

## EFFECT OF POWDER MIXED DIELECTRIC ON MACHINING PERFORMANCE IN ELECTRIC DISCHARGE MACHINING (EDM)

Bekir ÖZERKAN\*, Can ÇOĞUN  
Gazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Makina Mühendisliği Bölümü  
Maltepe 06570, Ankara  
e-mail: hbozerkan@hotmail.com

### ABSTRACT

In this study, the variations of machining performance outputs, namely, workpiece surface roughness, workpiece removal rate, electrode wear rate, relative wear, workpiece surface hardness, and workpiece surface microstructure were experimentally investigated with the varying machining parameters for metal powder mixed dielectric liquid in electrical discharge machining (EDM). The machining tests were conducted by using prismatic steel workpiece and copper electrodes with graphite and boric acid powders ( $H_3BO_3$ ) mixed kerosene dielectric at different powder concentrations and pulse time settings. The experiments have shown that the type and concentration of the powders mixed into the dielectric and the pulse time were effective on machining performance outputs in EDM.

**Key Words:** electric discharge machining, powder mixed dielectric, surface roughness, machining rate, electrode wear, surface hardness, micro structure

## ELEKTRO EROZYON İLE İŞLEMEDE TOZ KARIŞIMLI DİELEKTRİĞİN PERFORMANS ÜZERİNE ETKİLERİ

### ÖZET

Bu çalışmada, elektro erozyon ile işlemede (EEİ) metal tozu karışimli dielektrik sıvı kullanımında işparçası yüzey pürüzlülüğü, işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma, işparçası yüzey sertliği ve mikroyapısı gibi performans çıktılarının işleme parametreleri ile gösterdiği değişim deneysel olarak incelenmiştir. Bu amaçla prizmatik çelik işparçası, prizmatik bakır elektrot, borik asit ( $H_3BO_3$ ) ve grafit tozları katılmış gazyağı dielektrik kullanılarak değişik toz konsantrasyonları ve vuruş süreleri için işleme deneyleri yapılmıştır. Yapılan deneyler, vuruş süresinin ve dielektrik sıvıya karıştırılan tozların ve konsantrasyonlarının EEİ yönteminin performans çıktıları üzerinde etkili olduğu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** elektro erozyon ile işleme, toz karışimli dielektrik sıvı, yüzey pürüzlülüğü, işleme hızı, elektrot aşınması, yüzey sertliği, mikro yapı.

### 1. GİRİŞ

Alışılmamış imal usullerinden biri olan elektro erozyon ile işleme (EEİ) elektrik boşalmalarının aşındırıcı etkisini kullanarak kalıp boşluklarının oluşturulmasında kullanılmaktadır. EEİ yöntemi günümüzde karmaşık geometrilerin olduğu kadar diğer konvansiyonel yöntemlerle işlenmesi çok zor olan sert malzemelerin işlenmesini sağladığından yaygın endüstriyel uygulama alanı bulmuştur. Kalıp boşluğunun işlenebilmesi için boşluk geometrisine sahip elektrik iletken bir takım elektrodu (kısaca "elektrot") hazırlanmaktadır. EEİ teknolojisi ile pres döküm, enjeksiyon, dövme, ekstrüzyon, şişirme ve toz sıkıştırma kalıpları imal edilebilmektedir.

Bu zamanlarda yapılan bazı çalışmalarda işleme performansını artırmak için dielektrik sıvı içerisine,

### 1. INTRODUCTION

Electric Discharge Machining (EDM) is one of the non-traditional machining methods, which is used commonly to produce die cavities by the erosive effect of electrical discharges. EDM process is finding an increasing industrial application due to its ability to produce complex geometrical shapes as well as to machine hard materials that are almost impossible using conventional processes. The electrically conductive tool electrode (shortly "electrode"), which has the male shape of the die cavity, is prepared to machine the die cavity. Die casting, injection molding, forging, extrusion, upset forging and powder compaction dies are manufactured by using the EDM technology.

In some recent studies in EDM field, C, Si, SiC, Al,

çoğunlukla 100  $\mu\text{m}$ 'den küçük C, Si, SiC, Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni, Ti, Cr ve Cu gibi malzeme tozları ilave edilmiştir (toz karışımı EEİ-TK/EEİ). Bu çalışmalarda i) işleme hızının arttığı, ii) işparçası yüzey pürüzlülüğünün ve mikro çatlakların azaldığı, iii) işparçası yüzey tabaka kalınlıklarının azaldığı, iv) aşınma ve korozyon dayanımının arttığı, v) daha az gözenekli ve vi) malzeme tozları ile alaşımlanmış bir yüzey elde edildiği belirtilmiştir. TK/EEİ yönteminde, i) toz konsantrasyonun işleme süresince azalması, ii) homojen toz-dielektrik dağılımının oluşturulamaması, iii) dielektrik filtrasyonundaki ve sirkülasyonundaki zorluklar, ve iv) yüksek toz konsantrasyonlarında işleme aralığında toz yığılması/tıkaması gibi problemler mevcuttur.

Günümüzde EEİ yönteminde toz karışımı dielektrik sıvı kullanılarak yapılmış sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Burada kapsamlı bazı çalışmaların kısa sonuçları sunulacaktır. Al ve SiC tozları karıştırılmış dielektrik kullanıldığında boşalım aralığının büyüdüğü, en yüksek işparçası işleme hızının SiC tozlu çalışmada elde edildiği ve yüzey pürüzlülüğünün Al tozlu dielektrikte belirgin şekilde azaldığı görülmüştür (1). Lin, Yan ve Chang (2), elektro erozyon ve ultrasonik işleme mekanizmalarını birleştirerek gerçekleştirdikleri çalışmada işleme hızını artırmak ve boşalım enerjisinin işleme yüzeyine daha homojen dağılmasını sağlamak amacıyla, saf su ve gazyağı dielektrik sıvı içerisine 3  $\mu\text{m}$  ve 9  $\mu\text{m}$  ortalama boyutlu SiC tozlarını karıştırmışlardır. EEİ yöntemine göre toz konsantrasyonu arttıkça işleme hızının arttığını ve en yüksek işleme hızına 9  $\mu\text{m}$  boyutundaki SiC tozu karıştırılmış saf sulu çalışmada ulaştıklarını belirtmişlerdir. SiC tozunu gazyağına karıştırdıklarında, saf su kullanılan deneylere göre vuru süresi arttıkça daha iyi yüzey pürüzlülüğü elde etmişlerdir. Uno ve Okada (3, 4), Al-bronz malzemenin yapılan plastik enjeksiyon kalıpların Ni kaplanmasına ve takım çeliklerinin yüzeyinde sert TiC tabakası oluşturulmasına yönelik yaptıkları çalışmada dielektrik içerisine Ni ve C tozlarını karıştırmışlardır. Kalıpların imalatlarında yağın kullanılan SK3 karbonlu elektrot ve SKD11, SKD61 alaşımlı takım çeliklerini Si tozlu dielektrikte işlemişlerdir. Ni tozlu dielektrikte işlenen Al-bronz malzeme yüzeyinde, Ni tozu konsantrasyonunun artmasıyla krater boyutlarının azaldığını ergiyip katılaşan tabakanın kalınlığının arttığını ve bu tabakada Ni biriktiğini belirtmişlerdir. Ti elektrot ve C tozu karışımı gazyağı kullanarak yaptıkları çalışmada ise elektrot aşınmasını artırmak ve böylece TiC içeren işparçası yüzey katmanının oluşumunu kolaylaştırmak için elektrodu ters kutuplayarak sert TiC içeren yüzey katmanı elde etmişlerdir. Si tozlu dielektrikle işlenen yüzeylerin pürüzlülüğünün EEİ ile işlenen yüzeylere göre belirgin şekilde azaldığını belirtmişlerdir. Zhao ve arkadaşları (5), Cu elektrotla çelik işparçası işledikleri çalışmada 10  $\mu\text{m}$  boyutundaki Al tozlarını dielektrik sıvı içerisine karıştırmışlar ve boşalım aralığının büyüdüğünü, boşalım kanalının genişlediğini ve yüzeylerde düzgün, geniş ve sığ görünümlü kraterler oluştuğunu saptamışlardır. Ming ve He (6), gazyağına iletken ve inorganik-oksit toz karıştırıldığında, dielektrik iyonizasyon geriliminin düştüğünü, boşalım aralığının genişlediğini, ısıl gerilmelerin, mikro çatlakların azaldığını ve işlenmiş

