machined surfaces were created for both experimental conditions. The surface topographies have shown that the addition of the graphite powder, decreased $R_{z(DIN)}$ values between 5% and %16.

Science Code : 914.1.140
Key Words : Electrical discharge machining, Ti-6Al-4V, powder mixed dielectric, surface roughness, material removal rate, electrode wear ratio, surface topography
Page Number :56
Adviser : Prof. Dr. Can ÇOĞUN

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren danışmanım saygıdeğer Hocam Prof. Dr. Can ÇOĞUN'a, deneyler sırasında tecrübeleri ile yardımcı ve destek olan Dr. H. Bekir ÖZERKAN, Dr. Gökhan KÜÇÜKTÜRK ve Dr. Asım GENÇ'e, deney düzeneklerinin kurulumu sırasında yardımını esirgemeyen teknisyen Kadir YILMAZ'a, üç boyutlu yüzey topoğrafyalarının oluşturulmasında yardımcı olan Dr. Soner BÜYÜKATALAY'a teşekkürü bir borç bilirim.

Bugüne kadar bana maddi ve manevi desteğini esirgemeyen, her türlü zorlukta yanımda olan aileme de sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ayrıca yüksek lisans yapmama imkan verdikleri için TÜBİTAK UZAY kurumuna ve değerli yöneticilerim Mustafa Sancay KIRIK, Onur HALİLOĞLU, C. Levent ERTÜRK ile değerli çalışma arkadaşlarım Vakkas, Ömer, Özgür Y., Özgür S., Murat, Himmet, Derya, Erol, Levent, Fethi ve Sinan'a da vermiş oldukları destekten dolayı teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	iv
ABSTRACT.....	vi
TEŞEKKÜR.....	viii
İÇİNDEKİLER	ix
ÇİZELGELERİN LİSTESİ.....	xi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ	xii
RESİMLERİN LİSTESİ	xiv
SİMGELER VE KISALTMALAR.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. TEORİ	10
2.1. Elektro Erozyon ile İşleme, EEİ.....	10
2.1.1. Klasik EEİ çalışma sistemi	11
2.1.2. Toz katkılı EEİ (TK/EEİ) işleme mekanizması	13
2.1.3. EEİ yönteminin temel parametreleri	15
3. DENEYLER.....	20
3.1. EEİ Tezgahı.....	20
3.2. Deneylerde Kullanılan TK/EEİ Tankı ve Toz Karışım Sistemi.....	22
3.3. Deneylerde Kullanılan Grafit Tozu	23
3.4. İşparçası ve Elektrot.....	24
3.5. Deneylerde Kullanılan İşleme Parametreleri.....	25
3.6. İİH, EAH ve BA Değerlerinin Belirlenmesi.....	27
3.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri	27

Sayfa

3.8. Yüzey Topoğrafyasının Elde Edilmesi.....	28
4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA.....	29
4.1. Gazyağı ile Yapılan Deneyler.....	29
4.1.1. P_d 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi	29
4.1.2. t_s 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi.....	29
4.1.3. I_d 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi	30
4.2. Grafit Tozu ile Yapılan Deneyler.....	30
4.2.1. Grafit tozu konsantrasyonunun belirlenmesi	30
4.2.2. P_d 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi	33
4.2.3. t_s 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi.....	34
4.2.4. I_d 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi.....	34
4.3. Gazyağlı ve Grafit Tozu Karışımlı Gazyağlı Deneylerin Karşılaştırılması.....	34
4.3.1. Grafit tozunun $\dot{I}H$ 'ye etkisi.....	34
4.3.2. Grafit tozunun Ra'ya etkisi.....	35
4.3.3. Grafit tozunun EAH'ye etkisi.....	37
4.3.4. Grafit tozunun BA'ya etkisi.....	37
4.4. Grafit Tozunun Yüzey Topoğrafyasına Etkisi	38
4.5. Ç1040 ve Ti-6Al-4V 'nin EE Performans Çıktılarının Karşılaştırılması	43
5. SONUÇLAR	47
KAYNAKLAR	49
EKLER.....	52
EK-1. Yüzey pürüzlülüğü tanımları ve ölçümleri	53
EK-2. Ti-6Al-4V alaşımının özellikleri.....	55
ÖZGEÇMİŞ	56

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge	Sayfa
Çizelge 1.1. Ti-6Al-4V Alaşımı ile AISI 1040 Çeliğinin Karşılaştırılması.....	3
Çizelge 3.1. Furkan EDM M25A tezgahı teknik özellikleri	21
Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V İş parçasının kimyasal bileşimi.....	24
Çizelge 3.3. Deney Parametreleri.....	25
Çizelge 3.4. Deney planı	26
Çizelge 4.1. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve optik yöntemle elde edilen $R_{z(DIN)}$..	43

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil	Sayfa
Şekil 1.1. Ti-6Al-4V'nin ısı iletkenlik ve elektriksel direncinin sıcaklık ile değişimi	4
Şekil 2.1. EEİ yönteminin genel yapısı	10
Şekil 2.2. EEİ'de kıvılcım ile malzeme kaldırılması	12
Şekil 2.3. Ardışık boşalımların şematik gösterimi	14
Şekil 2.4. Gerilim kontrollü vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri	15
Şekil 2.5. Elektrot kutuplama türleri a) negatif kutuplama, b) pozitif kutuplama	17
Şekil 2.6. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri	18
Şekil 3.1. Grafit tozlu deneylerin yapılması için tasarlanan sirkülasyon sisteminin şematik gösterimi	22
Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan işparçası ve ölçüleri	24
Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan elektrot ve ölçüleri	25
Şekil 3.4. Fotometrik stereo yöntemi	28
Şekil 4.1. İİH'nin toz konsantrasyonu ile değişimi	31
Şekil 4.2. EAH'nin toz konsantrasyonu ile değişimi	31
Şekil 4.3. R _a 'nın toz konsantrasyonu ile değişimi	31
Şekil 4.4. C _p ile dielektrik sıvı sıcaklık değişimi a) 10g/l b) 15 g/l	33
Şekil 4.5. Grafit tozunun İİH'ye etkisi	35
Şekil 4.6. Grafit tozunun R _a 'ya etkisi	36
Şekil 4.7. Grafit tozunun EAH'ye etkisi	37
Şekil 4.8. Grafit tozunun BA'ya etkisi	38

Şekil	Sayfa
Şekil 4.9. Deney 1 ve deney 9'dan alınan 2x2mm boyutundaki bölgeden oluşturulmuş yüzey topoğrafyalarının karşılaştırılması	39
Şekil 4.10. Deney 1 ve deney 9 yüzeylerinin 0,5x0,5 mm boyutundaki bölgelerinden elde edilen grafikler.....	40
Şekil 4.11. Deney 3 ve deney 11'den alınan 2x2mm boyutundaki bölgeden oluşturulmuş yüzey topoğrafyalarının karşılaştırılması	41
Şekil 4.12. Deney 3 ve Deney 11 yüzeylerinin 0,5 x 0,5 mm boyutundaki bölgelerinden elde edilen grafikler.....	42
Şekil 4.13. Ç1040 ve Ti-6Al-4V İİH karşılaştırılması	44
Şekil 4.14. Ç1040 ve Ti-6Al-4V EAH karşılaştırılması	45
Şekil 4.15. Ç1040 ve Ti-6Al-4V BA karşılaştırılması	46
Şekil 4.16. Ç1040 ve Ti-6Al-4V R _a karşılaştırılması	46

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim	Sayfa
Resim 3.1. Deneylerde kullanılan Furkan EDM M25A elektro erozyon tezgahı	20
Resim 3.2. TK/EEİ için kurulmuş sistem.....	23
Resim 3.3. EEİ İşlenmiş Ti-6Al-4V alaşımı	27
Resim 4.1. Yetersiz t_p sonucu oluşan işparçası ve elektrot tahribatları	36

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış bazı simgeler ve kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklama
E_d	Boşalım enerjisi, joule
V_d	Boşalım gerilimi, volt
I_d	Boşalım akımı, amper
t_d	Boşalım süresi, μs
I	Ortalama çalışma akımı, amper
V	Ortalama çalışma gerilimi
t_1	Gecikme süresi, μs
t_s	Vurum süresi, μs
t_p	Vurum ara süresi, μs
t_c	Vurum çevrim süresi, μs
V_0	Açık devre gerilimi, volt
f_c	Vurum frekansı, vurum/saniye
P_d	Dielektrik sıvı basıncı, bar
R_a	Ortalama yüzey pürüzlülüğü, μm
L_c	Örnekleme uzunluğu, mm
L_n	Ölçüm uzunluğu, mm
$R_{z(DIN)}$	Profildeki R_{ti} değerlerinin ortalaması, μm
R_t	Profildeki tepe-vadi arası yükseklik, μm
S_m	Tepe nok. arasındaki uzaklıkların ort., μm

Kısaltmalar**EEİ****İİH****EAH****BA****TK/EEİ****Açıklama**

Elektro erozyon ile işleme

İş parçası işleme hızı

Elektrot aşınma hızı

Bağıl aşınma

Toz katkılı elektro erozyon ile işleme

1. GİRİŞ

Isıl, kimyasal ve mekanik özellikler bakımından büyük ölçüde gelişmiş yeni mühendislik malzemelerini geleneksel işleme yöntemleri ile işlemek imkansız hale gelmiştir. Örneğin, yüksek mukavemetli makine çeliklerini sertleştirilmiş durumda işlemek çok zordur. Bu tür malzemeleri ekonomik hızlarda işleyebilecek sertlikteki takım bulmakta güçlük çekilmektedir. Seramik ve kompozitlerin işleme maliyetleri ve işleme sırasında verilen hasarlar bu malzemelerin uygulamada kullanılmasının en önemli engelleridir. Buna ek olarak, karmaşık şekilli, düşük toleranslı mikro işlenmiş parçalar ve üstün yüzey kalitesi gerektiren parçalara ihtiyaç vardır. Bu nedenle geleneksel işleme yöntemleri bu tür parçaların üretiminde verimli olarak kullanılamamaktadır [1].

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), alışılmamış imalat yöntemleri (AİY) arasında endüstride en yaygın olarak kullanılan ve elektriksel iletken çeşitli işparçalarını işlemede başarı ile uygulanan ısıl-elektriksel bir yöntemdir [2]. EEİ, elektriksel iletken işparçası ile elektriksel iletken takım arasında meydana gelen ardışık kıvılcımların işparçasını aşındırması ilkesine dayanır. Bu elektriksel boşalımın büyük miktarda ısı oluşturur ve bölgesel olarak işparçasının ergimesine ve buharlaşmasına neden olur [3]. Takım ve işparçası arasında 10-500 µm boşluk vardır. İşleme sırasında, takım ve işparçası iletken olmayan dielektrik sıvı içerisine gömülmüş durumdadır. İşparçası ve takım arasındaki potansiyel fark yeteri kadar yüksek olduğunda, takım ile işparçasının birbirine en yakın olduğu noktada dielektrik sıvı hızla iyonlaşır ve geçici bir kıvılcım boşalımı oluşur. Her kıvılcımın güç yoğunluğu yaklaşık 10^8 W/mm^2 'dir. Bu değer işparçası ve elektrottan küçük bir miktar parçayı ergitmek ve buharlaştırmak için yeterlidir [4].

EEİ'nin en önemli üstünlüğü, işleme performansının işparçası mekanik özelliklerinden bağımsız olması ve işparçası ile elektrotun birbirine temas etmediğinden herhangi bir kesme kuvvetinin söz konusu olmamasıdır. Bu nedenle, sert, kırılğan, yüksek mukavemetli ve yüksek sıcaklığa dayanıklı malzemelerin işlenmesinde ekonomik bir yöntemdir [5].

EEİ'nin, kalıpcılık, mikro-işleme, prototip üretimi gibi alanlarda kullanımı kaçınılmaz hale gelmektedir [6]. Günümüzde EEİ yöntemi özellikle, pres döküm kalıpları, soğuk şekillendirme kalıpları, dövme kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, kesme ve ezme kalıpları, civata başı şişirme kalıpları, toz sıkıştırma kalıpları ve takım imalatında yaygın olarak kullanılmaktadır [7]. Dalma EEİ, genellikle plastik enjeksiyon kalıplarının yapımında ve diğer kalıp üretimlerinde kullanılmaktadır.

EEİ, ısı ve elektriksel bir yöntem olduğundan, malzemenin mekanik özelliklerinin işleme üzerindeki etkisi yok denecek kadar azdır. Geleneksel işleme yöntemlerinde, malzemenin elastisite modülü, sertliği vb. özellikleri malzemenin işlenebilirliğini önemli ölçüde etkilerken, EEİ'de ise malzemenin ısı ve elektriksel özellikleri işlenebilirliğin belirlenmesinde, önemli bir role sahiptir. Nispeten düşük elektriksel dirençli bir çelik ile karşılaştırıldığında, Ti-6Al-4V çelikten yaklaşık 6-10 kat daha fazla elektriksel dirence sahiptir [8].

Titanyum doğada birden fazla kristal yapıda bulunan allotrop bir elementtir. Titanyum alaşımları, ticari saf alaşımlar, alfa (α) alaşımları, beta (β) alaşımları ve alfa-beta(α/β) alaşımları olarak dört gruba ayrılırlar [9]. Oda sıcaklığında, altıgen kristal yapıya sahip (hexagonal close-packed) alfa fazı, 882 °C'de hacim merkezli kubik yapıya (beta fazına) dönüşür. Bazı elementlerin eklenmesi ile bu sıcaklık değeri düşürülebilir ya da arttırılabilir. Al, O, N, Ga, ve C gibi α dengeleyicileri sıcaklıkta artışa sebep olur. Mo, V, Ta, Cu, Cr, Fe, Mn, Ni, Co ve H gibi β dengeleyicileri dönüşüm sıcaklığını düşürmektedir. Sn, Si and Zr gibi nötr elementlerin dönüşüm sıcaklığı üzerinde çok az etkisi vardır. Uzay sanayinde yaygın şekilde kullanılan Ti-6Al-4V alaşımı bir α/β alaşımıdır [10].

Titanyumun ısı iletkenliği çelikten yaklaşık 8 kat daha düşüktür. Bu nedenle, titanyum alaşımlarının konvansiyonel yöntemlerle işlenmesi sırasında kesici takımda yüksek sıcaklıklar oluştuğu ve bunun da hızlı takım aşınmasına neden olduğu bilinmektedir. Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde ortaya çıkan ısının %80'i takım içerisinde kalmakta, talaşla ya da düşük ısı iletkenlik nedeniyle işparçası üzerinden ısı yayılımı ile atılamamaktadır. Titanyum ve alaşımlarının işlenmesinde diğer bir sorun ise, takım yüzeyi ve talaş arasında oluşan oldukça küçük temas alanıdır. Çeliğe

göre titanyum alaşımlarının işlenmesinde daha ince talaş oluşması nedeni ile, sıcaklık değişimleri daha yüksek, ısıl etkilenmiş bölge daha dar ve kesme ucuna daha yakındır. Bu da takımın işleme sırasında 1100 °C sıcaklıklara ulaşmasına neden olmaktadır. Titanyumun 500 °C’de kimyasal olarak reaktif hale gelmesi ise diğer bir sıkıntıdır. Ayrıca titanyum ve alaşımlarında yüksek mukavemet, yüksek sıcaklıklarda da korunduğundan talaş oluşturmak için gerekli plastik deformasyon enerjisi de yüksektir. Titanyumun işlenmesinde oluşan yüksek sıcaklıklar takım ve talaş malzemesi arasında güçlü bir yapışmanın oluşmasına neden olur [13-15].

Titanyum alaşımları EEİ’de işparçası olarak kullanılan diğer malzemeler ile karşılaştırıldığında daha yüksek ergime noktasına, düşük ısıl iletkenliğe ve yüksek elektriksel dirence sahiptir. Bu da Ti-6Al-4V alaşımının EE ile işlenmesinde, işleme parametrelerinin seçimini daha kritik hale getirmektedir.

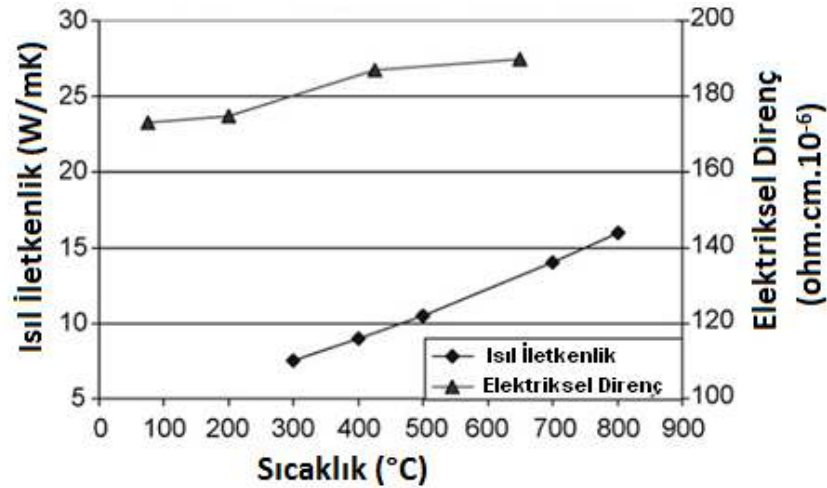
Çizelge 1.1’de EEİ’de yaygın olarak kullanılan 1040 çeliğinin ve işlenmesi çok zor olan titanyum alaşımının elektriksel dirençleri, ısıl iletkenlikleri ve ergime noktaları sunulmuştur.

Çizelge 1.1. Ti-6Al-4V Alaşımı ile 1040 Çeliğinin Karşılaştırılması [11;12]

	Yoğunluk	Sertlik (Brinell)	Maks. Çekme Muk.	Ergime Sıcaklığı (°C)	Elastisite Modülü	Elektriksel Direnç	Özgül Isı Kapasitesi	Isıl İletkenlik
Ti-6Al-4V (Grade 5)	4,43 g/cm ³	334	1080 MPa	1604 - 1660	113.8 GPa	0,000178 ohm.cm	0,5263 J/g°C	6,7 W/mK
1040 Çeliği	7,845 g/cm ³	163	550 MPa	1400 - 1450	200 GPa	0,0000171 ohm.cm	0,486 J/g°C	50,7 W/mK

Malzemelerin elektriksel dirençlerinin büyük oranda sıcaklıklarına bağlı olduğu bilinmektedir. EEİ süresince, sabit miktarda ısı her boşalım ile işparçası yüzeyine aktarılmaktadır. Kıvılcımların sıcaklığı, malzemenin ergime sıcaklığından çok yüksek olmakla beraber, İİH, genelde işparçasına aktarılan bu ısının ne kadar hızlı iletildiğine bağlıdır. Ti-6Al-4V alaşımının kötü ısıl iletkenliğe ve yüksek elektriksel dirence sahip olması sebebiyle, uygulanan elektriksel enerjinin işparçasına iletimi zordur. Ayrıca, işleme sırasında oluşan yüksek ısı nedeniyle işparçası sıcaklığı ve dolayısıyla elektriksel direnci artmaktadır. Şekil 1.1’de Ti-6Al-4V alaşımının ısıl

iletkenlik ve elektriksel direncinin sıcaklık ile değişimi görülmektedir. Bu nedenlerle EEİ’de titanyum alaşımlarının işlenmesi zordur.