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Ni, Ti, Cr and Cu powders (smaller than 100  $\mu\text{m}$  average size) are mixed to the dielectric (PM/EDM-powder mixed EDM) to improve machining performance. It is reported that addition of metal powders into dielectric; i) increases workpiece material removal rate, ii) results in better surface roughness and less surface cracks, iii) reduces thickness of formed surface layers, iv) increases wear and corrosion resistance of machined surface, v) reduces porosity, and vi) produces an alloyed workpiece surface layer with the mixed powders. The reported problems encountered in PM/EDM studies are; i) gradual decrease of powder concentration during machining, ii) difficulties in obtaining homogenous powder distribution in dielectric, iii) difficulties in filtration and circulation of dielectric, and iv) clogging of machining gap at high powder concentrations.

There are limited number of publications in PM/EDM field. Here, a brief summary of comprehensive works in the field is given. It is reported that addition of Al and SiC powders into dielectric increases machining gap and maximum machining rates are obtained in SiC powder mixed cases and minimum surface roughness values are reached in Al mixed cases (1) In Lin, Yan and Chang work (2), PM/EDM process is combined with ultrasonic vibration of electrode. In their work, SiC powders with 3  $\mu\text{m}$  and 9  $\mu\text{m}$  average sizes are mixed into water and kerosene dielectric in order to increase workpiece removal rate and to distribute discharge energy evenly on workpiece surface. It is found that increasing powder concentration increases the material removal rate and maximum removal rate values are obtained in SiC powder mixed water dielectric case. Better workpiece surface quality is obtained in case of SiC mixed kerosene dielectric compared to SiC mixed water dielectric at long pulse time settings. Uno and Okada (3, 4) mixed Ni powder into dielectric to coat surface of plastic injection molding dies made of Al-bronze. It is reported that increasing Ni powder concentration results in smaller crater dimensions and thicker resolidified layer alloyed with Ni. They obtained hard TiC layer on tool steel surface by using Ti electrode and C mixed kerosene dielectric under reverse electrode polarity (reverse polarity provides higher wear of Ti electrode). Zhao et. al. (5) reported that addition of Al powder with 10  $\mu\text{m}$  average size into dielectric in machining of steel workpiece with copper electrode increases machining gap, enlarges discharge column and forms evenly distributed, large diameter and shallow craters. Ming and He (6) found that mixing of conductive and inorganic-oxide powders into kerosene dielectric decreases ionization voltage of the dielectric, increases the machining gap, reduces thermal stresses and surface cracks, and increases the micro hardness of machined surface layers. Narumiya et. al (7) emphasized advantage of using Si, Al and C mixed dielectric for better flushing of machining gap since addition of the powders increases machining gap. In their work, better surface quality and higher removal rates are obtained in Al powder (0,8 $\mu\text{m}$  average size) mixed dielectric case. They also stated that higher corrosion resistance is obtained in all powder mixed experiments. Wong et. al. (8) found that mixing C, Si and MoS<sub>2</sub> powders to dielectric is more effective than mixing Al,

yüzey katmanlarında mikro sertlikte artış olduğunu tespit etmişlerdir. Narumiya ve arkadaşları (7), Si, Al, C tozlu dielektrik sıvı kullanıldığında, boşalım aralığının genişlemesi nedeniyle işleme artıklarının yüzeylerden daha iyi süpürülerek işleme hızının arttığını vurgulamışlardır. En iyi yüzey pürüzlülüğü değerine Al tozlu çalışmada (0,8µm ortalama toz boyutu) ulaşıldığını ve işleme süresinin en çok bu toz kullanımında kısaldığını ve toz karışımı bütün işlemlerde işlenen yüzeylerin korozyon dayanımının arttığını ifade etmişlerdir. Wong ve arkadaşları (8), C, Si ve MoS<sub>2</sub> tozlarının, Al, SiC ve cam tozlarına nazaran ayna görünümlü yüzeyler elde edilmesinde daha etkili olduklarını tespit etmişlerdir. Diğer bir çalışmada, EEİ yöntemi ile işlenmiş yüzeyleri daha sonra bitirme işlemi olarak Si tozlu dielektrik ile işleyerek işleme süresinin EEİ yöntemine göre kısaldığını, işlenmiş yüzeylerin pürüzlülük değerlerinde önemli oranda azalma olduğunu ve korozyon dayanımının arttığını belirtilmiştir (9). Döner disk ve ince tel şeklindeki Cu elektrotlar, Ti tozlu dielektrikte kullanılan bir çalışmada, yüzeylerde TiC alaşımı ve tozsuz işlemeye göre daha sert ve daha az pürüzlü yüzeylerin oluştuğu belirtilmiştir (10). Kruth ve arkadaşları (11), toz metalürjisi yöntemiyle imal edilmiş elektrotları ters kutuplama yapılarak işleme yapıldığında işleme yüzeylerinde %40 oranında elektrot malzemesiyle alaşımlanmış tabaka elde edildiğini ve W, Co, Mo, Mn tozlu dielektrik kullanıldığında tozların işlenmiş yüzeye %10'un üzerinde alaşımlandığını, ortalama yüzey pürüzlülüğünün (R<sub>a</sub>) 0,2 µm'nin altında olduğunu belirtmişlerdir. Her iki tip uygulamada da ters kutuplama (işparçası pozitif, elektrot negatif) gerektiği vurgulanmıştır. Tzeng ve Lee (12), Al, Cr, Cu ve SiC tozlarını kullandıkları çalışmalarında, 100 µm boyutundaki büyük tozların elektriksel boşalım aralığını büyük oranda genişlettiğini ve toz konsantrasyonu arttığında büyük toz boyutlarının elektrot aşınmasını arttırdığını, küçük boyutlu tozlarda ise işleme hızının arttığını ve elektrot aşınmasının azaldığını ifade etmişlerdir. En yüksek işleme hızına ve en düşük elektrot aşınma hızına Cr tozlu çalışmada ulaşılmıştır (12). W tozu kullanılan Masui ve arkadaşlarının çalışmasında (13) takım çeliklerinin alaşımlanan yüzey tabakasındaki W miktarının, elektrotun negatif kutuplanması ile arttığı gözlemlenmiştir. W toz karışımı dielektrik kullanımında işlenmiş yüzeyin pürüzlülüğü, sertliği, korozyon, aşınma dayanımı gibi özelliklerin önemli derecede iyileştiği görülmüştür.

### Çalışmanın amacı

Konuyla ilgili yayınlanmış çalışmalara bakıldığında işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma (hacimsel elektrot aşınmasının hacimsel işparçası işleme hızına oranı), yüzey pürüzlülüğü ve metalürjik yapı değişimi gibi temel karakteristiklerin toz kullanımı ile gösterdiği değişimin incelendiği görülmektedir. Bu çalışmalarda işleme sonrası elde edilen işparçası yüzey karakteristiklerinin (pürüzlülük, aşınma direnci, korozyon direnci, çatlaklar, vb.) ve mikroyapının, kullanılan malzeme tozlarının cinsine, ortalama boyutuna, dielektrik içindeki konsantrasyonuna, elektrot ve işparçası kutuplanması, elektrot işleme yüzey alanı, boşalım akımı ve vurum süresi gibi işleme parametrelerine bağlı olduğu

SiC and glass powders in obtaining mirror like surfaces. In other study, it is reported that use of Si powder mixed dielectric in finishing operations reduces machining time, gives better surface quality and improves corrosion resistance of the machined surface (9). In a study in which rotating disc and thin wire electrodes are in use together with Ti powder mixed dielectric, it is found that TiC alloyed layer with better surface quality and higher hardness than conventional EDM is formed (10). Kruth et. al. (11) used P/M (Powder Metallurgy Technique) electrodes in reverse polarity (+ workpiece and – electrode) in conventional EDM. 40% alloyed workpiece surface layer with the material of the electrode is obtained. The tests are repeated using W, Co, Mo, and Mn powders mixed dielectrics and it is observed that workpiece surface layer is alloyed more than 10% with the used powders. The average surface roughness (R<sub>a</sub>) obtained is lower than 0,2 µm in the powder mixed dielectric cases. In Tzeng and Lee study (12), large average size (about 100 µm) of Al, Cr, Cu and SiC powders added into dielectric. They reported that large size powders in dielectric result in larger discharge gap and use of high powder concentrations give higher electrode wear. On the contrary, use of small powder sizes result in higher removal rate and lower electrode wear. In the study, the maximum workpiece removal rate and the minimum electrode wear rate values are obtained in use of Cr powder (12). In Masui et. al. study (13), W powder mixed dielectric used in machining of tool steels and the need of reverse polarity in higher amount of alloying in resolidified surface layer with the powder is emphasized. It is also concluded that surface roughness, corrosion resistance and wear resistance of the surface improved greatly by use of W powder mixed dielectric.

### Purpose of the Study

The published research works investigated effect of powder mixed dielectric on workpiece removal rate, electrode wear rate, relative wear (ratio of volumetric electrode wear rate to volumetric workpiece removal rate), workpiece surface roughness and metallurgical structure change. It is found that surface characteristics (roughness, wear resistance, corrosion resistance, cracks, etc) and micro structure of the machined work surface depend on mixed powder properties like type, average particle size and concentration, as well as machining parameters like polarity, machining area, discharge current and pulse time. One of the important conclusions is that PM/EDM improves the surface roughness and forms a resolidified

belirtilmiştir. TK/EEİ yönteminde toz kullanımının işparçası yüzey pürüzlüğünü azalttığı, işleme esnasında yüzeylerde tozlarla alaşımlanmış yüzey katmanının oluştuğu çalışmalardan edinilen ortak sonuçlardır. Yayınlanan çalışmaların neredeyse tamamında elektrik iletken tozlar dielektrik sıvıya karıştırılmıştır. Elektrik iletken olmayan veya kötü iletken tozların TK/EEİ yönteminde kullanımı ardışık boşalmaların (Bölüm 2) oluşma olasılığının düşük olması nedeniyle yaygın değildir. Yayınlanan çalışmalarda çok kısıtlı sayıda işleme parametresi ve işleme koşulları denenmiştir. Bazı deneysel çalışmalarda işlenmiş işparçası yüzeyindeki metalurjik değişimleri gözlemek için oldukça uzun boşalım süresi ve boşalım akımı (endüstriyel uygulamalarda yaygın olmayan koşullar) kullanılmıştır. Bu çalışmanın yazarları, dielektriğe karıştırılacak değişik tozların değişik konsantrasyonlarda farklı işleme koşulları için kullanımının TK/EEİ alanında aydınlatıcı olacağına inanmaktadır.

Bu çalışmada, değişik konsantrasyonlarda grafit ile borik asit ( $H_3BO_3$ ) tozları gazyağı dielektrikle karıştırılmıştır. Literatürde bor esaslı toz karışımı dielektrik kullanan çalışma yoktur. Bilindiği üzere bor alaşımlı malzemeler çok sert ve aşınma dirençlidir. Çelik işparçası yüzeyinde borla alaşımlanacağı tahmin edilen bir yüzey tabakasının sertlik ve mukavemet özelliklerinde artış sağlayacağı umulmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada TK/EEİ sayesinde bor alaşımlamanın yüzey tabakası sertliği ve mikro yapı üzerindeki etkisi incelenmiştir.  $H_3BO_3$  tozu seçiminde etkili olan diğer hususlar; düşük maliyet, bol bulunma, bor elementinin en zengin bulunduğu bileşik olması (%56.3), küçük toz boyutlarının bulunması ve kullanılacak olan dielektrik gazyağı ile reaksiyona girmemesidir. TK/EEİ yönteminde dielektrik içinde grafit tozu kullanımının işleme performansı üzerindeki olumlu etkileri bilinmektedir. Bu çalışmada grafit tozlu deneylerden elde edilecek sonuçlar  $H_3BO_3$  tozu karışımı deneylerden elde edileceklerle karşılaştırmada faydalı olacaktır. Bu çalışmada, değişik konsantrasyonlarda grafit ile borik asit ( $H_3BO_3$ ) tozları gazyağı dielektrikle karıştırılarak 12 A boşalım akımında, 25  $\mu s$  ve 100  $\mu s$  vurum sürelerinde deneyler yapılmıştır. İşparçası yüzey pürüzlülüğü, yüzey katmanları, yüzey sertliği, mikro yapı, işleme hızı, elektrot aşınma hızı ve bağlı aşınma karakteristiklerinin değişimi incelenmiştir.