Şekil 1.1. Ti-6Al-4V’nin ısı iletkenlik ve elektriksel direncinin sıcaklık ile değişimi [16]

Titanyum ve alaşımlarının üstün ısı iletkenlik ve mekanik özelliklere sahip olmaları nedeniyle sanayide yaygın olarak kullanılmaya başlanması, bu malzemelerin işlenmesindeki sorunları ortadan kaldırmak amacıyla birçok çalışma yapılmasına neden olmuştur. Yapılan çalışmalar, geleneksel işleme yöntemleri kullanılarak işleme koşullarının iyileştirilmesi, gelişmiş takımın kullanılması veya soğutma kapasitesi yüksek kesme sıvılarının kullanımının yanı sıra alışılmamış işleme yöntemlerinin de kullanımı gibi alanlarda yoğunlaşmıştır. Ti-6Al-4V alaşımının alışılmamış imalat yöntemlerinden EEİ kullanılarak yapılan çalışmalarda, kullanılan dielektrik tipinin, boşalım akımının (I_d), vurum süresinin (t_s), dielektrik sıvı içerisine katılan çeşitli tozların işparçası işleme hızına (İİH), elektrot aşınma hızına (EAH), bağlı aşınmaya (BA) ve yüzeyde oluşan katmanlar üzerindeki etkileri kısmen araştırılmıştır. Yapılan çalışmalar, Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesinde oldukça zorluk çekildiğini göstermektedir. Ayrıca bugüne kadar çeşitli metal işparçaları kullanılarak yapılan çalışmalar, EEİ’de dielektrik sıvı içerisine eklenen tozların (toz katkılı EEİ – TK/EEİ), İİH ve yüzey pürüzlülüğüne katkıda bulunduğunu göstermektedir.

EEİ çalışmalarında kullanılan çeşitli çelik malzemelerin EEİ parametreleri ve yöntemleri bilinirken, bu parametreler ve yöntemler titanyum alaşımının işlenmesinde aynen kullanılamamaktadır. Ti-6Al-4V alaşımı sahip olduğu mekanik özellikler nedeni ile EEİ'ye oldukça yatkındır. Fakat bu üstün özelliklerin yanında, ısı iletkenliğinin düşük ve elektriksel direncinin yüksek olması, Ti-6Al-4V alaşımının bir ısı ve elektriksel yöntem olan elektro erozyon ile işleme konusunda; işleme hızını arttıracak, yüzey pürüzlülüğünü azaltacak ve yüzey kalitesini iyileştirecek çalışmalar yapılmasını gerektirmektedir.

Bu tez çalışmasında, kullanımı giderek yaygınlaşan Ti-6Al-4V alaşımının EE ile işlenmesi için, vurum süresi (t_s), boşalım akımı (I_d) ve dielektrik sıvı basıncının (P_d), İİH'ye, EAH'ye, BA'ya ($=EAH/İİH$) ve yüzey pürüzlülüğüne (R_a) etkileri araştırılmıştır. 6 A ve 12 A I_d , 50 μs ve 100 μs t_s , 0,1 Bar ve 0,4 Bar P_d değerlerinde gazyağı dielektrik kullanılarak işlemler yapılmıştır. Daha sonra İİH'yi R_a 'yı iyileştirmek amacıyla dielektrik sıvı içerisine karıştırılan grafit tozu ile deneyler tekrarlanmıştır. Grafit tozu kullanılmasının amacı, bugüne kadar çelik işparçası kullanılarak yapılan çalışmalarda, grafit tozunun işleme hızını arttırdığı ve yüzey pürüzlülüğünü iyileştirdiğinin bilinmesidir. Bu durumun, Ti-6Al-4V işparçası malzemesinin İİH'sine ve R_a 'sına olan etkisi bu çalışmada araştırılmıştır. Ayrıca, gazyağı ve grafit tozlu gazyağı kullanılarak işlenen parçaların yüzey topoğrafyaları karşılaştırılmıştır.

Bu bölümde şu ana kadar yapılan, Ti ve alaşımlarının EEİ ile işlenmesi ve TK/EEİ çalışmaları hakkında bilgi verilecektir.

Soni ve Chakraverti [17], farklı I_d ve elektrot dönme hızlarında titanyum alaşımını bakır-tungsten elektrot ile işlemişler ve İİH, EAH, yüzey pürüzlülüğü çıktılarını incelemişlerdir. Deney sonuçlarını, dönel olmayan elektrotla yapılan deneylerle karşılaştırmışlar, döner elektrotun dielektrik püskürtme ve elektrik boşalım etkisini arttırması ile İİH'yi arttırdığını tespit etmişlerdir. Ancak, bu uygulamanın, yüzey pürüzlülüğünü arttırdığını, elektrot dönme hızının artmasıyla elektrot aşınmasının da arttığını belirtmişlerdir. Chen ve arkadaşları [18], elektrot olarak bakır ve dielektrik sıvı olarak saf su ve gazyağının Ti-6Al-4V alaşımının işleme karakteristikleri üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Saf su ile gazyağı karşılaştırıldığında, saf su

kullanılan deneylerde daha yüksek İİH ve daha düşük EAH elde edildiğini tespit etmişlerdir. Deney numunelerini X - ışını ile incelediklerinde, gazyağı (hidrokarbon bileşimi) kullanılan numunelerde yüzeyde titanyum karbür (TiC), saf su kullanılan deneylerde yüzeyde titanyum oksit (TiO) oluştuğunu gözlemlemişlerdir. Ti-6Al-4V'nin işlenmesinde gazyağı kullanıldığında düşük İİH değerlerinin elde edilmesinin sebebi olarak, yüzeyde daha yüksek ergime sıcaklığına sahip TiC oluşması ve bunun da daha yüksek boşalım enerjisine ihtiyaç duyması olarak gösterilmiştir. Ayrıca, gazyağı dielektrik kullanılması durumunda, elektrot üzerinde karbon birikmesi sonucu boşalım sürecinin yavaşlaması da bir diğer sebep olarak gösterilmiştir. Lin, Yan ve Chang [19], Ti-6Al-4V alaşımını işparçası olarak kullandıkları çalışmalarında, elektro erozyon ve ultrasonik işleme yöntemlerini birarada kullanmışlardır. Dielektrik tipi, aşındırıcı boyutu, dielektrik sıvı içerisindeki aşındırıcı konsantrasyonu, I_d ve t_s gibi işleme parametrelerinin İİH, EAH, BA, yüzey pürüzlülüğü ve yeniden katılaşan tabaka üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. İİH'yi artırmak ve I_d 'nin işleme yüzeyine daha homojen dağılmasını sağlamak amacıyla, saf su ve gazyağı dielektrik içerisine ortalama boyutları 3 μm ve 9 μm olan SiC tozlarını karıştırmışlardır. Klasik EEİ'ye göre SiC tozları karıştırılmış deneylerde toz konsantrasyonu arttıkça İİH'nin de belirgin şekilde arttığını, en yüksek İİH'ye 9 μm boyutlarında ve 90 g/l konsantrasyonlu SiC tozu katılmış saf sulu çalışmada ulaştıklarını belirtmişlerdir. Çok yüksek aşındırıcı toz konsantrasyonu ile yapılan deneylerde, işleme bölgesinde partikül birikmesi sonucu istenmeyen arklar meydana geldiğini ve İİH'nin azaldığını belirtmişlerdir. 3 μm boyutunda SiC tozunu gazyağına karıştırarak gerçekleştirdikleri deneylerde, saf su kullanılan deneylere oranla t_s arttıkça daha iyi yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyler elde etmişlerdir. Fonda ve arkadaşları [8], Ti-6Al-4V alaşımının ısı ve elektriksel özelliklerinin EEİ'de işleme performansına etkilerini araştırmışlardır. Deneylerde bakır elektrot kullanılmış ve çalışma yüzdesi ($=t_s/(t_s+t_p)$, t_p =vurum ara süresi) %3,5 ile %80 arasında değiştirilmiştir. İstenilen çalışma yüzdesine ulaşmak için vurum süresi sabit tutmuş, vurum ara süresini değiştirmişlerdir. Yapmış oldukları deneylerde en yüksek işparçası sıcaklığının 28,3°C olduğunu gözlemlemişlerdir. %50 çalışma ile yaptıkları deneyde ise, işparçası sıcaklığının, %3 ile yapılabilecek yaklaşık 10°C arttığını gözlemlemişlerdir. Testler sonucunda, çalışma yüzdesindeki artışın işparçası

sıcaklığının artmasına neden olduğunu, düşük çalışma yüzdesi değerlerinde işparçası sıcaklığının hemen hemen sabit olduğunu, %7 çalışma değerinden sonra işparçası sıcaklığının büyük oranda artmaya başladığını ve %20 çalışma değerinden sonra İİH'nin düşmeye başladığını gözlemlemişlerdir. Chow ve arkadaşları [20], Al ve SiC tozlarını gazyağı içerisine ilave ederek yaptıkları çalışmada, Ti-6Al-4V alaşımını dönel bakır elektrot ile işleyerek İİH, EAH, yüzey pürüzlülüğü ve elektriksel boşalım dalga formlarını incelemişlerdir. Al ve SiC tozlu deneylerde İİH'nin arttığını ve yüzey pürüzlülüğünün iyileştiğini gözlemlemişlerdir. SiC tozlarıyla yapılan çalışmada Al tozlarıyla yapılan çalışmaya nazaran daha yüksek İİH değerleri elde edildiğini, bunun yanında her iki tip tozlu işlemede boşalım aralığının büyüdüğünü ve boşalım enerjisinin (E_d) işleme yüzeyine daha homojen dağıldığını, yüzey görünümünün iyileştiğini ve en düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeylerin Al tozlarıyla yapılan işlemede elde edildiğini saptamışlardır. Jeswani [21], işparçası olarak çelik (+), elektrot olarak bakır (-) ve dielektrik sıvı olarak ortalama çapı 10 μm olan grafit tozu karıştırılmış gazyağı kullandığı deneylerinde, en yüksek İİH'ye 4 g/l konsantrasyonunda grafit tozu eklendiğinde elde edildiğini belirtmişlerdir. İİH'nin saf gaz yağı ile yapılan deneylere göre %60 arttığını gözlemlemiştir. İİH'deki artışın yanı sıra, EAH'de %15 artış ve BA'da %28 azalma olduğunu gözlemlenmiştir. Kansal, Singh ve Kumar [22], TK/EEİ'de tepki yüzey metodolojisi yardımıyla optimizasyon çalışmaları yapmışlardır. t_s , I_d ve dielektrik sıvı içerisindeki silikon tozlarının miktarını değiştirmişlerdir. Deneyler sonucunda, dielektrik sıvı içerisindeki silikon toz konsantrasyonunun (C_p) arttırılması ile İİH'nin arttığını ve R_a 'nın görünür şekilde iyileştiği saptamışlardır. ANOVA analizi sonucunda, I_d ve C_p 'nin, İİH ve R_a üzerinde en fazla etkiye sahip olduğunu belirtmişlerdir. Yüksek I_d ve C_p kombinasyonunun daha yüksek İİH ve daha küçük R_a değeri verdiğini vurgulamışlardır. Uno, Okada ve Çetin [23], TK/EEİ deneyleri ile yüksek aşınma direncine sahip yüzeyler elde etmeye çalışmışlardır. Alüminyum bronzundan yapılmış plastik enjeksiyon kalıplarının nikel ile kaplanmasına ve yüzeyinde sert titanyum karbür tabakası oluşturulmasına yönelik yaptıkları çalışmada, dielektrik sıvı içerisine nikel ve karbon tozlarını karıştırmışlardır. Alüminyum bronz malzemenin, nikel tozlu dielektrik sıvı ile işlenmesi sonrasında incelenen tek bir kıvılcım kraterinin boyutlarının, dielektrik sıvı içerisindeki nikel tozu miktarının arttırılması

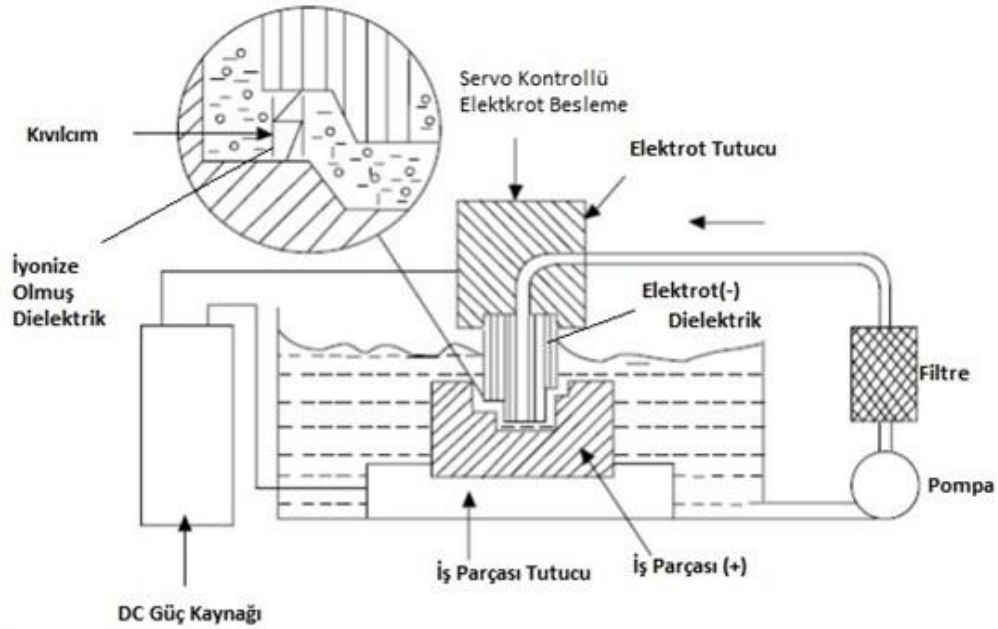
ile azaldığı ve sadece gazyağı kullanılan klasik EEİ işlemine nazaran daha düşük pürüzlülüğe sahip yüzeyler elde edildiğini belirtmişlerdir. Titanyum elektrot ve karbon tozu karışımı gazyağı kullanarak yaptıkları çalışmada ise elektrot aşınmasını arttırarak TiC içeren yüzeyler elde etmek amacıyla ters kutuplama yapmışlar ve sonucunda TiC içeren (sert ve aşınma direnci yüksek) yüzey katmanı elde etmişlerdir. Vurum süresinin artmasıyla alaşımlanmış tabaka kalınlığının artarak klasik EEİ'ye nazaran daha pürüzsüz ve aşınma dayanımı daha yüksek yüzeyler elde etmişlerdir. Rival ve arkadaşları [24], işparçası olarak Ti-6246 alaşımı ve elektrot olarak bakır-tungsten (CuW) kullandıkları çalışmalarında, dielektrik olarak gazyağı ve gazyağı içerisine katılan SiC tozları ile işlemler yapmış ve performans çıktıları olan İİH, EAH ve R_a değerlerini incelemişlerdir. Klasik EEİ ve TK/EEİ her ikisinde de I_d 'nin artması ile İİH ve R_a değerlerinin arttığını belirtmişlerdir. Klasik EEİ'de, EAH ve R_a üzerinde t_s etkili olurken TK/EEİ'de ise t_s 'nin EAH ve R_a 'nın yanı sıra İİH üzerinde de etkili olduğunu gözlemlemişlerdir. t_p 'nin TK/EEİ'ye göre klasik EEİ'de daha önemli bir parametre olduğunu ve gazyağına 2g/l konsantrasyona kadar katılan SiC tozlarının R_a 'yı iyileştirdiğini fakat yüksek toz konsantrasyonlarının R_a üzerinde olumsuz etki yarattığını belirtmişlerdir. Furutani ve arkadaşları [25], ince tel bakır elektrot ve döner disk ile ortalama boyutu 36 μm 'den küçük Ti tozlarını, yüzeylerde kalın TiC alaşımlı tabakalar oluşturmak amacıyla kullanmışlardır. TiC tabakasının oluşturulmasında ince levha elektrotlar kullanılması halinde boşalım aralığında elektrotun ileri geri hareketinin dielektriği az hareketlendirmesinden dolayı toz yoğunluğunun daha yüksek olduğu, yüzey tabakasının klasik işlemeye göre daha sert ve daha az pürüzlü olduğu ifade edilmiştir. Ming ve He [26], gazyağı içerisine kattıkları çeşitli iletken ve inorganik-oksit tozlarının işlemeye etkilerini araştırmışlardır. Gazyağı içerisine katılan bütün tozların özellikle yarı-bitirme ve bitirme işlemlerinde İİH'yi arttırdığını gözlemlemişlerdir. Toz karışımı dielektrik sıvı ile yapılan deneylerde, saf gazyağına oranla EAH'nin azaldığını ve yüzey pürüzlülüğünün farkedilir şekilde iyileştiğini belirtmişlerdir. Gazyağına karıştırılan tozların, dielektrik sıvının iyonizasyon gerilimini düşürdüğünü, boşalım aralığını genişlettiğini ve mikro çatlakların, ısıl gerilmelerin, ergimiş ve sertleşmiş tabaka kalınlığının azaldığını ifade etmişlerdir. Özerkan ve arkadaşları [27], dielektrik sıvı içerisine katılan grafit ve borik asit tozlarının R_a , İİH, EAH, mikro yapı ve yüzey

sertliği üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Her iki toz karışımı dielektrik sıvıda t_s arttıkça R_a 'nın kötüleştiği gözlemlenmiştir. Grafit tozlu çalışmada ise R_a 'nın, saf gazyağı kullanılarak elde edilen yüzeylere göre belirgin şekilde iyileştiğini ve borik asit tozlu deneylere göre de grafit tozlu deneylerin daha iyi yüzey pürüzlülüğü verdiğini belirtmişlerdir. Grafit tozlu deneylerde C_p ve t_s 'nin arttırılmasıyla saf gazyağı ve borik asit tozlu deneylere nazaran çok daha yüksek İİH değerlerine ulaşmışlardır. Yapılan deneylerde, borik asit tozlarının yüzey sertliği dışında saf gazyağı ile yapılan deneylere göre İİH, EAH ve R_a açılarından belirgin bir üstünlük sağlamadığını belirtmişlerdir. Borik asit tozlu çalışmalardan iyi sonuç alınamamasının nedeni olarak borik asit tozlarının kötü iletkenliğe sahip olduğu gösterilmiştir.

2. TEORİ

2.1. Elektro Erozyon ile İşleme, EEİ

Elektro erozyon ile işlemenin genel yapısı şematik olarak Şekil 2.1'de görülmektedir. EEİ sistemi genel olarak, işleme tankı, dielektrik sıvı, elektrot, işparçası, sirkülasyon pompası, filtreler, vurum jeneratörü ve elektrot hareketini kontrol eden servo mekanizmasından oluşmaktadır. Servo kontrollü takım hareket ünitesi, işparçası ve elektrot arasındaki boşluğu sabit tutarak, vurum jeneratörü tarafından üretilen aktif boşalımın işparçası ve elektrot arasında oluşmasını sağlar. Bu aktif boşalımın işparçası yüzeyinde çok küçük kraterler oluştururlar. İşleme sırasında oluşan işleme artıkları, işleme bölgesine püskürtülen dielektrik sıvı ile ortamdan uzaklaştırılır ve filtre edilmiş dielektrik sıvı tekrardan işleme bölgesine püskürtülür.



Şekil 2.1. EEİ yönteminin genel yapısı [4]

2.1.1. Klasik EEİ çalışma sistemi

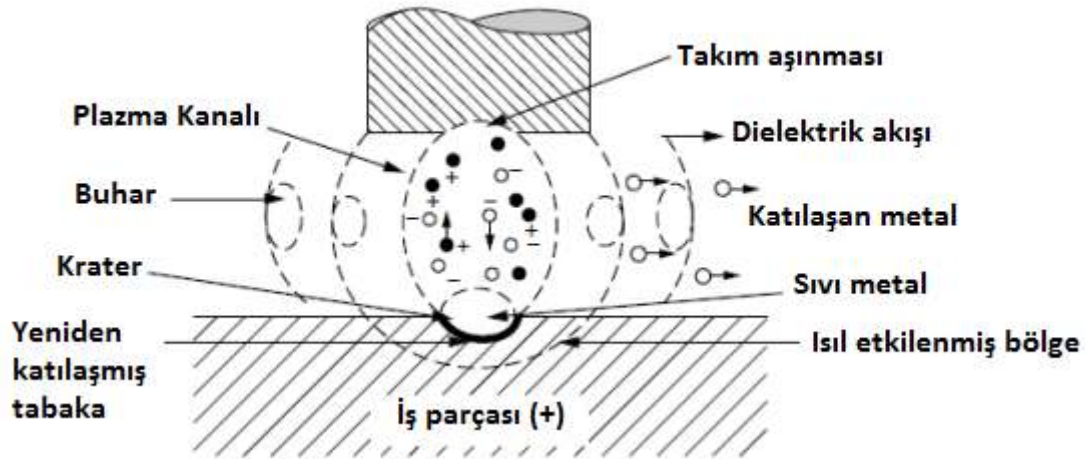
EEİ yönteminde talaş kaldırma işlemi ısıl-elektriksel bir yöntemdir. Bu yöntem, yüksek yoğunluktaki ısıнын, işparçası üzerindeki küçük bir noktaya uygulanmasıyla o noktadaki malzemeyi ergiterek buharlaştırması prensibine dayanır.

İşparçası, elektrot ile arasında küçük bir aralık kalacak şekilde tank içerisine yerleştirilir ve vurum jeneratörü kutuplarına bağlanır. İşleme aralığında kontrol edilebilir elektriksel direnç sağlayabilmek için dielektrik sıvı kullanılmaktadır. Yeterli gerilim oluşmadan elektrot ile işparçası arasında akımın akmaması için dielektrik sıvının (gazyağı, saf su vb.) iyi bir yalıtkan olması şarttır.

Vurum jeneratöründen elektrot ile işparçası arasına akım uygulandığı zaman, elektrot ile işparçası arasındaki en yakın mesafede - dielektriğin iletkenliğinin en yüksek olduğu nokta- elektriksel alan güçlenmektedir. Bu elektriksel alanın sonucunda, dielektrik sıvı içerisinde yüzen mikroskobik tanecikler elektriksel alanın güçlendiği aralığa doğru toplanmaya başlamaktadırlar. Bu sırada gerilim hızla artarken akım değeri sıfırdır. Yüklü taneciklerin elektriksel alanın merkezindeki dar bir kanalda toplanmasıyla, dielektrik sıvı iyonlaşır ve yalıtkanlık özelliği bu kanal boyunca azalmaya başlar. Bu noktada gerilim en yüksek değerine ulaşırken akım hala sıfır değerindedir. Elektrik akımı, dielektrik sıvının yalıtkanlığı en düşük değere ulaştığında elektrot ile işparçası arasından akmaya başlar. Bu aşamada gerilim düşmeye başlarken akım değeri artmaktadır. Elektrik akımının artmasıyla bu bölgedeki sıcaklık da hızla artarak yaklaşık 8000-12000°C'de plazma kanalı oluşur ve ısı akısı ise 10^{17}W/m^2 'ye ulaşır. Yüksek sıcaklık dielektrik sıvının, işparçasının ve elektrotun çok küçük bir bölümünü buharlaştırmaktadır. Böylece elektrot ile işparçası arasında bir elektriksel boşalım kanalı oluşmaktadır. Oluşan buhar kabarcıkları boşalım kanalından dışarı doğru genişlemeye çalışırlar. Bu genişleme elektriksel alanın etkisiyle kıvılcım boşalım kanalı etrafındaki yüklü taneciklerin kanala doğru çekilmesi ve bu taneciklerin kanal etrafında yoğunluklarının fazla olması nedeni ile sınırlandırılmaktadır. Akım değeri artmaya, gerilim değeri düşmeye devam etmektedir. Arkın uygulanma süresinin sonuna kadar akım ve gerilim değişmez. Buhar kabarcıklarının içindeki basınç ve sıcaklık en yüksek değere

ulaşırken ortamdan bir miktar talaş uzaklaştırılmaktadır. Boşalım kanalı ile doğrudan temasta olan işparçası yüzeyi ergimiş haldedir. Ancak, buradaki buhar kabarcıklarının basıncı bu yüzeyin hareket etmesini engellemektedir. Vurum süresi bitiminde (vurum ara süresinin başlangıcında) akım ve gerilim değerleri sıfıra düşer. Bu esnada sıcaklığın hızla azalması ve buhar kabarcıklarının dağılması ile işparçasından kopartılan ergimiş talaşlar kanaldan dışa doğru yayılmaya başlamaktadır.

Temiz ve basınçlı dielektrik sıvının, işlemin gerçekleştiği bölgeye ulaşmasıyla işparçası yüzeyindeki işleme artıkları (talaşlar) uzaklaşır. Ortamdan uzaklaştırılamayan ergimiş metal soğuyarak ergimiş-katılaşmış tabakayı oluşturur. İş parçası ve elektrottan koparılan parçacıklar soğuyarak küçük tanecikler halinde dielektrik sıvı içerisine dağılırlar. Kalan buhar kabarcıkları dielektrik sıvı yüzeyine çıkarlar. Artık işparçası ile elektrot arasındaki birbirine en yakın olan iki nokta aşınmıştır [27]. Şekil 2.2'de plazma oluşumu, ısıl etkilenmiş bölge, işparçası krateri ve takım aşınması görülmektedir.



Şekil 2.2. EEİ'de kıvılcım ile malzeme kaldırılması [1]

Kıvılcımın olduğu bu noktada, malzeme kaldırılarak bir krater oluşturulduğundan dolayı, bu noktanın çevresindeki bölgelerin aynı seviyeye gelene kadar tekrardan aynı noktada kıvılcım oluşma olasılığı düşüktür. Aynı işlemler yeni en yakın iki nokta arasında tekrarlanır. Bağımsız boşalımın çok küçük bir noktada malzeme kaldırmasına rağmen, saniyede yüzlerce veya binlerce boşalımın gerçekleşmesi tüm

yüzeyde bir aşınma meydana getirmektedir. Anot ve katotdan kaldırılan malzeme miktarları, elektron ve pozitif iyonların toplam akıma katkısına bağlıdır. Elektron akımı boşalmanın ilk aşamasında etkindir. Pozitif iyonlar elektronlardan 10^4 kat daha ağır olduklarından, pozitif iyonlar elektronlardan daha az hareketlidir. Sonuç olarak, anot işparçasındaki aşındırma miktarı katottakinden daha fazla olmaktadır.

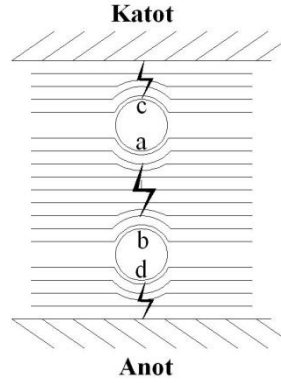
2.1.2. Toz katkılı EEİ (TK/EEİ) işleme mekanizması

Klasik EEİ yönteminin çok sert ve karmaşık şekilli parçaların işlenebilmesi gibi avantajlarının olmasının yanı sıra düşük İİH ve kötü yüzey kalitesi klasik EEİ'nin dezavantajları arasındadır. Bu problemleri ortadan kaldırmak, yüzey kalitesini ve işleme performansını arttırmak için dielektrik sıvı içerisine toz ilave etme yöntemi geliştirilmiştir. Bu yeni malzeme kaldırma yöntemi, toz katkılı elektro erozyon (TK/EEİ) olarak adlandırılmaktadır. Bu teknikte, dielektrik sıvı içerisine karıştırılan küçük tozlar EEİ performansına doğrudan katkıda bulunurlar. Elektriksel iletken olan bu toz parçacıkları, dielektrik sıvının yalıtım direncini düşürürler ve işparçası ile takım arasındaki kıvılcım aralığını arttırırlar. Böylece, işleme daha kararlı hale gelir, İİH artar ve yüzey pürüzlülüğünde iyileşme görülür [22; 28].

Boşalım aralığının genişlemesi

Klasik EEİ'de, dielektriğin işleme bölgesinde homojen yalıtım özelliği göstermesinden dolayı, düzgün yoğunlukta bir elektrik alanı meydana gelerek, dielektrik sıvı iyonizasyonu gerçekleşir ve işparçası ile elektrot arasındaki en yakın iki nokta arasında boşalım kanalı oluşmaktadır. Fakat TK/EEİ'de, çok sayıda elektrik iletken küçük toz taneleri boşalım aralığındaki elektrik alanını düzgün yolundan sapmasına neden olur. Çalışma geriliminin etkisi altında, çok sayıda pozitif ve negatif yük, toz tanelerinin üst ve alt kısımlarında toplanırlar. Toz tanelerinin alt veya üst bölgeleri elektrik yük yoğunluğunun en yüksek olduğu yerlerdir. Şekil 2.3'de görüldüğü gibi, birbirinin yakınında bulunan iki toz tanesinin elektrik alan yoğunluğunun en yüksek olduğu a ve b noktaları civarında ilk boşalım

meydana gelir. Bu boşalımdan sonra bu iki toz arasında kısa devre oluşur ve elektrik yüklerinin bu bölgede dağılması gerçekleşir. Bundan sonra c ve d noktalarında daha fazla elektrik yükü toplanır. Bu elektrik yükü, bu iki toz tanesi arasında ve diğer toz taneleri arasında ardışık şekilde boşalım oluşmasını sağlar. Böylece işparçası ve elektrot arasında işleme boyunca “ardışık boşalım etkisi” oluşturulur. Toz taneleri arasındaki mesafe, boşalım aralığından daha küçük olduğunda ve daha fazla elektrik yükünün toz tanelerinin tepelerinde toplandığında “ardışık boşalım” kolay bir şekilde oluşur ve “ardışık boşalım” bütün boşalım aralığı boyunca gerçekleşir. Böylece elektrik boşalımı genişlemiş boşalım aralığına rağmen kolaylıkla oluşturulabilir [28].



Şekil 2.3. Ardışık boşalımın şematik gösterimi [28]

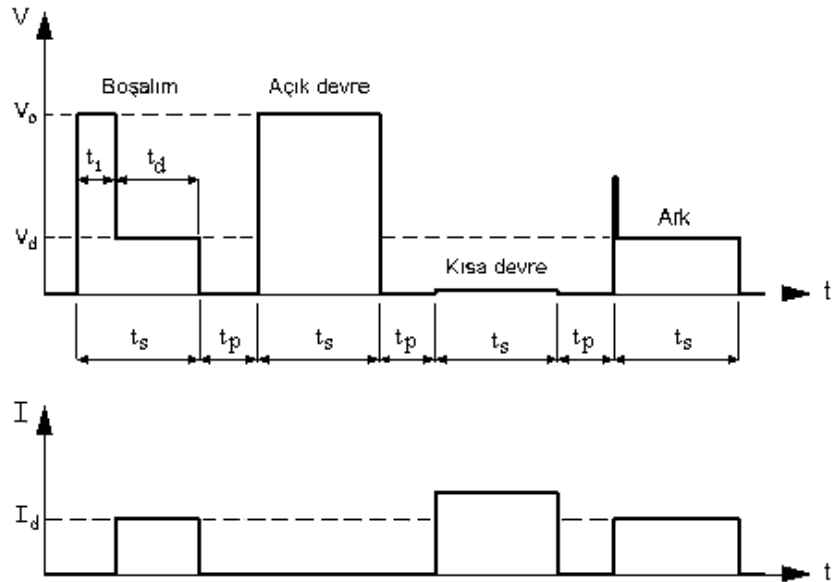
Boşalım kanalının genişlemesi

Elektrik boşalımı sırasında, elektriksel yük taşıyıcılar (iyonlar ve elektronlar) anot ve katoda doğru ivmelenerek hareket ederler. Bu hareketleri sırasında orta büyüklükteki moleküllerle ve mikro parçacıkların çarpışmasını kolaylaştırırlar. Bu parçacıklara enerji vererek daha fazla taşıyıcı oluşmasına ve boşalım kanalındaki yük taşıyıcıların artmasına neden olur. Böylece boşalım kanalının genişlemesi sağlanmış olur. Görüldüğü üzere, daha geniş boşalım aralığı ve daha fazla taşıyıcı hareket mesafesi, daha fazla elektrik yükü taşıyıcısı ve daha geniş boşalım kanalı anlamına gelmektedir. TK/EEİ’de boşalım aralığının genişlemesinden dolayı, TK/EEİ’nin boşalım kanalı klasik EEİ’ninkinden daha geniştir. Dahası, genişlemiş boşalım aralığı, boşalım kanalındaki dielektrik sıvının basıncını düşürerek boşalım kanalının

genişlemesini kolaylaştırdığından klasik EEİ'ye göre daha geniş bir kratersi yapı oluşmaktadır [28].

2.1.3. EEİ yönteminin temel parametreleri

EEİ yönteminde işleme performansı, elektriksel parametrelere, vurum jeneratörü karakteristiklerine, işparçası ve elektrot malzemesinin fiziksel özelliklerine, işparçası ve elektrotun boyut ve geometrik özelliklerine, dielektrik sıvı parametrelerine bağlı olarak değişiklik göstermektedir.



Şekil 2.4. Gerilim kontrollü vurum jeneratöründe vurumların gerilim ve akım dalga biçimleri [29]

Elektriksel parametreler [27; 29- 31]

İşleme aralığındaki elektriksel boşalım işleminin gerilim ve akım değişimleri $V(t)$ ve $I(t)$ ile karakterize edilir. Gerilim kontrollü bir vurum jeneratörü için tipik vurum karakteristikleri Şekil 2.4'da görülmektedir.

Boşalım Enerjisi (E_d) : Boşalım süresince işleme aralığına uygulanan enerjidir. Gerilim kontrollü vurum jeneratörlü elektro erozyon tezgahlarında vurum enerjisi (E_d) ;

[2.1]

Boşalım gerilimi (V_d): Boşalım süresince ölçülen gerilimdir.

Boşalım akımı (I_d): Boşalım süresince işleme aralığından geçen akımdır. İşleme hızını ve yüzey pürüzlülüğünü etkileyen en önemli parametredir.

Boşalım süresi (t_d) : Boşalımın gerçekleştiği süredir.

Ortalama Çalışma Akım (I): İşleme süresince, işparçası ile elektrot arasında meydana gelen akım değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

Ortalama Çalışma Gerilimi (V) : İşleme süresince, işparçası ile elektrot arasında meydana gelen gerilim değerlerinin aritmetik ortalamasıdır.

Gecikme süresi (t_1) : Boşalım öncesi dielektrik sıvının iyonlaşması için geçen süredir.

Vurum süresi (t_s) : İş parçası ile elektrotta gerilimin ilk uygulanmasından, boşalımın bitmesine kadar geçen toplam süredir.

[2.2]

Vurum ara süresi (t_p) : İki kıvılcım boşalması arasında bırakılan süredir. Vurum ara süresi işleme koşullarına göre dikkatli bir şekilde belirlenmelidir. Vurum ara süresinin fazla olması işleme süresini arttırmaktadır fakat dielektrik sıvının işleme artıklarını işleme ortamından uzaklaştırması ve işparçasının soğuması için bekleme süresi önemlidir. Aksi halde işleme ortamından uzaklaştırılamayan işleme artıkları, kıvılcımın hep aynı noktada oluşmasına neden olacaktır. Bu da istenmeyen ark oluşumuna sebep olarak işparçası ve elektrot yüzeylerinin bozulmasına neden olacaktır.

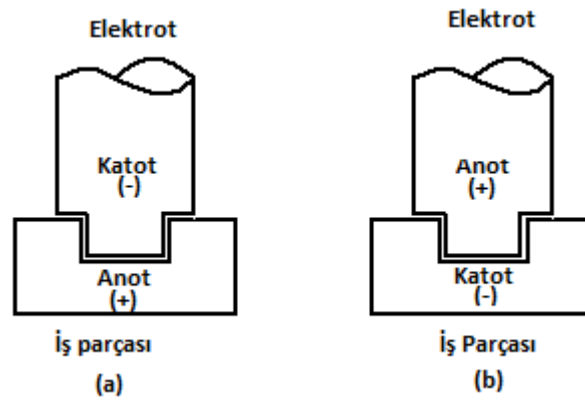
Vurum çevrim süresi (t_c): Vurum ve vurum ara sürelerinin toplamıdır.

[2.3]

Açık devre gerilimi (V_0) : Boşalım olmadığında, işleme aralığında görülen gerilimdir. Dielektrik sıvı iyonize olduğu anda gerilim değeri, açık devre gerilimi değerinden boşalım gerilimi değerine düşmektedir.

Kutuplama (Polarite)

Kutuplama, elektrota göre kıvılcımın akış yönünü belirler. Kutuplama, işleme hızını etkileyen önemli bir faktördür. EEİ'de hem işparçası hemde elektrotun her ikisi de (+) veya (-) kutba bağlanabilir. EEİ'de kutuplama, elektrotun bağlı olduğu kutuba göre isimlendirilir (Şekil 2.5) [27].