## 2. TK/EEİ YÖNTEMİNİN İŞLEME PRENSİBİ

Konvansiyonel EEİ yönteminde dielektriğin işleme bölgesinde aynı yalıtım özelliğini göstermesinden dolayı düzgün yoğunlukta bir elektrik alanı meydana gelir. Bu da kısıtlı sayıda elektrik boşalmalarına ve küçük (dar) boşalım aralığına sebebiyet verir. TK/EEİ yönteminde uygulanan çalışma geriliminin etkisi altında boşalım aralığındaki elektrik alanı bölünür. Toz tanelerinin üst ve alt kısımlarında pozitif ve negatif elektrik yükleri toplanır (Şekil 1). Toz tanesinin üst veya altı elektrik yük yoğunluğunun en yüksek olduğu yerlerdir. Birbirinin yakınında bulunan iki toz tanesinin elektrik alan yoğunluğunun en yüksek olduğu a ve b noktaları civarında ilk boşalım meydana gelir. Bu boşalımdan sonra iki toz

layer alloyed with the powder mixed into dielectric. In almost all of the published works electrically conductive powders are mixed into dielectric. The use of non-conductive or poor-conductive powders in PM/EDM studies is not common since the probability of occurrence of "series discharge" (will be explained in Section 2) is low. In the published research works very limited number of machining parameters at very small number of settings is tried. In some of the experimental studies, very long pulse time and very high discharge current settings (commonly not applicable in industrial applications) are used to observe possible metallurgical changes on the machined surface. The authors of this study believe that effects of different type and concentrations of powders in dielectric at different machining settings on machining performance will be very enlightening in PM/EDM process.

In this study, graphite and boric acid ( $H_3BO_3$ ) powders are mixed at different concentrations to kerosene dielectric. One of the main distinguishing aspects of this work to the others is the use of a non-conductive powder ( $H_3BO_3$  powder) in dielectric. There is no published work in literature using boron based powder mixed into dielectric. It is a known fact that boron based metal alloys (especially boron carbide) is very hard and wear resistant. So, if the resolidified workpiece surface layer is alloyed with boron powder, then improvements in hardness and wear resistance of the surface can easily be expected. The effect of boron alloyed surface layer produced by PM/EDM on hardness and microstructure is investigated in this study. Other reasons for choosing  $H_3BO_3$  (boric acid) powder in the study are its low cost, availability, the highest content of boron inside (56,3%) among the other boron based minerals, availability of small powder sizes, and passivity of the powder with kerosene dielectric (no reaction happens between boric acid powder and kerosene dielectric). The improvements obtained in machining performance by use of C powder in PM/EDM are known. In this study, experimental results obtained for graphite mixed dielectric will be useful in comparing the results of  $H_3BO_3$  powder mixed dielectric. Experiments will be conducted at 12 A discharge current, 25  $\mu s$  and 100  $\mu s$  pulse time and at different  $H_3BO_3$  and graphite powder concentrations. The variations in workpiece surface roughness, surface layers, surface hardness, microstructure, material removal rate, electrode wear rate and relative wear will be investigated.

## 2. MECHANISM OF MACHINING IN PM/EDM

In conventional EDM process, the homogenous insulation property of the dielectric liquid form even density electric field, and results in limited abilities of electric breakdown and small discharge gaps. In PM/EDM electrically conductive powders cause electric field aberration in the discharge gap. Due to applied gap voltage, positive and negative charges form, respectively at the top and bottom of the powders (Figure 1). The nearer the point is to the top or bottom, the higher is the electric charge density. Then at points a and b between two nearby powder, where the electric density is the highest, breakdown occur when the field density surpasses the dielectric breakdown resistance. Then the electric

tanesi arasında kısa devre meydana gelerek elektrik yüklerinin bu bölgede dağılması gerçekleşir. Bundan sonra yüksek elektrik yükü toz tanelerinin c ve d noktalarına yoğunlaşır. Bu elektrik yükü yoğunlaşması bu iki toz tanesi ile diğer toz taneleri ve elektrot ve işparçası arasında boşalım etkisinin “ardışık boşalmalar” şeklinde oluşumunu sağlar (5). Böylece TK/EEİ yönteminde elektrik boşalmaları kolaylıkla oluşur ve konvansiyonel EEİ yöntemine göre genişlemiş boşalım aralığı ortaya çıkar. Dolayısıyla dielektriğe karıştırılan tozların oluşturduğu köprü sayesinde elektrik alan yoğunluğu azalır ve tozların işleme bölgesinde bulunmasından dolayı elektriksel iletkenlik artar. Sonuçta, işleme bölgesindeki tozlar, dielektrik sıvının elektriksel yalıtkanlığının kırılmasını kolaylaştırarak vurumların bekleme süresini kısaltır ve çok sayıda küçük boşalım kıvılcımları sayesinde işparçasında daha küçük kraterler oluşturarak yüzey pürüzlülüğünde önemli oranda azalma meydana getirir (5, 8).

Dielektrik sıvıya karıştırılan tozların TK/EEİ yönteminde gerilim ve akım dalga biçimine etkisi belirgindir. Şekil 2 konvansiyonel EEİ ve TK/EEİ yöntemlerindeki farklı boşalım dalga biçimlerini göstermektedir. TK/EEİ’de tek bir boşalımdan çoklu boşalım etkisi meydana gelmektedir. Yani tek bir boşalım süresi içinde birden fazla boşalım noktaları oluşmaktadır (1).

discharge causes a short circuit between the two powder particles and redistribution of electric charges. Electric charges then accumulates at points c and d, which results in discharge between these two powders, resulting in “series of discharges” (5). Thus, electric discharge can easily occur in PM/EDM and has enlarged discharge gaps compared to conventional EDM. The widened gap, which reduce pressure of dielectric on the discharge passage and ease the widening of discharge passage, will also widen the discharge passage of PM/EDM. The widening of discharge gaps and existence of large numbers of powders in the gap reduce the initializing action of the etched scraps on electric discharge and prevent intensive discharge, resulting in evenly distributed craters on the workpiece surface. The widened discharge passage also enlarges the discharge heat area and reduces the discharge density to form large diameter and shallow craters on the surface. This results in better surface roughness of the machined workpiece surface (5, 8).

The effect of powder addition to dielectric is apparent from the voltage and current waveforms during machining in PM/EDM. Figure 2 shows different discharge waveforms for conventional EDM and PM/EDM. In PM/EDM the multiple discharging effect is created within a single input pulse. Thus, a single input pulse could generate several discharging spots (1).