Şekil 2.5. Elektrot kutuplama türleri a) negatif kutuplama, b) pozitif kutuplama

Dielektrik sıvı parametreleri

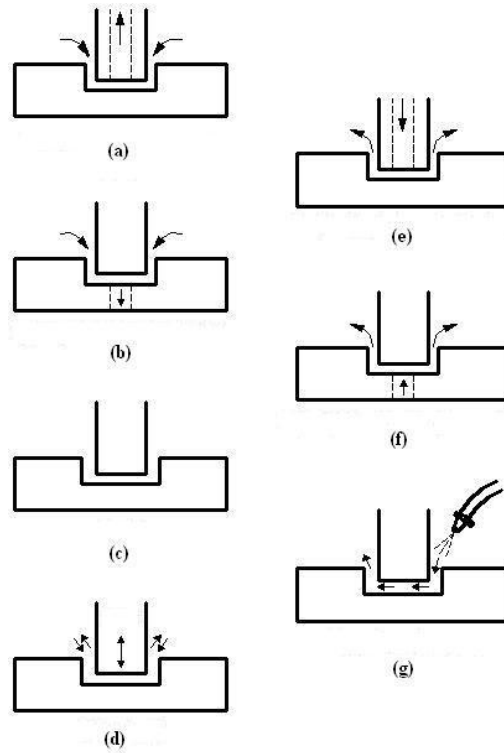
Dielektrik sıvının dört temel fonksiyonu vardır. Bunlar; işparçası ve takım arasında yalıtkanlık sağlamak, plazma kanalı oluşturmak, soğutma sağlamak ve işleme artıklarını ortamdan uzaklaştırmaktır. Dielektrik sıvı normalde yalıtkan olmalıdır fakat gerilim uygulandığında hızla iyonlaşarak plazma kanalı oluşturmalıdır. İyi bir dielektrik sıvı aşağıdaki özelliklere sahip olmalıdır;

- Etkili püskürtme sağlamak için düşük viskoziteli olmalı,
- Yüksek parlama sıcaklığına sahip olmalı,
- Uygun dielektrik direncine sahip olmalı, örneğin 180V/25 μ m
- Hızlı bir şekilde iyonlaşabilmeli,

- Zehirli olmamalı,
- Korozyif olmamalı,
- Pahalı olmamalıdır.

Gazyağı ve saf su belirli uygulamalar için kullanılsa da, en çok kullanılan dielektrik sıvılar hidrokarbonlardır (gazyağı, parafin vb.).

EEİ'de yaygın olarak kullanılan dielektrik sıvı püskürtme yöntemleri Şekil 2.6'da görülmektedir. Elektrot içinden püskürtme (e), işparçasında işlenmiş boşluğun yanal kesimlerinde işleme kalıntılarının dışarı çıkarken yapmış oldukları aşındırmadan dolayı küçük bir eğim oluşur. Elektrot içinden emme'de (a) bu eğim oluşmaz. Yanal püskürme (g)'de ise püskürtme tek bir yandan yapıldığından dolayı, püskürtme yapılan kenarın karşısında küçük bir eğim oluşur.



Şekil 2.6. Dielektrik sıvı uygulama yöntemleri a) elektrot içinden emme, b) işparçası içinden emme, c) statik, d) titreşimli, e) elektrot içinden püskürtme, f) iş parçası içinden püskürtme, g) yanal püskürtme [27]

İşparçası parametreleri

EEİ ile elektrik iletken bütün malzemeler işparçası olarak işlenebilir. Fakat malzemenin yoğunluk, ısı iletkenlik, elektriksel direnç ve ergime sıcaklığı gibi bazı ısı-fiziksel özellikleri işleme performansına etki etmektedir [32].

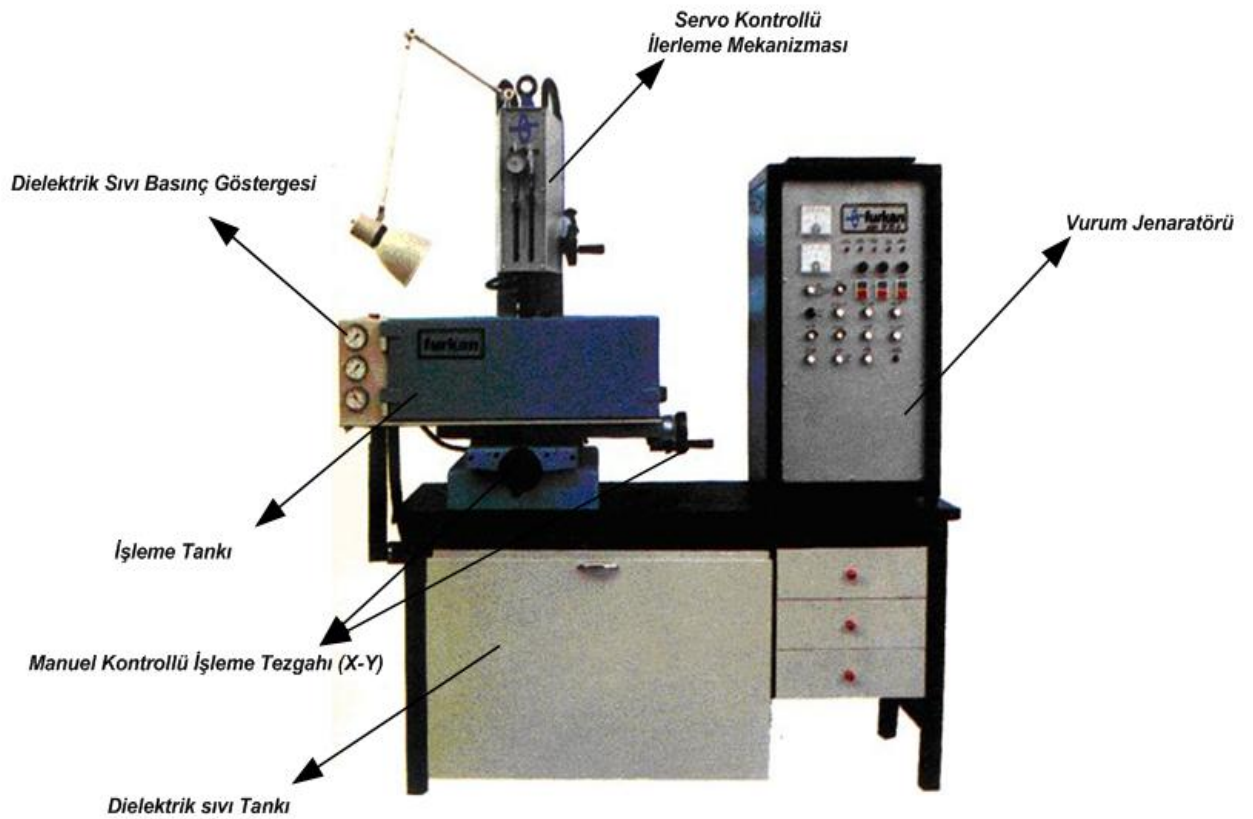
Elektrot parametreleri

EEİ operasyonlarının genellikle en pahalı kısmı elektrotlardır. İdeal bir elektrot, yüksek elektriksel iletkenliğe, yüksek ısı kapasiteye ve yüksek ergime noktasına sahip olmalı, kolay şekillendirilebilmeli ve aşınmadan uzun müddet kullanılabilmelidir. EEİ’de genellikle grafit, bakır, Cu/W alaşımları kullanılmaktadır. Bu elektrotlar döküm, toz metalurjisi ve geleneksel işleme yöntemleri ile üretilirler. EEİ’de takım aşınması önemli bir faktördür. Yüksek ergime noktasına sahip olan malzeme düşük takım aşınmasına sahiptir. Bu nedenle grafit elektrotlar en yüksek takım aşınma direncine sahiptir. Çünkü, grafit bilinen malzemeler içinde en yüksek ergime sıcaklığına (3600°C) sahip malzemedir [4].

3. DENEYLER

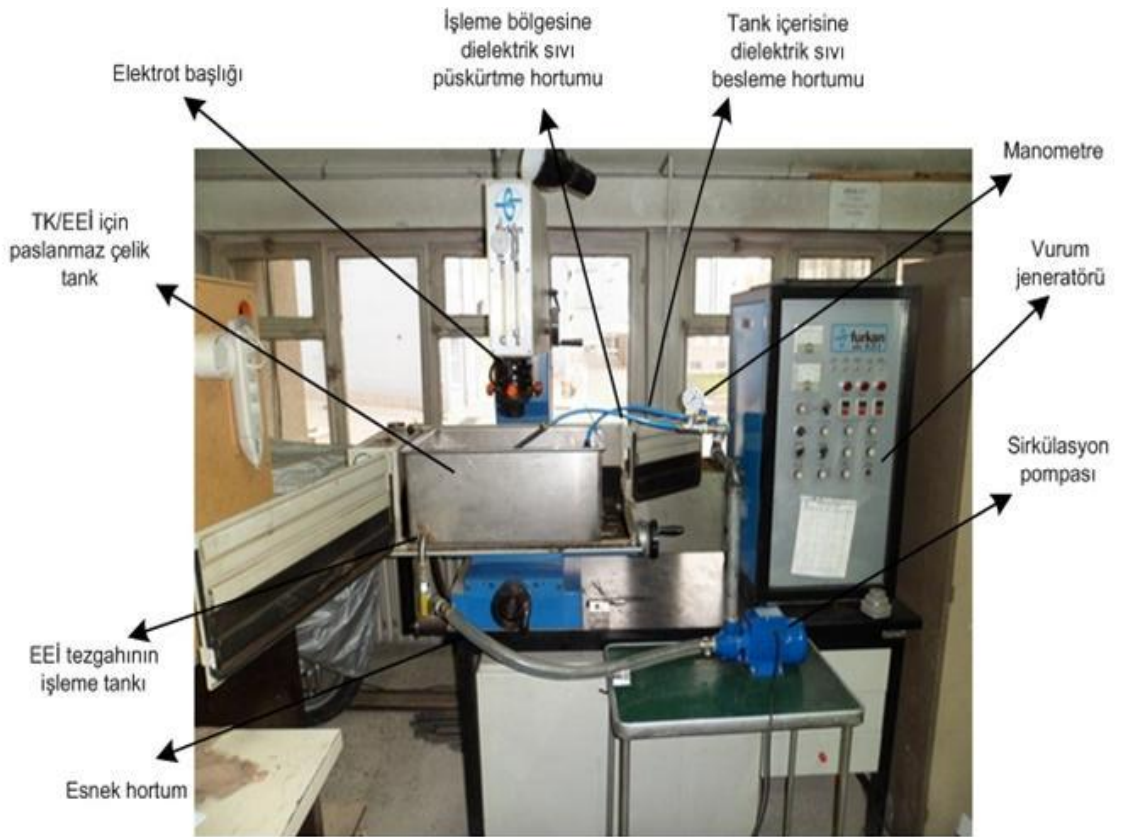
3.1. EEİ Tezgahı

Tez çalışması kapsamındaki deneyler, FURKAN marka “EDM M25A” elektro erozyon tezgahı (Resim 3.1) kullanılarak yapılmıştır. Tezgaha ait teknik özellikler Çizelge 3.1’de sunulmuştur.



Resim 3.1. Deneylerde kullanılan Furkan EDM M25A elektro erozyon tezgahı

gazyağı-grafit tozu karışımının basıncı kontrol edilmiştir. Diğer besleme borusundan, iki çıkış alınmış ve bunlara üzerinde 4 cm aralıklarla 2,5 mm çapında karşılıklı delikler bulunan (uç noktaları kapalı) hortumlar bağlanmıştır. Deney süresince grafit tozunun süspansiyon (asılı) durumunun korunmasını sağlamak amacıyla bu hortumların biri, işleme tankının sağına diğeri de soluna yerleştirilmiştir. Tank içerisine sabitlenen bir mengene yardımı ile işparçasının tezgaha bağlanması sağlanmıştır. TK/EEİ yapmak amacıyla geliştirilmiş sistem Resim 3.2’de görülmektedir.



Resim 3.2. TK/EEİ için kurulmuş sistem

3.3. Deneylerde Kullanılan Grafit Tozu

Grafit tozlu deneylerde kullanmak üzere ortalama çapı 74 μm (200 mesh) olan grafit tozu ticari olarak temin edilmiştir. Grafit tozu 270 mesh (53 μm), 325 mesh (44 μm)

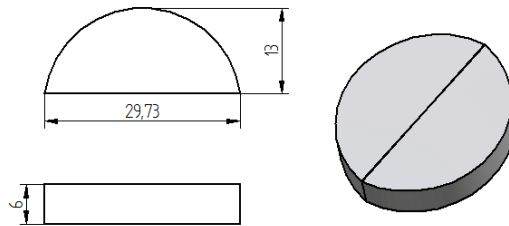
ve 400 mesh (37 μm) eleklerden geçirilerek sınıflandırılmıştır. TK/EEİ deneylerinde, eleme işleme sonucunda elde edilen toz boyutu 37 μm 'den küçük (elek altı) grafit tozu kullanılmıştır.

3.4. İşparçası ve Elektrot

Deneylerde işparçası olarak Çizelge 3.2'de kimyasal bileşimi verilmiş olan Ti-6Al-4V (Grade 5) titanyum alaşımı kullanılmıştır. Ø30 x 500 mm boyutlarında ticari olarak temin edilen titanyum çubuk, her bir parça 6 mm kalınlıkta olacak şekilde dilimlenmiştir. Ø30x6 mm boyutlarındaki işparçası, deney sonrası yapılacak ölçümleri kolaylaştırması amacıyla ortadan ikiye kesilmiştir (Şekil 3.2). Deneylerde iki parça birbirine dayanarak işleme yapılmıştır. Bu yöntem sayesinde işleme sonrasında işparçası ikiye ayrılarak yüzey pürüzlülüğü ölçümleri daha kolay yapılabilmiş ve ileriye dönük olarak işparçası yüzey katmanlarının incelenebilme olasılığı sağlanmıştır. İşparçası dairesel yüzeyleri ince zımpara ile parlatılmıştır.

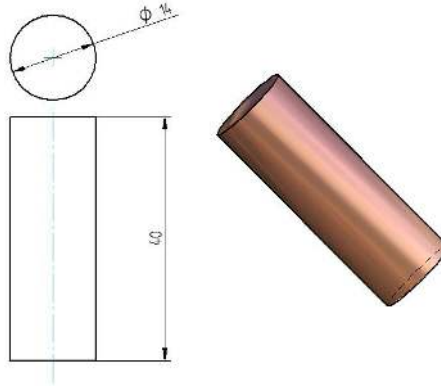
Çizelge 3.2. Ti-6Al-4V İş parçasının kimyasal bileşimi

Element	Ti	Al	V	Fe	C	N	O	H	Kalan
%	90	5,9	4	0,07	0,02	0,01	0,06	0,006	0,1



Şekil 3.2. Deneylerde kullanılan işparçası ve ölçüleri

Elektrot olarak Ø14x40 mm boyutlarında silindirik elektrolitik bakır kullanılmıştır (Şekil 3.3). Elektrotun düz yüzeyleri ince zımpara ile parlatılmıştır. Bütün deneylerde yanal dielektrik püskürtmesi (Şekil 2.6.g) uygulanmıştır.



Şekil 3.3. Deneylerde kullanılan elektrot ve ölçüleri

3.5. Deneylerde Kullanılan İşleme Parametreleri

Deneylerde, vurum süresi (t_s), boşalım akımı (I_d) ve dielektrik sıvı basıncı (P_d) değişken parametreler olarak kullanılmıştır. Vurum ara süresi (t_p), çalışma süresi, geri çekme süresi, kutuplama, işparçası ve elektrot malzemeleri deneylerde sabit tutulmuştur. Deneylerde kullanılan parametreler Çizelge 3.3'de, deney planı ise Çizelge 3.4'de sunulmuştur.

Çizelge 3.3. Deney Parametreleri

Deney Parametreleri	Değerler
Boşalım Akımı, I_d [A]	6 - 12
Vurum Süresi, t_s [μ s]	50 - 100
Vurum Ara Süresi, t_p [μ s]	100
Çalışma Süresi [s]	0,8
Geri Çekme Süresi [s]	1,6
Dielektrik Sıvı Basıncı, P_d [bar]	0,1 - 0,4
Dielektrik Sıvı	Gazyağı – Gazyağı+Grafit Tozu
Kutuplama	Elektrot (+) , İş parçası (-)
İşparçası Malzemesi	Ti-6Al-4V
Elektrot Malzemesi	Elektrolitik Bakır
İşleme Derinliği *	~0,7 mm

(*) $I_d=6A$ olan deneylerin uzun sürmesi nedeni ile, bu deneylerin süresi 10 saat ile sınırlandırılmıştır.

Çizelge 3.4'deki deneyler birer kere de tekrar edilerek toplam 32 adet deney yapılmıştır.

Çizelge 3.4. Deney planı

Deney No	Dielektrik	t_s [μ s]	I_d [A]	P_d [bar]
1	Gazyağı	50	12	0,1
2	Gazyağı	50	12	0,4
3	Gazyağı	50	6	0,1
4	Gazyağı	50	6	0,4
5	Gazyağı	100	12	0,1
6	Gazyağı	100	12	0,4
7	Gazyağı	100	6	0,1
8	Gazyağı	100	6	0,4
9	Grafit Tozu + Gaz Yağı	50	12	0,1
10	Grafit Tozu + Gaz Yağı	50	12	0,4
11	Grafit Tozu + Gaz Yağı	50	6	0,1
12	Grafit Tozu + Gaz Yağı	50	6	0,4
13	Grafit Tozu + Gaz Yağı	100	12	0,1
14	Grafit Tozu + Gaz Yağı	100	12	0,4
15	Grafit Tozu + Gaz Yağı	100	6	0,1
16	Grafit Tozu + Gaz Yağı	100	6	0,4

3.6. İİH, EAH ve BA Değerlerinin Belirlenmesi

İİH ve EAH değerlerinin belirlenebilmesi için, deney öncesinde ve sonrasında temizlenmiş elektrot ve işparçaları HANA HG-1 marka (0,005g hassasiyet) dijital terazi ile üçer kez tartılmıştır. Alınan bu üç ölçümün aritmetik ortalaması kaydedilmiştir. Elde edilen ağırlık ölçüm sonuçları, hacimsel işlemeye (veya aşındırmaya) çevrilerek İİH, EAH ve BA değerleri hesaplanmıştır.

3.7. Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

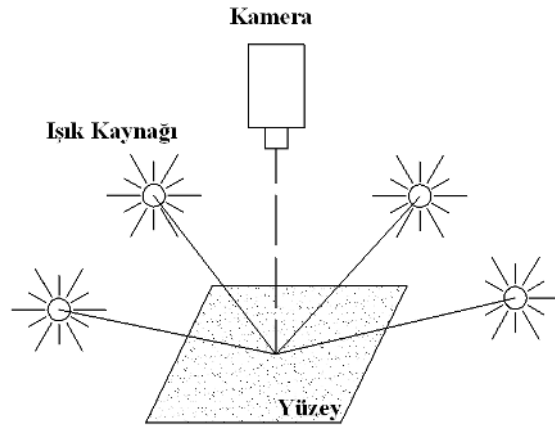
Yüzey pürüzlülüğünün belirlenmesi için, Rank Taylor-Hobson Surtronic 3 + HB-103 tipi dedektör iğne uçlu (stylus) portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı kullanılmıştır. Deneyler sonucunda işlenmiş her bir işparçası yüzeyinden on adet ölçüm alınmıştır. Bu değerlerden uygun olmayanlar Chauvenet kriteri uygulanarak atılmıştır. Kalan değerlerin ortalaması alınarak yüzey pürüzlülüğü belirlenmiştir. Ölçümlerde örnekleme uzunluğu (L_c) 0,8 mm, ölçüm uzunluğu (L_n) 4 mm olarak seçilmiştir. Ölçümlerde R_a , R_q , $R_{z(DIN)}$, R_t , R_y ve R_z değerleri kaydedilmiştir. İşlenmiş bir işparçası Resim 3.3’de görülmektedir.



Resim 3.3. EEİ İşlenmiş Ti-6Al-4V alaşımı

3.8. Yüzey Topoğrafyasının Elde Edilmesi

Optik yöntemler, yüzey ile temas etmedikleri için tahribatsız yöntemlerdir. Bu tez çalışmasında, işlenen yüzeylerin topoğrafyalarının çıkarılması için fotometrik stereo yöntemi kullanılan optik bir cihaz ile işlenen yüzeylerin fotoğrafları çekilmiştir. Fotometrik stereo yöntemi, iki boyutlu görüntülerden gölge bilgisini kullanarak üç boyutlu geriçatım elde etmede kullanılan yaygın bir yöntemdir. Bu yöntemde, kamera ve yüzey sabit tutulurken, Şekil 3.4’de görüldüğü gibi, farklı yönlerden, pozisyonları bilinen ışık kaynakları ile çekilmiş en az üç görüntüdeki parlaklık değerinin değişiminden ve ışık yönünden her piksel için yüzeyin normali hesaplanmaktadır. Hesaplanan bu yüzey normallerinin altında kalan alan hesaplanarak yüzey derinlik bilgisine ulaşılmakta ve yüzey topoğrafisi oluşturulmaktadır. Matlab ile yazılmış bir kod ile iki boyutlu görüntüler üç boyutlu yüzey topoğrafyasına dönüştürülmüştür ve ölçeklendirilmiştir.



Şekil 3.4. Fotometrik stereo yöntemi

4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

4.1. Gazyağı ile Yapılan Deneyler

4.1.1. P_d 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi

Şekil 4.5'da görüldüğü üzere bütün işleme koşullarında P_d 'nin artması ile $\dot{I}H$ 'de artış görülmüştür. En yüksek $\dot{I}H$ 'ye 12 A, 100 μ s, 0,4 bar işleme koşullarında ulaşılmıştır.

İşparçası olarak kullanılan Ti-6Al-4V alaşımının işleme sırasında sıcaklığının yükselmesi sebebiyle, elektriksel direnci artmaktadır [8]. Dolayısıyla işparçası sıcaklığını sabit tutmak daha yüksek $\dot{I}H$ değerlerinin elde edilmesini sağlayacaktır.

Deneylerde tezgah kısıtlamalarından dolayı en fazla 0,4 bar P_d uygulanabilmiştir. Bu değerden daha fazla P_d 'nin kullanılması, hem işparçası sıcaklığının fazla yükselmesini engelleyecek hem de işleme artıklarını daha rahat ortamdan uzaklaştıracığından $\dot{I}H$ 'yi olumlu yönde etkileyecektir. Yapılan deney şartlarında, P_d 'nin artışı ile pürüzlülük değerlerinde (Şekil 4.6) önemli bir değişiklik görülmemesine rağmen işlemenin düzenli bir şekilde devam ettiği ve işparçası yüzeyinin karbon birikimlerinden daha az kirlendiği görülmüştür.

Şekil 4.7'de görüldüğü üzere P_d 'nin artması ile EAH'de artış olduğu gözlenmiştir. EAH en çok t_s ve I_d değişiminden etkilenmiştir. P_d 'nin artması ile BA'da artış gözlenmiştir (Şekil 4.8).

4.1.2. t_s 'nin $\dot{I}H$, Ra, EAH ve BA'ya etkisi

t_s 'nin artması ile $\dot{I}H$ 'de artış meydana gelmiştir (Şekil 4.5). Bunun nedeni boşalım enerjisinin işleme krateri bölgesine daha fazla süre etki etmesi ve bunun sonucunda yüzeyden daha fazla miktarda malzeme ergitilerek buharlaştırılmasıdır. En yüksek $\dot{I}H$ 'ye 12 A, 100 μ s, 0,4 bar koşullarında ulaşılmıştır. t_s 'nin artması ile, gazyağlı deneylerde R_a 'da belirgin bir değişim gözlenmemiştir (Şekil 4.6). t_s 'nin artması ile

EAH ve BA değerlerinde belirgin azalma görülmüştür (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8). BA'daki azalmanın sebebi, t_s 'nin artması ile artan İİH ve azalan EAH'dır.

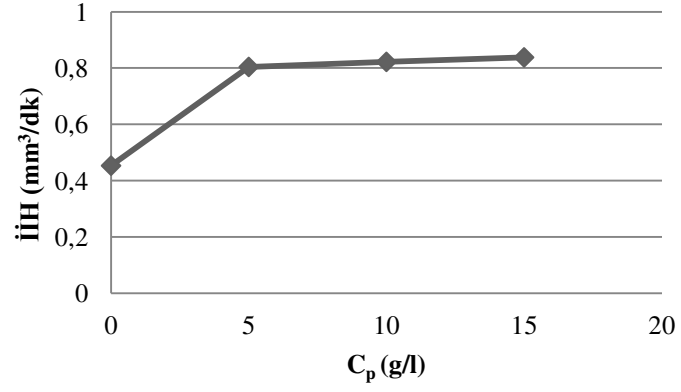
4.1.3. I_d 'nin İİH, R_a , EAH ve BA'ya etkisi

Yapılan deneyler sonucunda, I_d 'nin Ti-6Al-4V alaşımının işleme performans değerlerini etkileyen en önemli parametre olduğu görülmüştür. I_d 'nin 6A'dan 12A'ya çıkarılması ile İİH belirgin şekilde artmıştır (Şekil 4.5). 6A'lık deneyler 10 saat sürer iken, boşalım akımının 12A'e çıkması ile işleme süresi 5 saate inmiştir. I_d 'nin artmasıyla yüzeye daha fazla boşalım enerjisi gönderilerek, daha fazla malzemenin ergitilip buharlaştırılmasını sağlamaktadır. Buna bağlı olarak R_a (Şekil 4.6), EAH (Şekil 4.7) ve BA (Şekil 4.8) değerlerinde de önemli artışlar görülmüştür.

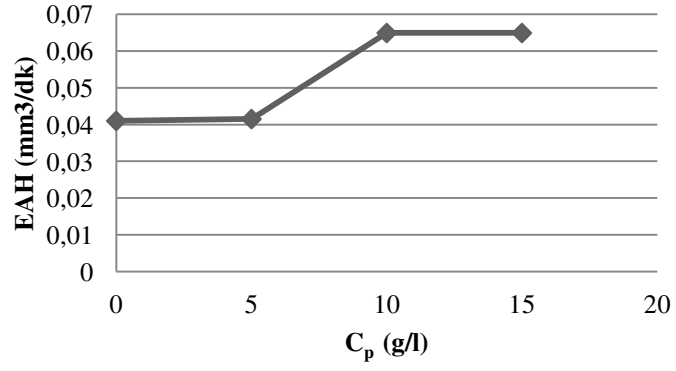
4.2. Grafit Tozu ile Yapılan Deneyler

4.2.1. Grafit tozu konsantrasyonunun belirlenmesi

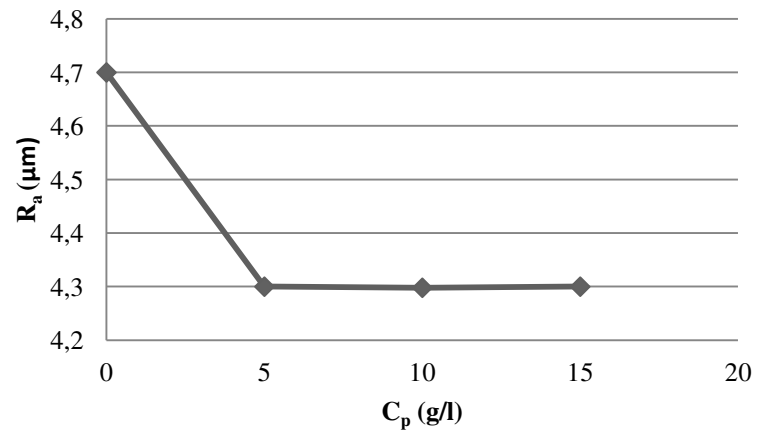
Deneylerde kullanılacak toz konsantrasyonunu belirlemek için, içinde 23 lt gazyağı (dielektrik) bulunan tank içerisine (işparçası üstünde 4-5 cm dielektrik kalacak şekilde), 115 g grafit tozu eklenmiş ($C_p=5g/l$) ve 100 μs , 12 A, 0,1 bar (Deney 13) koşullarında 70 dk EE işleme yapılmıştır. Ardından 115 g daha grafit tozu eklenerek ($C_p=10g/l$) yine aynı koşullarda 70 dk deney sürdürülmüştür. Daha sonra tekrar 115 gr grafit tozu daha eklenerek ($C_p =15g/l$) aynı koşullarda 70 dk daha işleme yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen İİH, R_a ve EAH değerleri sırasıyla Şekil 4.1, Şekil 4.2 ve Şekil 4.3'de görülmektedir.



Şekil 4.1. İİH'nin toz konsantrasyonu ile değişimi



Şekil 4.2. EAH'nin toz konsantrasyonu ile değişimi

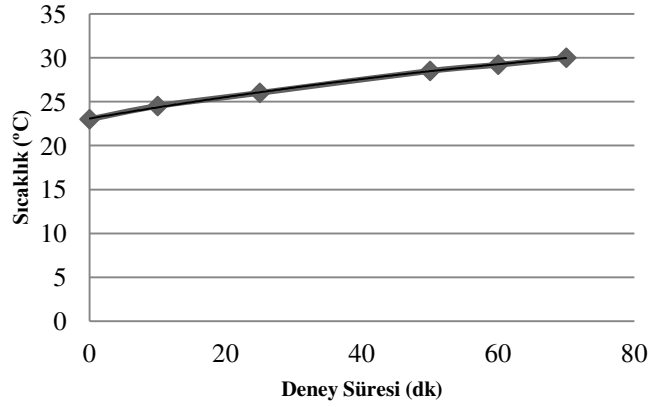


Şekil 4.3. R_a 'nın toz konsantrasyonu ile değişimi

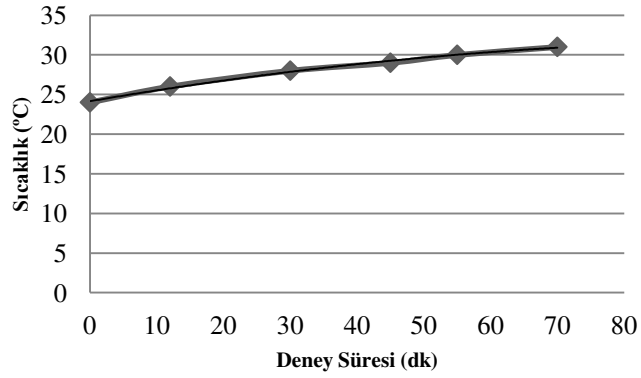
Şekil 4.1'den görüldüğü üzere, gaz yağı içerisine eklenen ilk ve az miktardaki grafit tozu işleme hızını yaklaşık iki katına çıkarmıştır. Grafit tozunun 5 g/l'nin üzerindeki artışı ile işleme hızı az da olsa artmaya devam etmiştir. Elektrot aşınması 5 g/l grafit tozunun eklenmesi ile gazyağına oranla az artmış ancak 10-15 g/l C_p değerlerinde EAH artışı belirginleşmiştir (Şekil 4.2). Yüzey pürüzlülüğünde ilk toz katkısı ile belirgin iyileşme gözlenmiş, 5g/l üzerindeki C_p değerleri R_a 'yı değiştirmemiştir (Şekil 4.3).

Yapılan bu ön deneyler sonucunda en yüksek İİH değerinin elde edildiği, EAH ve yüzey pürüzlülüğünün daha düşük çıktığı 5 g/l toz konsantrasyonu kullanılmasına karar verilmiştir. C_p değerinin 5 g/l seçilmesi ile grafit tozunun da düşük miktarda kullanılması sağlanmıştır.

Toz konsantrasyonunu belirlemek için yapılan deneyler sırasında dielektrik sıvı sıcaklığı da kontrol edilmiştir. 10 g/l ve 15 g/l toz konsantrasyonlarında yapılan deneylerde ölçülen sıcaklık değerlerine ait grafikler Şekil 4.4'de verilmiştir. Elde edilen grafiklere bakıldığında, deney süresince işleme süresiyle sıcaklık arasında doğrusala yakın bir artış görülmüştür. Her iki konsantrasyonda da 100 μ s, 12 A, 0,1 bar koşullarında, dielektrik sıvı sıcaklığının 70 dk'dan sonra 30°C'nin üzerine çıktığı gözlenmiştir. Bundan sonra art arda yapılacak olan deneylerde, dielektrik sıvının ısınmasının işleme üzerinde oluşturabileceği farklılıkları önlemek ve deneylerin standart koşullarda olmasını sağlamak amacıyla, her deneye başlamadan önce dielektrik sıvı sıcaklığının 25 °C'ye düşmesi beklenmiştir.



(a)

Şekil 4.4. C_p ile dielektrik sıvı sıcaklık değişimi a) 10g/l b) 15 g/l

4.2.2. P_d 'nin İİH, R_a , EAH ve BA'ya etkisi

P_d 'nin artışı, gazyağında olduğu gibi grafit tozlu deneylerde de İİH'nin artmasını sağlamıştır (Şekil 4.5). Grafit tozlu deneylerde, P_d 'nin değişmesi R_a 'yı fazla etkilememiştir (Şekil 4.6). P_d 'nin artması ile EAH değerlerinde artış olmuştur. En yüksek EAH, 12 A, 50 μ s, 0,4 bar koşullarında görülmüştür (Şekil 4.7). P_d 'nin artması ile BA'da az miktarda artış gözlenmiştir (Şekil 4.8).

4.2.3. t_s 'nin $\dot{I}H$, R_a , EAH ve BA'ya etkisi

Grafit tozlu deneylerde gazyağı ile yapılan deneylerde olduğu gibi t_s 'nin artması ile $\dot{I}H$ artmıştır (Şekil 4.5). Grafit tozlu deneylerde elde edilen $\dot{I}H$ değerleri, gazyağına göre daha yüksektir. Grafit tozlu deneylerde, t_s 'nin artması ile R_a değerlerinde artış görülmüştür (Şekil 4.6). t_s 'deki artış, EAH ve BA'yı azaltmıştır (Şekil 4.7 ve Şekil 4.8).

4.2.4. I_d 'nin $\dot{I}H$, R_a , EAH ve BA'ya etkisi

I_d 'nin artması ile gazyağında olduğu gibi, $\dot{I}H$ değerleri de belirgin oranda artmıştır. Grafit tozlu deneylerde 6 A ve 12 A I_d değerlerinde elde edilen $\dot{I}H$ değerleri, gazyağı ile elde edilenlere göre daha yüksektir (Şekil 4.5). Grafit tozlu deneylerde I_d artmasıyla, R_a değerlerinde kısmen bir artış, EAH ve BA değerlerinde ise belirgin bir artış görülmüştür. (Şekil 4.6, Şekil 4.7 ve Şekil 4.8).

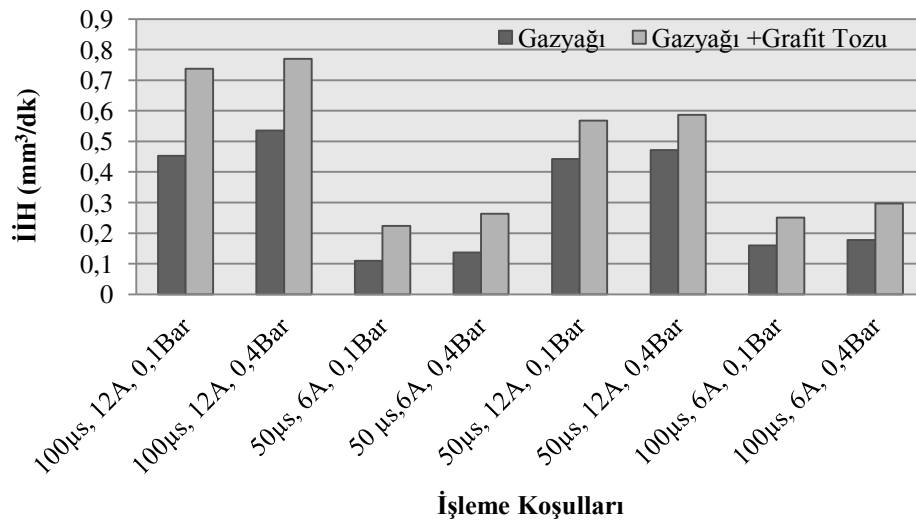
4.3. Gazyağı ve Grafit Tozu Karışımli Gazyağı Deneylerin Karşılaştırılması

4.3.1. Grafit tozunun $\dot{I}H$ 'ye etkisi

Şekil 4.5'de görüldüğü üzere tüm işleme koşullarında grafit tozlu deneylerde gazyağına oranla $\dot{I}H$ belirgin olarak artmıştır. Ti-6Al-4V alaşımının sahip olduğu yüksek elektriksel direnç ve düşük ısı iletkenliğinden dolayı gazyağı kullanılarak yapılan deneylerde EEİ süresinin oldukça uzun olduğu görülmüştür.