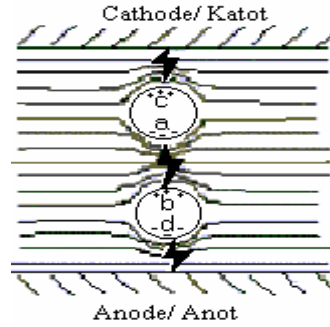


Figure 1. Schematic diagram of “series discharge”(5)

Şekil 1. “Ardışık boşalım” etkisinin şematik gösterimi (5)

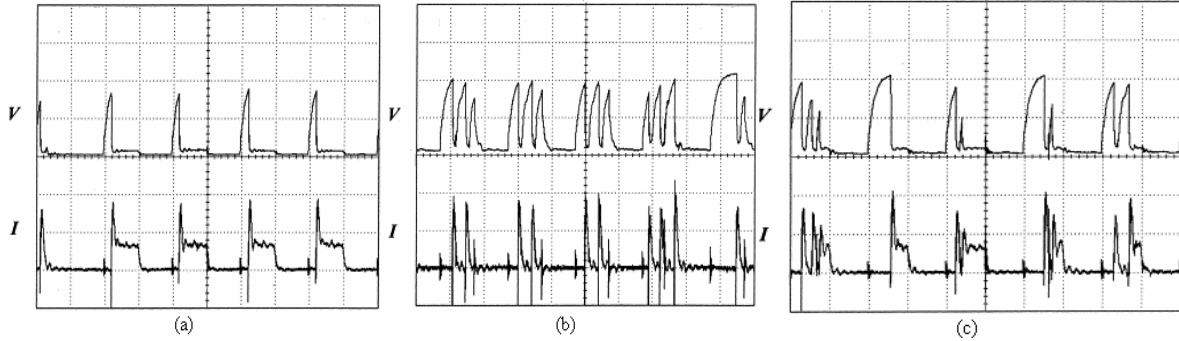


Figure 2. Typical voltage and current waveforms. (a) conventional EDM (b) SiC powder mixed dielectric, (c) Al powder mixed dielectric (1)

Şekil 2. Gerilim ve akım dalga biçimleri (a) Konvansiyonel EEİ yöntemi (b) SiC tozu karışumlu dielektrik, (c) Al tozu karışumlu dielektrik (1)

### 3. DENEYSEL YÖNTEM

#### 3.1 Elektro Erozyon Tezgahı, TK/EEİ tankı ve toz karışım sistemi

Deneyisel çalışmalarda, FURKAN marka “EDM M25A” tipi elektro erozyon tezgahı ile birlikte isopuls tipi vurum üretici kullanılmıştır.

Çalışmada kullanılan işleme sistemi şematik olarak Şekil 3’te görülmektedir. Deneyler tezgahın tankı içerisine sabitlenen, 2 mm kalınlığında 30x50x25 cm boyutlarında paslanmaz çelik saç levhalardan imal edilmiş bir işleme tankında gerçekleştirilmiştir. Dielektrik sıvı içerisine ilave edilen tozların işleme süresince süspansiyon (asılı) durumunun korunması için tankın içerisine üzerinde 2 mm çapında püskürtme delikleri bulunan 10 mm çapında bakır borular döşenmiştir. Dielektrik sıvının tank içerisindeki hareketi borunun üzerindeki deliklerden püskürtme yapılarak sağlanmıştır. İşleme tankı içerisindeki toz karışımı dielektrik sıvıyı emerek delikli bakır borulara basmak ve elektrot ile işparçası arasındaki işleme bölgesinde toz konsantrasyonunu sabit tutmak amacıyla işleme bölgesine püskürtme işlemini yapan iki ayrı 40 lt/dak debili sirkülasyon pompası kullanılmıştır (Şekil 3).

#### 3.2 Dielektrik Sıvıya Karıştırılan Tozlar

Deneylerde gazyağı dielektrik kullanılmıştır. Bir grup deneylerde ortalama toz boyutu 40,2 µm olan grafit tozu kullanılmıştır. Diğer grup deneylerde, öğütülmüş H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> tozları (ortalama 60 µm toz boyutu) gazyağı dielektriğe karıştırılmıştır. Kullanılan H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> tozunun bazı özellikleri Çizelge 1’de görülmektedir. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> tozu kötü elektrik iletken bir tozdur [14].

### 3. EXPERIMENTAL METHOD

#### 3.1 Machine Tool, Self-made PM/EDM Machining Tank and Powder Mixing System

The electric discharge machine used in this investigation was the FURKAN EDM M25 Model die sinking machine with EDM25A isopulse type generator.

The schematic drawing of the used PM/EDM is shown in Figure 3. Experiments were conducted in a self-made machining tank with 30x50x25 cm dimensions made of 2 mm thick stainless steel sheets. The tank was mounted into the original machining tank of the machine tool. In order to obtain even and homogenous distribution of powders (in suspension form) in dielectric during machining, a flush mixing was provided in the tank by means of 10 mm diameter copper pipe with 2 mm diameter holes on it. The PM (powder mixed) dielectric sucked from bottom level of the tank by means of a pump (flow rate of 40 l/min) was pumped into the copper pipe. The PM dielectric went out of the holes at high velocity provided homogenous PM dielectric circulation in the self-made machining tank. Another pump sucked the PM dielectric from the bottom level of the tank and flushed it towards the machining gap directly (i.e. “side flushing”).

#### 3.2 Powders Mixed into the Dielectric

Kerosene dielectric was used in the experiments. In one group of experiments, graphite powder with 40,2 µm average particle size was mixed into kerosene dielectric. In the other group of experiments, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> powder with 60 µm average particle size was mixed into the dielectric. Some properties of the H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> powder is given in Table 1. H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> powder has a poor electrical conductivity [14].

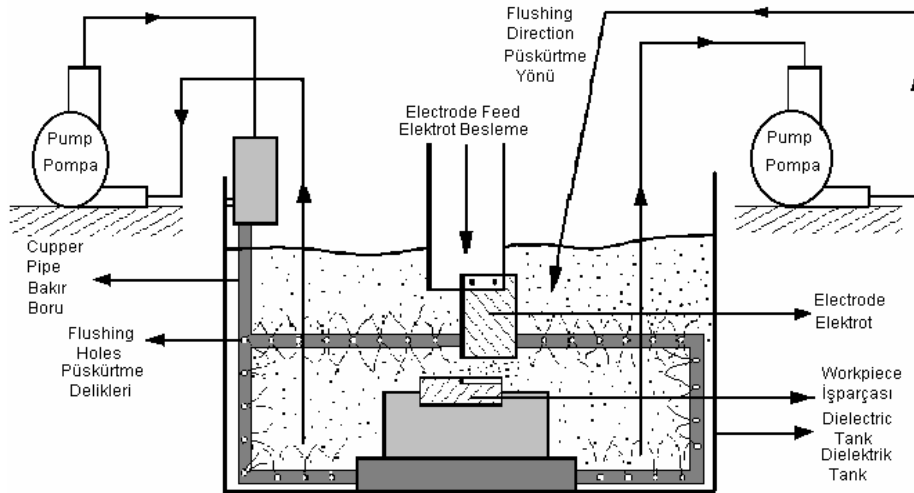


Figure 3. Schematic drawing of the PM/EDM system used in the experiments  
Şekil 3. Deneylerde kullanılan toz karışımı işleme sistemi

**Table 1.** Some properties of  $H_3BO_3$  powder (14)  
**Tablo 1.**  $H_3BO_3$  tozunun bazı özellikleri (14)

Chemical formula / Kimyasal formül	$H_3BO_3$
Melting point / Ergime noktası	2190+20°C
Boiling point / Kaynama noktası	3660°C
Knoop hardness / Knoop sertliği	2100-2580
Electrical conductivity/ Elektriksel iletkenlik	$10^8$ ohm/m
Vickers hardness / Vickers sertliği	5000 HV

### 3.3 Deneylerde Kullanılan İşparçası ve Elektrotlar

Deneylerde işparçası malzemesi olarak SAE 1040 çeliği kullanılmıştır. Lama şeklindeki işparçası malzemesi  $46 \times 52 \times 10$  mm ölçülerinde kesildikten sonra frezelenerek  $45,05 \times 50,5 \times 9,5$  mm ölçülerine getirilmiştir. Daha sonra bütün yüzeyler taşlanarak  $45 \times 50 \times 9$  mm'lik ölçüler elde edilmiştir.

Elektrotlar  $10 \times 38 \times 27$  mm boyutlarında kesildikten sonra  $10 \times 38$  mm boyutundaki her iki yüzeyi frezede işlenmiş ve elektrot boyu 25 mm'ye indirilmiştir (Şekil 4). Daha sonra ince zımpara kullanılarak işleme yüzey alanı parlatılmıştır.

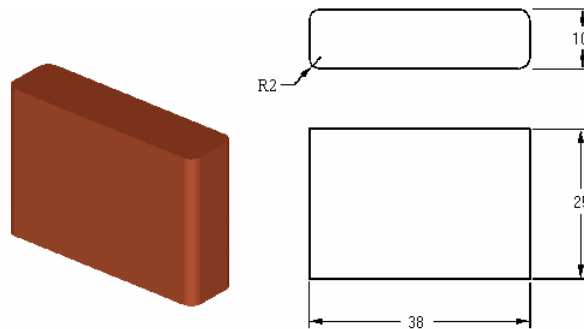
Bütün deneylerde toplam işleme derinliği  $0,5 \pm 0,05$  mm ve işleme alanı  $9 \times 37$  mm olacak şekilde işleme yapılmıştır. Deneylerde yanal püskürtme uygulanmıştır (Şekil 5). Dikdörtgen şeklinde bir yüzeyin işlenmesinde sebep düzgün bir püskürtmenin sağlanabilmesi, işleme sonrasında yüzey pürüzlülük ölçümlerinin ve mikro yapı incelemelerinin kolaylığı açısındandır.

### 3.3 Workpieces and Electrodes used in the Experiments

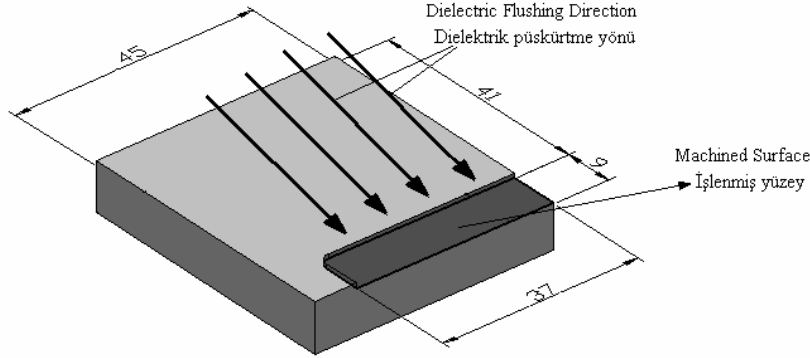
As workpiece material, SAE 1040 steel was used. Workpieces were cut from a  $52 \times 10$  mm cross-section bar at 46 mm length. All surfaces were milled and ground. Final dimensions of the workpiece specimens were  $45 \times 50 \times 9$  mm.

Electrodes used in the experiments were in rectangular prism shape and made of electrolytic copper. Electrodes were cut from  $38 \times 10$  mm cross-section copper bar at 27 mm length. Two surfaces, with  $38 \times 10$  mm dimensions were milled and specimen length was reduced to 25 mm (Figure 4). The surface with  $38 \times 10$  mm dimensions was polished. Densities of the electrolytic copper electrodes and 1040 steel workpiece specimens used in the experiments are  $8,9 \text{ g/cm}^3$  and  $9 \text{ g/cm}^3$ , respectively.

The machined workpiece surface dimensions were  $9 \times 37$  mm with  $0,5 \pm 0,05$  mm depth of penetration. Side flushing was applied in all experiments (Figure 5). Main purposes of producing rectangular machined surface on workpiece was to provide even flushing conditions, easier surface roughness measurements and microstructure analysis on it.



**Figure 4.** Electrode used in the experiments  
**Şekil 4.** Deneylerde kullanılan elektrot



**Figure 5.** A machined workpiece and application of dielectric  
**Şekil 5.** İşlenmiş işparçasının görünümü ve dielektrik uygulaması

### 3.4 İşleme Parametreleri ve Deneysel Tasarım

Deneylerde, vurum süresi ( $t_i$ ), toz cinsi ve konsantrasyonu ( $C_d$ ) değişken parametrelerdir. Boşalım akımı ( $i_c$ ), bekleme süresi ( $t_o$ ), gazyağı dielektrik sıvı, işparçası-elektrot malzemeleri ve kutuplama bütün deneylerde sabit tutulmuştur. İşleme esnasında toz karışımı dielektriğin işleme aralığına girişini kolaylaştırmak ve homojen püskürtme dağılımı sağlamak için her 13 s'de bir elektrot 0,1 s geri (yukarı) çekilmiştir. Çalışmada toplam 14 farklı işleme koşulu denenmiştir. Her deney iki kere tekrar edilmiş ve iki deney sonucunun ortalaması kullanılmıştır. Deneylerde kullanılan işleme parametreleri ve deney tasarımı Çizelge 2 ve 3'te verilmiştir.

### 3.4 Machining Parameters and Experimental Design

In the experiments, pulse time ( $t_i$ ), powder type and its concentration ( $C_d$ ) were the varying parameters. Discharge current ( $i_c$ ), pause time ( $t_o$ ), dielectric liquid (kerosene), machining polarity were kept constant through the experiments. In order to provide even PM dielectric flushing distribution, the electrode was retracted for 0.1 s for machining time of 13 s. In this study, totally 14 different machining conditions were tested. Every experiment was repeated twice and average of two measurements was used. Summary of experimental parameters and experimental design were given in Table 2 and 3.