Ti-6Al-4V alaşımının EE ile işlenmesi sırasında yüksek enerji uygulaması malzeme sıcaklığının hızla artmasına sebep olmaktadır. İşparçasının sıcaklığının artması, elektriksel direncinin de artmasına neden olmakta ve bu da işparçasına uygulanan boşalım akımının düşmesine neden olmaktadır. Ti-6Al-4V alaşımının elektriksel direncinin artmasıyla, dielektrik sıvı kırımını sağlamak amacıyla elektrot işparçasına daha çok yaklaşmaktadır. Elektrotun işparçasına yaklaşması ile boşalım aralığı daralmaktadır [8]. Elektrodun işparçasına fazla yaklaşması, dielektrik sıvı dolaşımını zorlaştıracak ve işleme artıklarının ortamdaki uzaklaşmasını engelleyerek

istenmeyen ark oluşumuna neden olmaktadır. Bunun sonucunda düşük İİH değeri elde edilmektedir. İİH değerinin düşük olmasının diğer bir sebebi de, gazyağının hidrokarbonlardan oluşması sebebiyle işparçası yüzeyinde ergime noktası yüksek TiC katmanının oluşmasıdır. TiC'un ergitilebilmesi için daha yüksek boşalım enerjisi gerekmektedir [18]. Bu tez çalışmasında, gazyağı içerisine karıştırılan grafit tozları işleme aralığını arttırmakta ve bunun sonucunda İİH belirgin olarak artmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Grafit tozunun İİH'ye etkisi

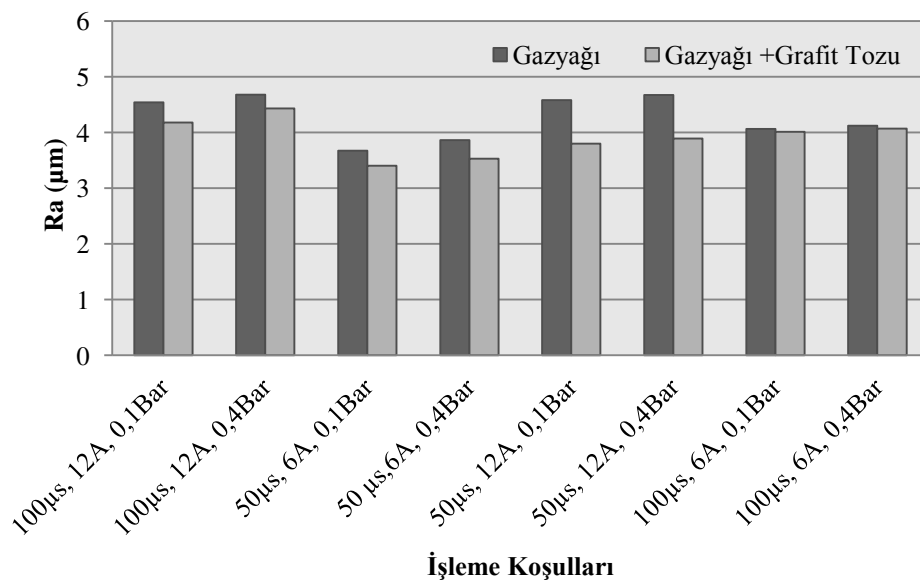
4.3.2. Grafit tozunun Ra'ya etkisi

Gazyağıyla yapılan deneylerde, uygulanan I_d değerleri için t_s ve t_p doğru seçilemediği takdirde, elektrot ve işparçası yüzeyinde tahribatlar olduğu gözlenmiştir. Meydana gelen yüksek sıcaklık nedeniyle, ergime sıcaklığı düşük olan bakır elektrot yüzeyi dağılmakta buna bağlı olarak işparçası yüzeyinde istenmeyen tahribatlar oluşmaktadır (Resim 4.1). Gazyağlı deneylerde gözlemlenen bu oluşumun engellenebilmesi için deneme yanılma yöntemi ile uygun t_p değerleri bulunmasına rağmen zaman zaman istenmeyen ark vurum oluşumlarına engel olunamamıştır. Yüksek t_p değerlerinin seçimi ise işleme süresini oldukça uzatmıştır. Gazyağlı deneylerde, işleme yüzeyinin bazı bölgelerinde görülen ark yanmalarına aynı koşullarda yapılan grafit tozlu deneylerde daha nadir rastlanmıştır. Grafit tozlu

deneylerde elde edilen R_a değerleri, gazyağı ile yapılan deneylerdekine göre biraz daha düşük olması yanında (Şekil 4.6), grafit tozlu deneylerde elde edilen yüzeylerin, gazyağlı deneylerde elde edilen yüzeylere göre daha belirgin parlaklık gösterdiği gözlenmiştir. Bunun nedeni, işleme bölgesindeki grafit tozlarının boşalım enerjisinin tek bir noktada değil aynı anda birden fazla noktaya bölmesi sonucu karbon yanıklarının daha az olmasıdır.



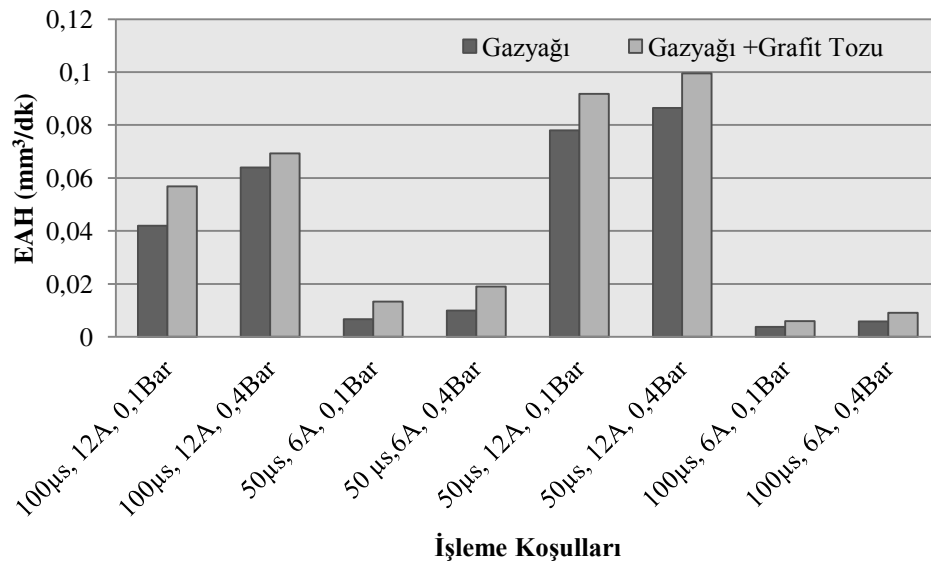
Resim 4.1. Yetersiz t_p sonucu oluşan işparçası ve elektrot tahrifatları



Şekil 4.6. Grafit tozunun R_a 'ya etkisi

4.3.3. Grafit tozunun EAH'ye etkisi

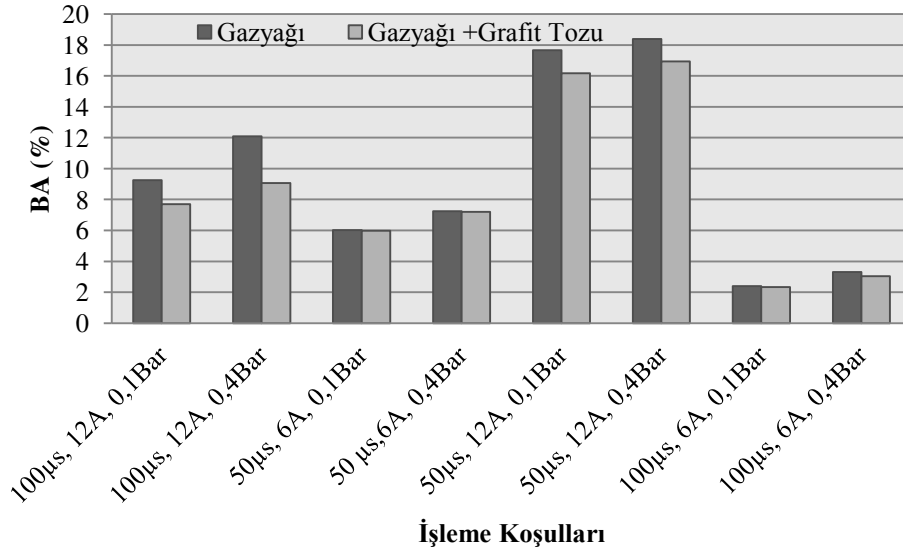
Şekil 4.7'de görüldüğü üzere, grafit tozlu deneylerde gazyağı ile yapılan deneylere göre EAH'de bir miktar artış meydana gelmiştir. Bunun sebebi, dielektrik içerisindeki iletken grafit tozları dielektrik sıvının iletkenliğini arttırmakta ve elektrot daha fazla boşalım enerjisi iletmektedir.



Şekil 4.7. Grafit tozunun EAH'ye etkisi

4.3.4. Grafit tozunun BA'ya etkisi

Grafit tozlu deneylerde elde edilen BA değeri gazyağı kullanılan deneylerde elde edilenlerden daha düşüktür (Şekil 4.8). EEİ'de BA değeri işleme performansını belirleyen önemli parametrelerden biridir. Grafit tozlu deneylerde elde edilen BA değerlerine bakıldığında, grafit tozunun Ti-6Al-4V titanyum alaşımının işlenmesine olumlu katkısı açıkça görülmektedir.



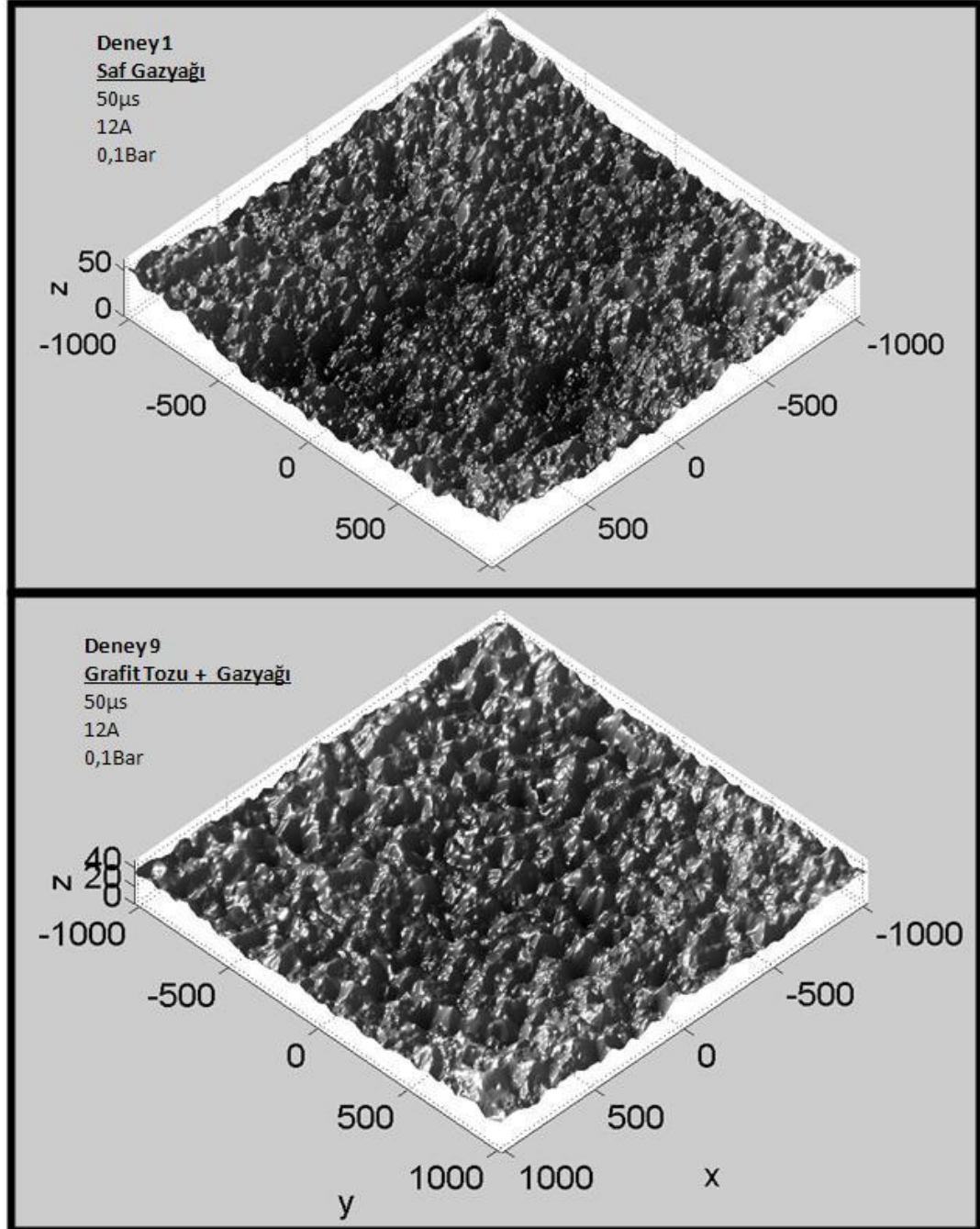
Şekil 4.8. Grafit tozunun BA'ya etkisi

4.4. Grafit Tozunun Yüzey Topoğrafyasına Etkisi

Grafit tozlu ve gazyağlı deneylerden elde edilen işparçası yüzeylerinden 2x2 mm boyutunda bir bölgenin fotometrik stereo yöntemi kullanılarak elde edilmiş fotoğraflarından üç boyutlu yüzey topoğrafyaları oluşturulmuştur. Görüntüleri daha da detaylandırmak amacıyla 2x2 mm boyutunda bölgeden 0,5x0,5 mm boyutunda bölgeler seçilerek üç boyutlu yüzey topoğrafyaları oluşturulmuştur.

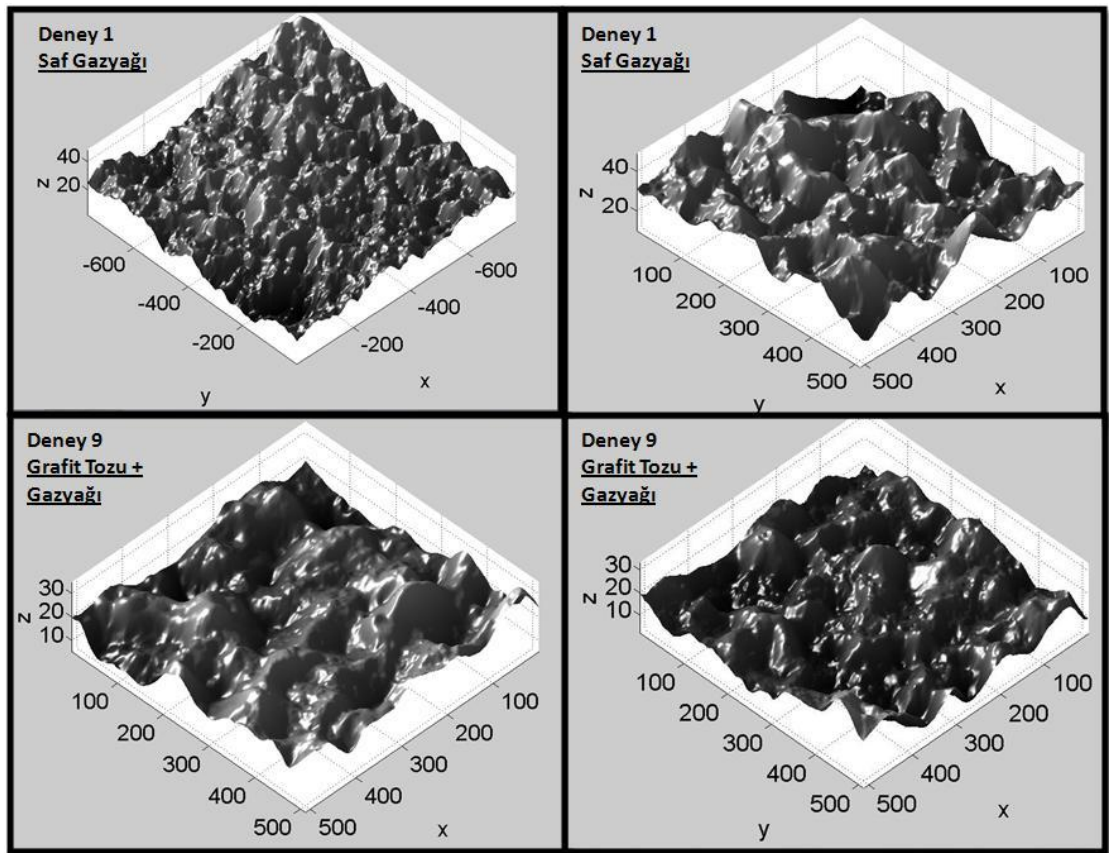
Şekil 4.9'da Deney 1 (50µs-12A-0,1 Bar- gazyağı) ve Deney 9 (50 µs-12A-0,1 Bar- gazyağı+grafit tozu) yüzey topoğrafyaları görülmektedir. Şekil 4.9'da Z eksenine bakıldığında Deney 1'de ~50 µm olan değer Deney 9'da ~40 µm olduğu gözlenmektedir. Buradan Deney 1'de (gazyağlı) elde edilen yüzeyde tepe ve vadi aralıklarının daha yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, Deney 1'de işleme sırasında oluşan istenmeyen arklardan dolayı yüzeyde homojen olmayan bölgeler olduğu, Deney 9'daki yüzeyin ise daha parlak ve homojen görüntülü olduğu tespit edilmiştir. Grafit tozu ile yapılan işlemlerde, boşalım enerjisinin tozlar yardımı ile yüzey alanına daha eşit bir şekilde dağıtılmasından dolayı, yüzeydeki tepe-vadilerin daha düzenli bir dağılıma sahip olduğu görülmektedir. Gazyağlı deneylerde elde

edilen yüzeylerde boşalım ve ark oluşumlarının çeşitli nedenlerle bazı bölgelerde yoğunlaşması nedeniyle, daha derin ve sivri uçlu kraterler oluşmaktadır.



Şekil 4.9. Deney 1 ve deney 9'dan alınan 2x2mm boyutundaki bölgeden oluşturulmuş yüzey topoğrafyalarının karşılaştırılması

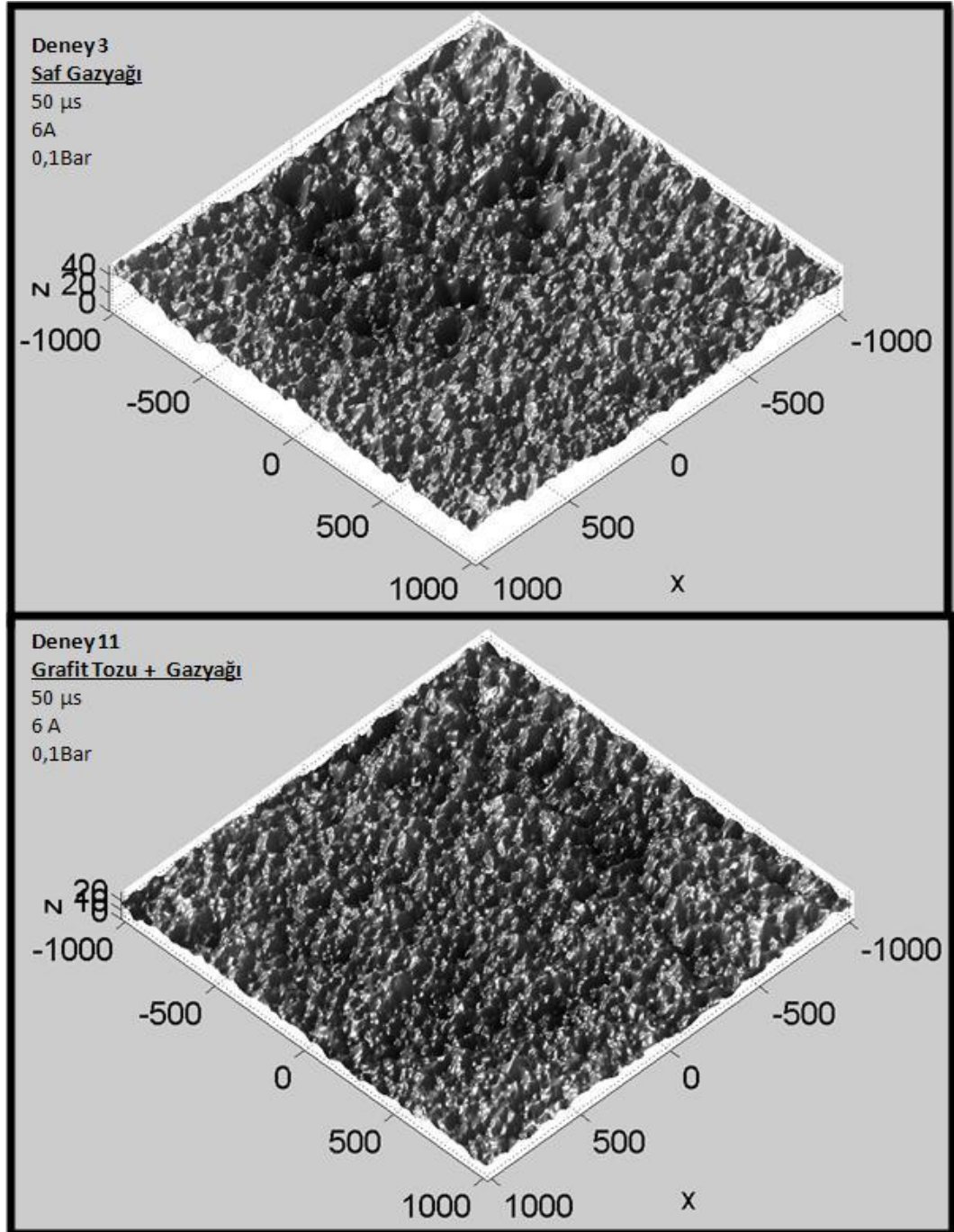
Şekil 4.10'da ise Deney 1 ve Deney 9 yüzeylerinin 0,5x0,5mm boyutlarındaki bölgelerinden elde edilen detaylı grafikler görülmektedir. Bu grafikler de incelendiğinde, gazyağı ile yapılan deneyde elde edilen yüzeyde, diğerine nazaran tepe-vadi yüksekliklerinin daha fazla olduğu, yüzeyde girinti-çıkıntının daha sık olduğu ve yüzeydeki tepe uçlarının daha dik ve sivri olduğu görülmektedir. Grafit tozunun kullanımı ile tepeler yuvarlanmış, yüzeyde tepe ve vadiler daha düzenli şekilde dağılmış ve tepe-vadi arası yükseklikler azalmıştır.