**Table 2.** Experimental Parameters

**Tablo 2.** Deneysel parametreleri

Machining Parameters / Deneysel Parametreleri	Settings / Değerler
Discharge Current /Boşalım Akımı ( $i_c$ ) [A]	12
Pulse Time/ Vurum Süresi ( $t_i$ ) [ $\mu$ s]	25, 100
Dielectric Application Method/ Dielektrik Sıvı Uygulama Yöntemi	Side Flushing /Yanal püskürtme
Powder Concentration /Toz Konsantrasyonu ( $C_d$ ) [g/l]	5, 10, 15
Machining Time/ Çalışma Süresi [s]	13
Retraction time/ Geri Çekme [s]	0,1
Polarity /Kutuplama	Electrode (+), Workpiece (-) Elektrot (+), İşparçası (-)
Pause Time/Bekleme Süresi ( $t_o$ ) [ $\mu$ s]	12,5
Dielectric Type/ Dielektrik Sıvı	Kerosene/ Gazyağı
Workpiece Material /İşparçası Malzemesi	SAE 1040 Steel/ Çeliği
Electrode Material /Elektrot Malzemesi	Electrolytic Copper/ Elektrolitik Bakır
Machining Depth /İşleme Derinliği [mm]	0,5



**Table 3.** Experimental Design  
**Tablo 3.** Deneysel tasarım

$i_c$ [A]	Powder Kullanılan Toz	$C_d$ [g/l]	$t_i$ [ $\mu$ s]
12	No powder (pure kerosene)/ Saf Gazyağı	0	25
12	No powder (pure kerosene)/ Saf Gazyağı	0	100
12	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	5	25
12	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10	25
12	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	15	25
12	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	5	100
12	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	10	100
12	H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	15	100
12	Graphite/ Grafit	5	25
12	Graphite/ Grafit	10	25
12	Graphite/ Grafit	15	25
12	Graphite/ Grafit	5	100
12	Graphite/ Grafit	10	100
12	Graphite/ Grafit	15	100

### 3.5 $V_w$ , $V_E$ ve $\nu$ Değerlerinin Bulunması

Elektrot aşınması genelde elektrot aşınma hızı ( $V_E$ ) ve bağıl aşınma ( $\nu$ ) ile ifade edilir:

$$V_E [\text{mm}^3/\text{dak}] = (\text{hacimsel elektrot aşınma miktarı}) / t_m \quad (1)$$

$$V_W [\text{mm}^3/\text{dak}] = (\text{hacimsel işparçası işleme miktarı}) / t_m \quad (2)$$

$$\nu [\%] = (V_E/V_W) \times 100 \quad (3)$$

Burada  $t_m$  işleme süresi,  $V_W$  işparçası işleme hızıdır. Numunelerdeki ağırlık kaybı ilk ve son (işleme sonrası) ağırlıkların BEL 330 tipi dijital terazi (0.001 g hassasiyet) ölçülmesi ile hesaplanmıştır. Hacimsel işleme ve aşınma hızları ağırlık değerlerinin numunelerin yoğunluğuna bölünmesi ile elde edilmiştir. Kronometre ile ölçülen  $t_m$  değerleri  $V_W$ ,  $V_E$  ve  $\nu$  değerlerinin bulunmasında kullanılmıştır (eşitlik 1-3).

### 3.6 Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümleri

İşparçası yüzey pürüzlülüğü ölçümleri, Rank Taylor-Hobson Surtronic 3+ HB-103 tipi detektör uçlu portatif yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile yapılmıştır. Ölçümlerde örnekleme uzunluğu ve ölçüm uzunluğu standart tablolardan 0,8 mm ve 4 mm olarak seçilmiştir.  $R_a$ ,  $R_z$ (DIN) ve  $S_m$  yüzey pürüzlülüğü parametreleri kaydedilmiştir. İşparçasının işlenmiş yüzeyinde on farklı noktadan dielektrik sıvı püskürtme doğrultusunda pürüzlülük ölçümleri yapılmıştır. Çalışmada alınan ölçümlerin ortalaması kullanılmıştır. Geliştirilen bir yazılım yardımıyla her numune için yüzey pürüzlülüğü karakteristikleri grafiksel çıktı olarak elde edilmiştir.

### 3.7 Mikroyapı ve Yüzey Profili İncelemesi

Mikroyapı ve yüzey profili incelemeleri Olympus marka

### 3.5 Determination of $V_w$ , $V_E$ and $\nu$

Electrode wear is generally expressed by means of electrode wear rate ( $V_E$ ) and relative wear ( $\nu$ ) terms:

$$V_E [\text{mm}^3/\text{min}] = (\text{volumetric removal from electrode}) / t_m \quad (1)$$

$$V_W [\text{mm}^3/\text{min}] = (\text{volumetric removal from the workpiece}) / t_m \quad (2)$$

$$\nu [\%] = (V_E/V_W) \times 100 \quad (3)$$

Here,  $t_m$  is the machining time and  $V_W$  is the workpiece removal rate. Weight loss of the specimens were calculated by weighing initial and final (after machining) weights of the workpieces and electrodes by using BEL 330 type digital scale with 0.001 g accuracy. The volumetric removal rate was calculated by dividing the weight loss to the density of the specimen. The  $t_m$  measured by a stopwatch were used to calculate  $V_W$ ,  $V_E$  and  $\nu$  values (equation 1-3).

### 3.6 Surface Roughness Measurements

Workpiece surface roughness measurements were performed by using portable Rank Taylor-Hobson Surtronic 3+ HB-103 stylus tracing instrument. Cut-off and evaluation length were selected from standard tables as 0.8 mm and 4 mm, respectively.  $R_a$ ,  $R_z$ (DIN) and  $S_m$  surface roughness measurement parameters were recorded. Measurements were taken from ten different locations parallel to the dielectric flushing direction on machined workpiece surface. Average of the ten measurements was used in the study. Surface profile of every measurement was also output by means of a software which is interfaced to the instrument.

### 3.7 Microstructure and Micro Surface Profile Analysis

Microstructure and micro surface analysis were done by

dijital kamera donanımlı optik mikroskop ile gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesinde, bakelite gömülmüş ve parlatılmış işparçaları %2'lik Nital çözeltisi ile dağlanmıştır. 400 kat büyütme ile önceden belirlenen noktalardan mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir.

### 3.8 İşlenmiş Yüzeylerin Sertlik Ölçümü

İşlenmiş yüzeylerin Rockwell (HRA, HRB, HRC), Brinell (HB) ve Vickers (HV) sertlik skalalarında ölçümleri IMPACT TH-130 marka dijital göstergeli ölçüm cihazı ile gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan değerler işlenmiş yüzeylerin sertliğinin ölçüldüğü beş farklı nokta değerinin ortalamasıdır.

## 4. DENEY SONUÇLARI VE TARTIŞMA

### 4.1 $V_W$ , $V_E$ ve $\upsilon$ Değerlerinin $t_i$ ve $C_d$ ile Değişimi

Şekil 6, grafit tozu karışımli deneylerde toz konsantrasyonun ( $C_d$ ) ve vurum süresinin ( $t_i$ ) artmasıyla daha yüksek işparçası işleme hızı ( $V_W$ ) değerlerine ulaşıldığını göstermektedir. Grafit tozlu deneylerde gerek saf gazyağı gerekse  $H_3BO_3$  tozlu deneylere göre çok yüksek  $V_W$  değerlerine ulaşılmıştır.  $C_d$  artışıyla  $V_W$  değerlerindeki artış, Bölüm 2'de bahsedildiği üzere dielektrik sıvıdaki artan grafit tozu konsantrasyonu ile işleme bölgesindeki toz tanelerinin boşalım aralığında birçok yerde boşalım köprüsü oluşturarak EEİ yöntemine göre daha çok iletkenlik sağlaması ve böylelikle işparçası ile elektrot arasındaki boşalım enerjisinin daha etkili bir şekilde işleme bölgesine dağılmasındandır.  $H_3BO_3$  tozu kullanıldığında  $V_W$  değerlerinde saf gazyağı kullanımına göre belirgin bir artış olmamasının nedeni bu tozların elektrik iletkenliğinin kötü olmasıdır. Her iki cins tozda  $V_W$  değerlerinin  $t_i$  değerleriyle artışının sebebi, artan  $t_i$  değerinin boşalım kanalını büyütmesi sonucunda birim zamanda işparçası yüzeyinden daha büyük miktarlarda malzemenin ergiyip buharlaşmasındandır.