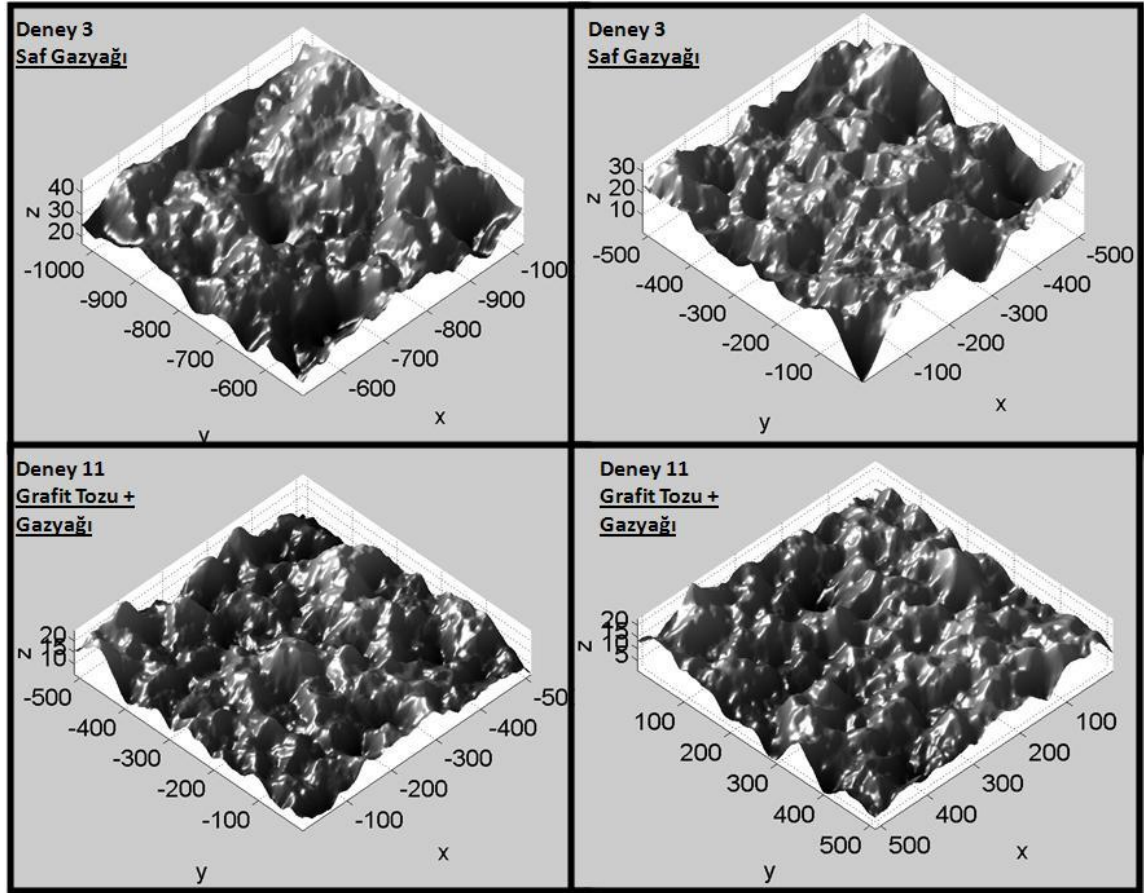
Şekil 4.10. Deney 1 ve deney 9 yüzeylerinin 0,5x0,5 mm boyutundaki bölgelerinden elde edilen grafikler

Şekil 4.11'de Deney 3 (50 μ s-6A-0,1 Bar-gazyağı) ve Deney 11 (50 μ s-6A-0,1 Bar-gazyağı+grafit tozu) yüzey topoğrafyaları karşılaştırılmıştır. Şekil 4.11'deki topoğrafyalar Şekil 4.9'dekilere göre yarı enerjili boşalımlarla elde edilmiştir. Dolayısıyla daha az enerjili boşalımlardan elde edilen küçük kraterli ve alçak tepeli topografya beklenen bir sonuçtur. Şekil 4.11'deki yüzeylere bakıldığında Şekil 4.9'te olduğu gibi grafit tozunun kullanımı ile tepe-vadi arası yükseklikler azalmıştır. Şekil

4.11'te gazyağında $\sim 40 \mu\text{m}$ olarak görülen Z eksenini, grafit tozlu deneyde $\sim 20 \mu\text{m}$ 'ye düşmüş olup, grafit tozlu deneydeki yüzey daha düzgün dağılımlıdır. Şekil 4.12'da $0,5 \times 0,5 \text{ mm}$ 'ye bölünmüş detay totografyalarında daha önceden Şekil 4.10'da tespit edilen bulgular açıkça görülmektedir.



Şekil 4.11. Deney 3 ve deney 11'den alınan $2 \times 2 \text{ mm}$ boyutundaki bölgeden oluşturulmuş yüzey topoğrafyalarının karşılaştırılması



Şekil 4.12. Deney 3 ve deney 11 yüzeylerinin 0,5 x 0,5 mm boyutundaki bölgelerinden elde edilen grafikler

Çizelge 4.1’de yüzey pürüzlülük cihazı ve optik yöntem ile elde edilen $R_{z(DIN)}$ değerleri görülmektedir. Optik yöntem ile elde edilen 2B fotoğraflar kullanılarak oluşturulmuş olan 3B grafiklerden, 5 adet $128 \mu m \times 128 \mu m$ alandan $R_{z(DIN)}$ değerleri Matlab ile elde edilmiş ve bu değerlerin ortalamaları alınmıştır. Çizelgeden de görüldüğü üzere yüzey pürüzlülük cihazı ile optik olarak elde edilen $R_{z(DIN)}$ değerleri arasında %12 - %27 fark bulunmaktadır. Bu farkın temel iki sebebi vardır. Bunlardan birincisi yüzey pürüzlülük cihazı ile ölçüm alınan noktaların optik yöntemle ölçüm alınan noktalar ile birebir aynı olmamasıdır. Diğer sebebi ise yüzey pürüzlülük cihazının bir çizgi üzerinde ölçüm yapması, optik yöntemde ise belli bir alandan ölçüm alınmasıdır.

Çizelge 4.1. Yüzey pürüzlülük ölçüm cihazı ve optik yöntemle elde edilen $R_{z(DIN)}$ değerleri

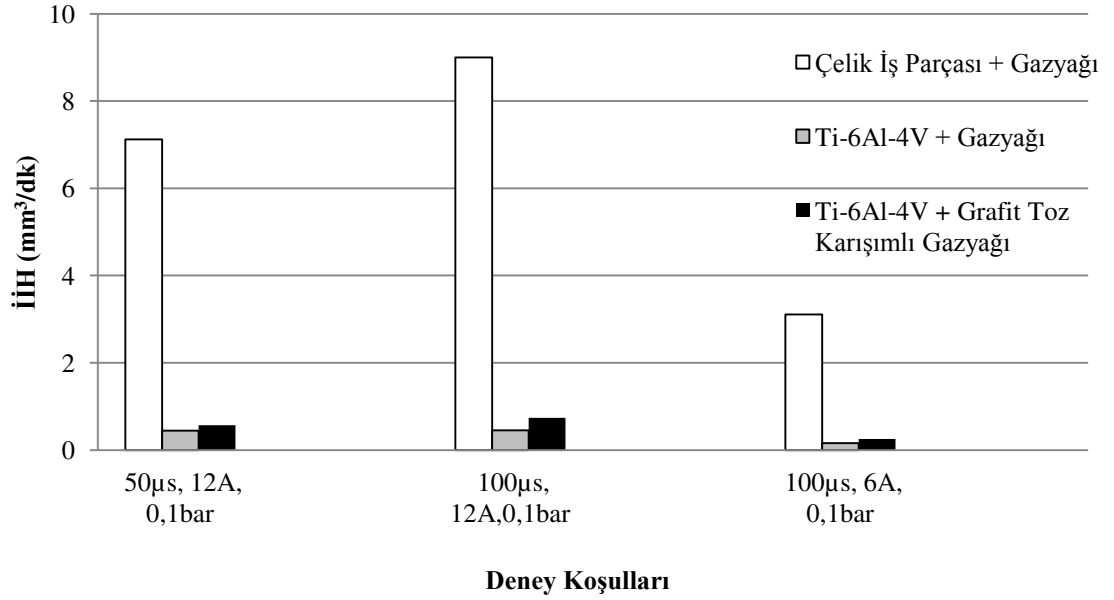
Gazyağı			Grafit Tozu + Gazyağı			Grafit Tozu Kullanılması ile $R_{z(DIN)}$ Değerlerindeki Azalma	
Deney No	$R_{z(DIN)}$ [μm]		Deney No	$R_{z(DIN)}$ [μm]			
	Yüzey Pürüzlülük Cihazı Değerleri	Optik Değerler		Yüzey Pürüzlülük Cihazı Değerleri	Optik Değerler	% Fark (yüzey pürüzlülük cihazı)	% Fark (optik yöntem)
Deney 1	24,03	19,98	Deney 9	20,57	16,60	14,40	16,92
Deney 3	23,41	17,41	Deney 11	19,59	14,84	16,32	14,76
Deney 5	25,67	18,72	Deney 13	23,28	16,77	9,31	10,42
Deney 6	26,2	22,86	Deney 14	24,86	18,61	5,11	18,57

Grafit tozunun kullanımı ile yüzey pürüzlülük cihazı ile elde edilen $R_{z(DIN)}$ değerlerinde %5-%16 arasında (optik yöntem ile %10-%18) azalma olduğu görülmektedir. Bu değerler açıkca grafit tozu karışimli gazyağı kullanımının yüzeyde daha sık kraterler oluşturduğunu göstermektedir.

4.5. Ç1040 ve Ti-6Al-4V ‘nin EE Performans Çıktılarının Karşılaştırılması

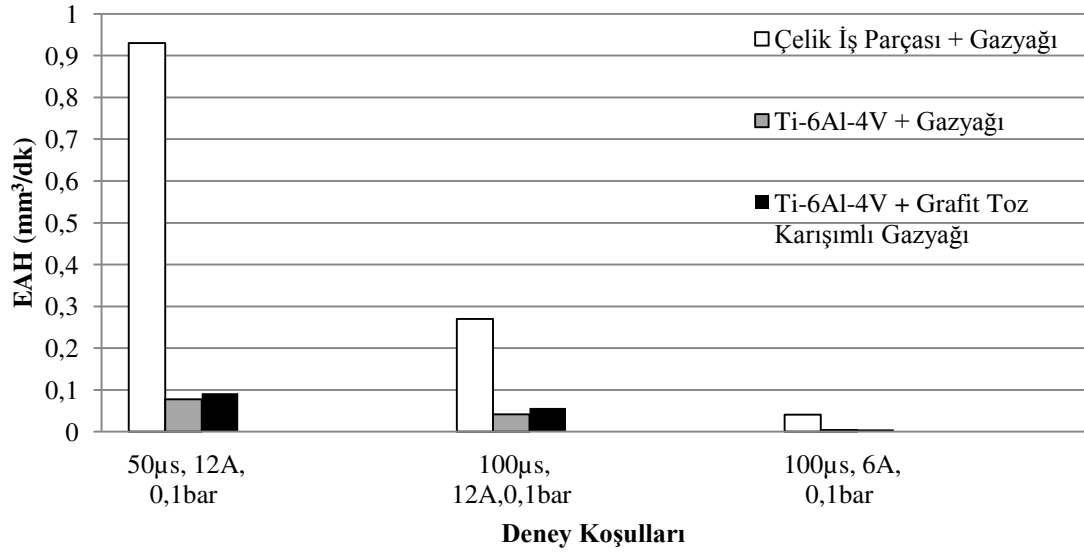
Ti-6Al-4V alaşımının İİH, EAH, R_a ve BA değerlerini endüstride yaygın olarak kullanılan çelik işparçası ile karşılaştırmak amacıyla üç deney koşulunda (Deney 1, Deney 5 ve Deney 7), 40mmx40mmx9,7mm boyutlarında Ç1040 çeliği EE ile işlenmiştir. Karşılaştırma yapılabilmesi için Ç1040 çeliği titanyum alaşımı ile aynı koşullarda işlenmiştir. Şekil 4.13’de görüldüğü üzere, Ç1040 çeliğinin her üç deney koşulunda da titanyum alaşımından çok daha yüksek İİH değerleri vermiştir. Ti-6Al-4V alaşımının gazyağı dielektrik kullanılarak işlenmesi, çeliğin işlenmesinden 16,1-19,8 kat daha yavaş, grafit tozu karışimli gazyağı dielektrik kullanılarak işlenmesinden 12,2 – 12,5 kat daha yavaştır. Bu tezde, titanyum alaşımını işlemede kullanılan uzun geri çekme süresi (1,6s) ile kısa çalışma süresi (0,8s) yerine çelik

işparçasını işlemede daha kısa geri çekme süresi (0,4s) ve uzun çalışma süresinde (1,6s) çok daha yüksek İİH değerleri (34-55 kat fazla) elde edilmiştir.



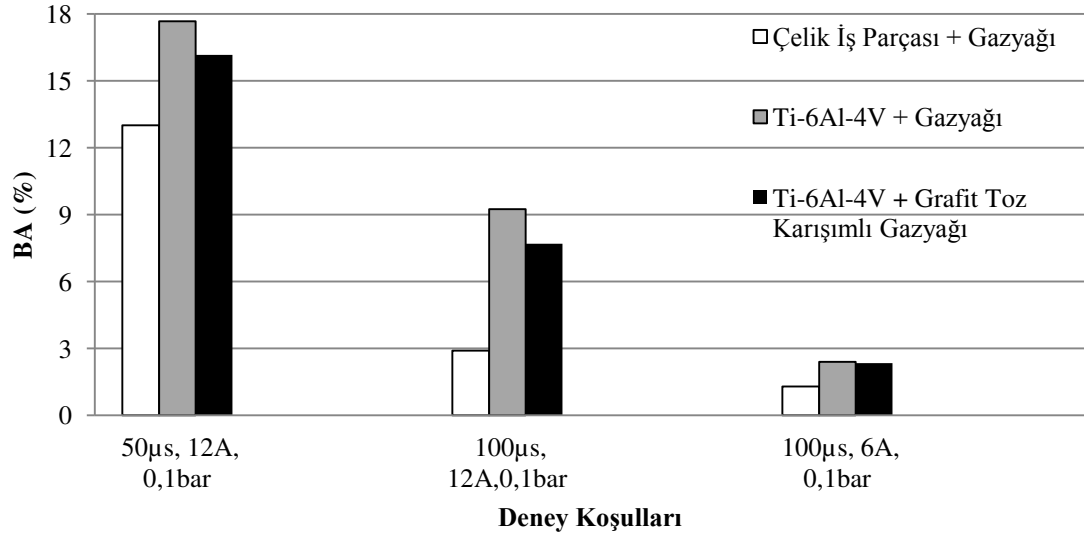
Şekil 4.13. Ç1040 ve Ti-6Al-4V İİH karşılaştırılması

Ç1040 çeliğinin EEİ ile elde edilen EAH değerleri Ti-6Al-4V alaşımının gazyağı dielektrik kullanılarak işlenmesiyle elde edilen EAH değerlerinden 6,4 – 11,9 kat, grafit tozlu dielektrik kullanılarak elde edilen EAH değerlerinden ise 4,8 – 10 kat daha fazladır. (Şekil 4.14).



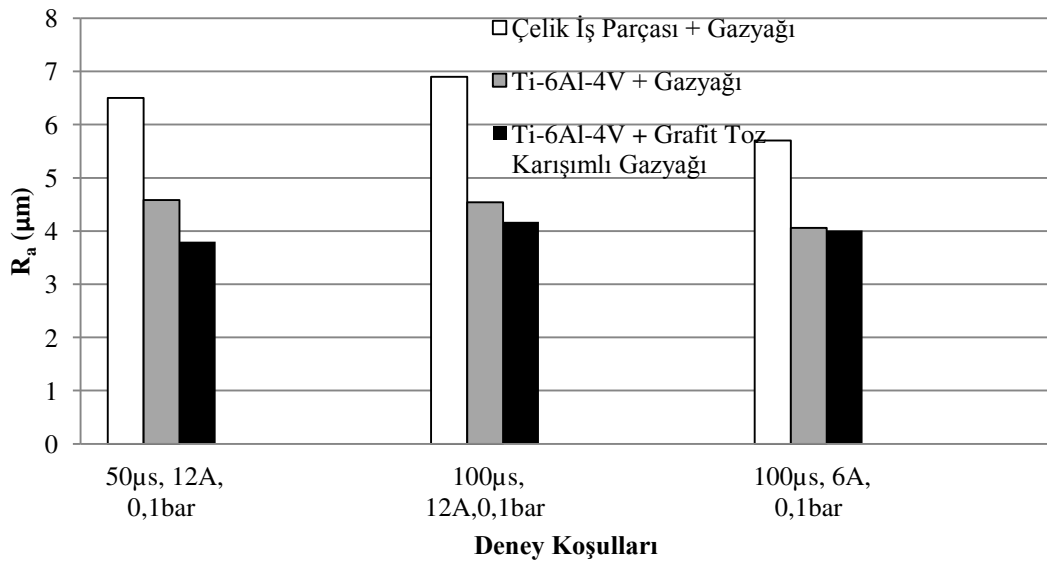
Şekil 4.14. Ç1040 ve Ti-6Al-4V EAH karşılaştırılması

Ç1040 çeliğinin işlenmesi sonucu elde edilen BA değerleri, Ti-6Al-4V alaşımının işlenmesiyle elde edilen BA değerlerine oranla düşük çıktığı görülmüştür (Şekil 4.15). Buradan Ç1040 çeliğinin işlenmesinde İİH değerinin EAH değerinden çok daha fazla olduğu anlaşılmaktadır. Titanyum alaşımını gazyağı dielektrik kullanılarak yapılan işlemlerde elde edilen BA değerleri, Ç1040 çeliğinin işlenmesiyle elde edilen BA değerlerinden 1,3 – 3,2 kat daha fazladır. Grafit tozu karışımli dielektrik kullanılarak elde edilen BA değerleri ise Ç1040 çeliğinin işlenmesi ile elde edilen BA değerlerinden 1,2 – 2,65 kat daha fazla elde edilmiştir.



Şekil 4.15. Ç1040 ve Ti-6Al-4V BA karşılaştırılması

Ç1040 çeliğinin elektriksel direncinin ve ısı iletkenliğinin EEİ için uygun olması nedeniyle boşalım kıvılcımlarının işparçası üzerinde daha etkili olması, işparçası üzerinde daha büyük ve derin kraterler oluşturmakta dolayısı ile titanyum alaşımına göre daha yüksek R_a değerlerinin elde edilmesine neden olmaktadır (Şekil 4.16).



Şekil 4.16. Ç1040 ve Ti-6Al-4V R_a karşılaştırılması

5. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında Ti-6Al-4V alaşımının, dielektrik sıvı olarak gazyağı ve grafit tozu karışımli gazyağı kullanılarak yapılan deneylerde, belirlenen işleme parametrelerinde, işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, yüzey pürüzlülüğü, bağıl aşınma ve yüzey topoğrafyaları incelenmiştir. Gazyağı ve grafit tozlu gazyağı ile yapılan deney sonuçları karşılaştırılarak, grafit tozunun işleme performansına etkisi belirlenmiştir.

Dielektrik sıvı basıncının (P_d), Ti-6Al-4V alaşımının EE ile işlenmesinde önemli bir parametre olduğu anlaşılmıştır. Özellikle yüzeyde oluşan ısıyı yüksek dielektrik sıvı basıncı ile atmak, işleme performansını önemli ölçüde iyileştirmektedir. Gazyağı ve grafit tozlu deneylerin her ikisinde de, dielektrik sıvı basıncının artması ile işleme hızında belirgin, elektrot aşınmasında ise kısmi artış meydana gelmiş, yüzey pürüzlülüğünde ise fazla değişim görülmemiştir. Dielektrik sıvı basıncın yüksek olduğu deneyler de işlemenin daha dengeli olduğu ve yüzeylerin daha temiz çıktığı gözlenmiştir.

Gazyağı ve grafit tozlu deneylerde vurum süresinin artması ile işleme hızında artış, elektrot aşınma hızında düşüş gözlenmiştir. İşparçası yüzey pürüzlülük değerlerinde önemli bir değişiklik olmadığı görülmüştür. Pürüzlülük değerleri, en çok boşalım akımının değişmesiyle değişmiştir. Ti-6Al-4V'nin EE ile işlenmesinde dielektrik sıvı içerisinde grafit tozu kullanımının İİH, BA ve yüzey pürüzlülüğü karakteristiklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir.

Grafit tozlu deneylerde, işlemenin daha dengeli olduğu, gazyağı deneylerde oluşan istenmeyen arkların yarattığı yüzey hasarlarının, grafit tozlu deneylerde daha az olduğu, işlenmiş yüzeyin gazyağın dielektrik kullanılarak elde edilene göre daha parlak olduğu gözlenmiştir. Grafit tozunun işleme hızını belirgin olarak arttırdığı tespit edilmiştir.

İşparçası 3B yüzey topoğrafyaları incelendiğinde, grafit tozu ile yapılan deneylerde elde edilen yüzeylerdeki tepe-vadi arası yüksekliklerin, gazyağı ile elde edilen yüzeylere göre daha az olduğu gözlenmiştir. Yüzey pürüzlülük cihazı ile elde edilen

$R_{z(DIN)}$ değerlerinde %5 - %16 arasında (optik yöntem ile %10-%18,5) azalma olduğu gözlenmiştir. Bu da yine boşalım enerjisinin grafit tozları sayesinde bir çok noktaya dağıtılmasından dolayıdır. Gazyağlı deneylerde edilen yüzeylerde tepe noktaları grafit tozlu deneylerdekilere göre daha dik ve sivridir.

Gazyağı dielektrik sıvı içerisine 5 g/l grafit tozu karıştırılması ile, İİH değerlerinin %24,3 ile %103,6 arasında arttığı, yüzey pürüzlülüğünün %1,2 ile %17,03 arasında iyileştiği (düştüğü), BA'nın %0,7 ile %25 arasında azaldığı ve EAH'nin %8,2 ile %55 arasında arttığı gözlemlenmiştir.

Ti-6Al-4V alaşımını, EEİ'de işparçası olarak yaygın kullanılan Ç1040 çeliği ile karşılaştırmak amacıyla, Ç1040 çeliği belirlenen deney koşullarında işlenmiştir. Yapılan deneysel çalışmalar, Ti-6Al-4V alaşımının Ç1040 çeliğinden 16,1-19,8 kat daha yavaş işlendiğini göstermiştir. Bu durum titanyum alaşımının EE ile işlenmesinde yaşanan düşük İİH sıkıntısını ve işleme parametrelerinin seçiminin önemini ortaya koymaktadır.

KAYNAKLAR

1. Abdel, H., El-Hofy, G., "Advanced machining process, nontraditional and hybrid machining process", **McGraw-Hill**, New York, 8-13(2005).
2. Snoeys, R., Staelens, F., Dekeyser, W., "Current trends in nonconventional material removal processes", **Ann. CIRP**, 35 (2): 467–480 (1986).
3. Lee, H.T., Yur, J.P., "Characteristic Analysis of EDMed Surfaces Using the Taguchi Approach", **Materials and Manufacturing Process**, 15(6): 781-806 (2000).
4. Youssef, H.A., El-Hofy, H., "Machining Technology-Machine tools and operations", **CRC Press**, New York, 391-470 (2008).
5. Tsai, H.C., Yan, B.H., Huang, F.Y., "EDM performance of Cr/Cu based composite electrodes", **Int. J. Mach. Tools Manufact.**, 43:121-128 (2003).
6. Anders, A., "Tracking down the origin of arc plasma science, II. Early continuous discharges", **IEEE Trans. Plasma Sci.**, 31 (4): 1060-1069 (2003).
7. Springborn, R. K., "Non-Traditional Machining Processes", **American Society of Tool and Manufacturing Engineers**, USA (1967).
8. Fonda, P., Wang, Z., Yamazaki, K., Akutsu, Y., "A fundamental study on Ti-6Al-4V's thermal and electrical properties and their relation to EDM productivity", **Journal of materials processing technology**, 202 : 583-589 (2008).
9. Motorcu, A.R., "Nikel esaslı süperalaşımların ve titanyum alaşımlarının işlenebilirliği", **Makine Teknolojileri Elektronik Dergisi**, 7 (2) : 1-17 (2010).
10. Yang, X., Liu, C.R., "Machining titanium and its alloys" **Machining Science and technology**, 3(1): 107-139 (1999).
11. İnternet: Material Property Data
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a0655d261898456b958e5f825ae85390>.
12. internet: Material Property Data
<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=5990bdc00adf4e67b4a94b591aca701f>.
13. Ezygwy, E.O., Wang, Z.M., "Titanium alloys and their machinability", **Journal of Materials Processing Technology**, 68: 262-274 (1997).

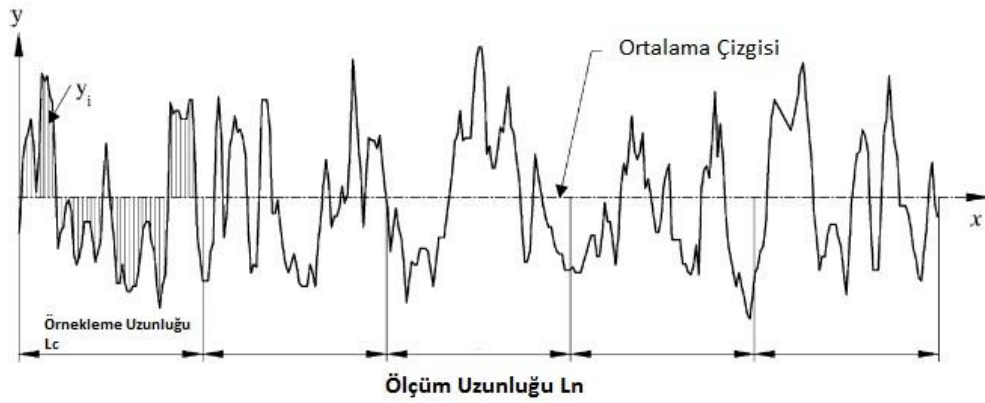
14. Joubert, H.J., Treurnicht, N.F., "An experimental investigation of cooling and cutting strategies for face milling of Ti-6Al-4V", *2nd SAIAS Symposium*, 14-16 September, Stellenbosch, South Africa, 1-11.
15. Myers, J. R., Bomberger, H. B., Froes F.H., "Corrosion Behavior and Use of Titanium and its alloys" , *J. Mater*, 36 (10): 50-60 (1984) .
16. Zhang, W.J., Reddy, B.V., Deevi, S.C.," Physical properties of TiAl-base alloys", *Scripta Mater*, 45, 645 – 651 (2001).
17. Soni, J.,S., Chakraverti, G., "Machining characteristics of titanium with rotary electro-discharge machining", *Wear*, 171: 51-58 (1994).
18. Chen S.L., Yan B.H., Huang F.Y., "Influence of kerosene and distilled water as dielectrics on the electric discharge machining characteristics of Ti-6Al-4V", *Journal of materials processing technology*, 87:107-111 (1999).
19. Lin, Y.C., Yan, B.H., Chang, Y.S.,"Machining characteristics of titanium alloy (Ti-6Al-4V) using a combination process of EDM with USM", *Journal of Materials Processing Technology*, 104, 171-177 (2000).
20. Chow, H.M., Yan, B.H., Huang, F.Y., Hung, J.C.,"Study of added powder in kerosene for the micro-slit machining of titanium alloy using electro-discharge machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 101: 95-103 (2000).
21. Jeswani, M.L.,"Effect of the addition of graphite powder to kerosene used as the dielectric fluid electrical discharge machining", *Wear*, 70: 133-139 (1981).
22. Kansal, H.K.,Singh, S.,Kumara P., "Parametric optimization of powder mixed electrical discharge machining by response surface methodology", *Journal of Materials Processing Technology*, 169:427–436 (2005).
23. Uno, Y., Okada, A., Çetin, S.,"Surface modification of EDMed surface with powder mixed fluid", *2nd International Conference on Design and Production of Dies and Molds*, Kuşadası, (2001).
24. Rival,"Electrical discharge machining of titanium alloy using copper tungsten electrode with SiC powder suspension dielectric fluid", Master Thesis, *Faculty of Mechanical Engineering University Teknologi Malaysia*, 2005.
25. Furutani, K., Saneto, A., Takezawa, H., Mohri, N., Miyake, H., "Accretion of titanium carbide by electrical discharge machining with powder suspended in working fluid", *Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 25:138-144 (2001).

26. Ming, Q.Y., He, L.Y., "Powder-suspension dielectric fluid for EDM", *Journal of Materials Processing Technology* 52: 44-54 (1995).
27. Cogun, C., Özerkan, B. Karaçay, T., "An experimental investigation on effect of powder mixed dielectric on machining performance in electric discharge machining (EDM)", *Proc. Instn. of Mech. Engineers-Part B, Journal of Eng. Manuf.*, 14 (4): 202-212 (2008).
28. Zhao, W.S., Meng, Q.G., Wang, Z.L., "The application of research on powder mixed EDM in rough machining", *Journal of Materials Processing Technology*, 129: 30-33 (2002).
29. Çoğun, C., Erden, A., "A technique and its application for evaluation of materials contributions in electric discharge machining", *Int. J. of Machine Tool and Manufacture*, 30 (1):19-31 (1990).
30. Anıl, D., Coğun, C., "Performance of copper coated stereolithographic electrodes with internal cooling channels in electric discharge machining", *Rapid Prototyping Journal*, 14 (4): 202-212 (2008).
31. Cogun, C., Küçüktürk, G., "A new method for machining of electrically nonconductive workpieces using electric discharge machining technique", *Machining Science and Technology*, 14 (2):189-207 (2010).
32. DiBitonto, D.D., Eubank, P.T., Barrufet, M.A., "Theoretical models of the electrical discharge machining process. I. A simple cathode erosion model", *Journal of Applied Physics*, 66 (9): 4095-4103 (1989).

EKLER

EK-1. Yüzey pürüzlülüğü tanımları ve ölçümleri

Şekil 1.'de bir yüzey profili görülmektedir. Bu yüzey profilini, altındaki ve üstündeki alanları birbirine eşit olarak kesen çizgiye ortalama çizgisi adı verilir. Örnekleme uzunluğu (L_c), yüzey pürüzlülüğünü belirlemede önemli bir parametredir. n adet örnekleme uzunluğunun seçilmesiyle L_n şeklinde bir ölçüm uzunluğu oluşmaktadır.



Şekil 1.1. Yüzey pürüzlülüğü örnekleme ve ölçüm uzunluğu

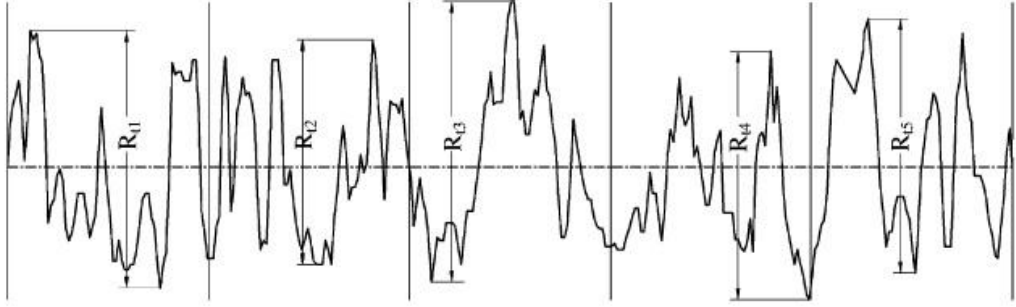
Ortalama yüzey pürüzlülüğü " R_a ", örnekleme uzunluğu boyunca, ortalama çizgisinden ölçülen yükseklik değişimlerinin mutlak değerlerinin aritmetik ortalamasıdır. Bu parametrenin tanımlanması ve ölçülmesi kolaydır ayrıca yüzey yükseklikleri hakkında iyi bir bilgi verir. Bu parametre dalga boyu hakkında bilgi vermez ve profildeki küçük değişiklikler için hassas değildir. R_a 'nın matematiksel tanımı şu şekildedir ;

$$R_a = \frac{1}{l_c} \int_0^{l_c} |y(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i|$$

Profildeki en büyük tepe-vadi yüksekliklerinin ortalaması " $R_{z(DIN)}$ ", her bir örnekleme uzunluğundaki en büyük tepe-vadi arası yüksekliği R_t şeklinde tanımlanmakta ve Şekil 1.0.1'de görüldüğü üzere $R_{z(DIN)}$, ölçüm uzunluğundaki bütün tepe ve vadi değerlerinin toplamının aritmetik ortalamasıdır.

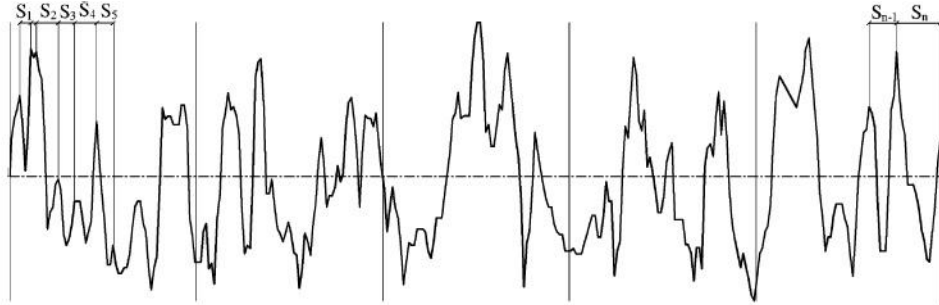
EK-1. (Devam) Yüzey pürüzlülüğü tanımları ve ölçümleri

$$R_{z(DIN)} = \frac{(R_{t1} + R_{t2} + R_{t3} + \dots \dots \dots R_{tn})}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{ti}$$



Şekil 1.1. Profildeki en yüksek tepe ve vadi noktaları

Profil tepe noktaları arasındaki uzaklıkların ortalaması "S_m", birbirini takip eden tepe noktaları arasındaki mesafelerin toplamının aritmetik ortalamasıdır.



Şekil 1.2. Tepe noktaları arasındaki mesafenin ortalaması

$$S_m = \frac{(S_1 + S_2 + S_3 + \dots \dots \dots S_n)}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i$$

EK-2. Ti-6Al-4V alaşımının özellikleri

Çizelge 2.1. Fiziksel, Mekanik, Elektriksel ve Isıl zellikleri [11]

Ti-6Al-4V (Grade 5) zellikler	
Fiziksel zellikler	
Yoğunluk	4,43 g/cm ³
Mekanik zellikler	
Sertlik, Rockwell C	36
Sertlik, Vickers	349
Maksimum ekme Dayanımı	1080 MPa [*]
Akma Sınırındaki ekme Dayanımı	1040 MPa [*]
Kopma Uzaması	% 17 [*]
Kesit Alanı Daralması	% 36
Elastisite Modülü	113,8 GPa
Basma Akma Mukavemeti	970 MPa
Maksimum Burulma Mukavemeti	1480 MPa
Poisson Oranı	0,342
entik Darbe Enerjisi	17 J
Yorulma Mukavemeti	240 MPa
Kırılma Tokluęu	75 Mpa.m ^{1/2}
Kayma modülü	44 GPa
Kayma Mukavemeti	550 MPa
Elektriksel zellikler	
Elektriksel Direnç	0,000178 ohm.cm
Manyetik Geçirgenlik	1,00005
Isıl zellikler	
Özgül Isı Sığası	0,5263 J/g°C
Isıl İletkenlik	6,7 W/mK
Ergime Noktası	1604-1660 °C
Isıl Genleřme Katsayısı 20 °C	8,6 μm/m°C
Isıl Genleřme Katsayısı 500 °C	9,7 μm/m°C

^{*} Değerler malzemenin alındığı firmanın vermiş olduğu sertifikadan alınmıştır.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı : ÜNSES, Emre
 Uyuğu : T.C.
 Doğum tarihi ve yeri : 06.05.1986 Ankara
 Medeni hali : Bekar
 Telefon : 0 (312) 210 13 10 / 12 99
 e-mail : unsesemre@yahoo.com

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Lisans	Gazi Üniversitesi / Makina Müh. Böl.	2009
Lise	Cumhuriyet Anadolu Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010 - ...	TÜBİTAK UZAY Teknolojileri Araştırma Enstitüsü	Araştırmacı
2009-2010	Drogsan A.Ş.	Teknik Bölüm Sorumlusu

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Basketbol, masa tenisi, futbol, film izlemek, katı model programları

Katıldığı Eğitimler

- CATIA Katı Modelleme Kursu, ANKARA, 2007
- Geometrik Boyutlandırma ve Toleranslandırma Eğitimi, ANKARA, 2011