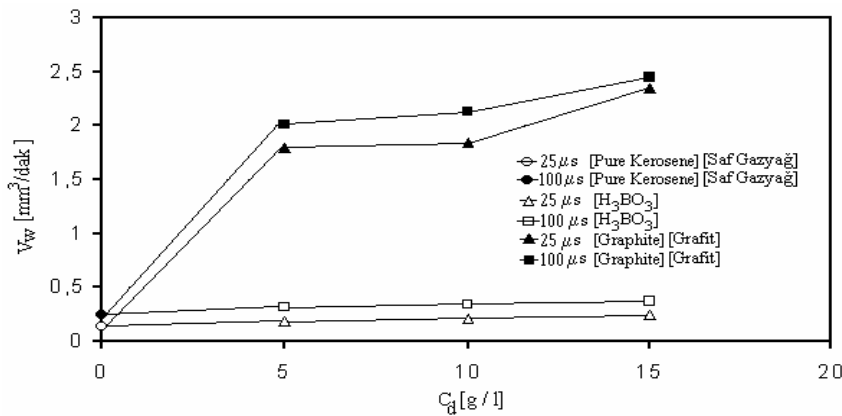


Figure 6. Variation of  $V_W$  with  $t_i$  and  $C_d$ .

Şekil 6.  $V_W$  değerinin  $t_i$  ve  $C_d$  ile değişimi.

Şekil 7'de görüldüğü gibi grafit tozlu deneylerde elektrot aşınma hızı ( $V_E$ ) artan  $C_d$  için her iki  $t_i$  değerinde, saf gazyağı ve  $H_3BO_3$  tozlu deneylere göre belirgin bir artış göstermiştir. Bunun sebebi grafit tozu sayesinde

means of Olympus optical microscope with equipped with digital camera. For microstructure analysis, workpiece specimens placed in bakelite were first polished and then etched in acid solution with 2% concentration. Microstructure photographs were taken with 400 magnification at predetermined locations.

### 3.8 Hardness Measurement of Machined Workpiece Surfaces

Rockwell (HRA, HRB and HRC), Brinell (HB) and Vickers (HV) hardness scale measurements of machined workpiece surfaces were performed by using IMPACT TH-130 instrument equipped with digital screen. Hardness values used in the study are average of five measurements taken from different spots on every workpiece surface.

## 4. EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

### 4.1 Variation of $V_W$ , $V_E$ and $\upsilon$ with $t_i$ and $C_d$

Figure 6 shows that increasing graphite powder concentration ( $C_d$ ) and pulse time ( $t_i$ ) increases workpiece removal rate ( $V_W$ ). The use of graphite powder gives much higher  $V_W$  values compared to pure kerosene and  $H_3BO_3$  mixed dielectric cases. The increase in  $V_W$  with increasing graphite  $C_d$  is mainly due to increasing conductivity of the dielectric in the machining gap which results in "series discharge" effect as well as even distribution of discharge energy in the gap as mentioned earlier in Section 2. In use of dielectric mixed with  $H_3BO_3$  powder, a slight increase in  $V_W$  values compared to pure kerosene dielectric is observed. The reason for the insignificant change in  $V_W$  value compared to graphite powder mixed dielectric is the poor conductivity of the  $H_3BO_3$  powder with respect to graphite powder. For both type of powders, increasing pulse time  $t_i$  increases  $V_W$ . It is a known fact that longer duration discharges (i.e. pulses) result in higher amount of material removal from the formed molten craters on work surface in unit time.

As shown in Figure 7, use of graphite powder results in significant increase in electrode wear rate ( $V_E$ ) with increasing  $C_d$  (at both  $t_i$  settings) compared to pure kerosene and  $H_3BO_3$  mixed dielectric cases. Higher

işleme bölgesinde dielektrik sıvı iletkenliğinin artması ile elektrot malzemesine daha fazla boşalım enerjisinin iletilmesidir.  $H_3BO_3$  tozlu deneylerde  $V_E$ 'nin saf gazyağına göre belirgin bir değişim göstermemesinin nedeni daha önceden açıklandığı üzere  $H_3BO_3$  tozlarının işleme bölgesinde kötü elektrik iletim özelliği göstermesidir. Saf gazyağı ve toz karışımı gazyağı ile yapılan deneylerde  $V_E$  değerinin uzun  $t_i$  değerlerinde azalmasının nedenleri; uzun vuruş sürelerinde boşalım kanalının akım yoğunluğunun azalması, uygulanan boşalım ısı enerjisinin büyük bir kısmının elektrot gövdesine iletilmesi için yeterince uzun süre olması (kraterlerden daha az malzeme kopmasına sebebiyet verir) ve uzun süreden dolayı elektrot yüzeyine yapışan karbonun elektrodun aşınma direncini artırmasıdır.

Şekil 7 incelendiğinde saf gazyağı ile yapılan deneylere göre toz karışımı deneylerde düşük  $t_i$  değerlerinde daha düşük bağıl aşınma  $\nu$  değerleri elde edilmiştir. Grafit tozlu çalışmada  $t_i$  artışı ile birlikte saf gazyağı ile yapılan deneylere göre  $V_E$  değerinin artmasından dolayı  $\nu$  değerinde de belirgin bir artış gözlenmiştir. Buna karşılık  $t_i=100 \mu s$  için  $H_3BO_3$  tozlu çalışmada saf gazyağı ile elde edilen sonuçlara yakın değerler elde edilmiştir.

conductivity of the dielectric with increasing amount of graphite causes intense discharges in the gap causing increase in  $V_E$ . Insignificant increase in  $V_E$  with increasing  $C_d$  of  $H_3BO_3$  powder is due to poor powder conductivity as explained before. It is evident from the figure that increasing  $t_i$  decreases  $V_E$  in all experiments. Possible reasons for low  $V_E$  at long  $t_i$  settings for pure and powders mixed kerosene are; decreasing spatial current density of the discharge channel with increasing discharge duration, longer time for heat transfer from the molten crater to the body of the electrode (results in less material removal from the crater) and higher wear resistance of the electrode due to the carbon attached to the surface.

Experiments conducted by using the powders result in lower relative wear  $\nu$  than pure kerosene cases at low  $t_i$  values (Figure 8). In comparison to pure kerosene case, increasing  $V_E$  values with increasing  $t_i$  cause increase in  $\nu$  (equation 3) in use of graphite powder. However, for  $t_i=100 \mu s$  setting, pure kerosene and  $H_3BO_3$  powder mixed cases give close  $\nu$  values.

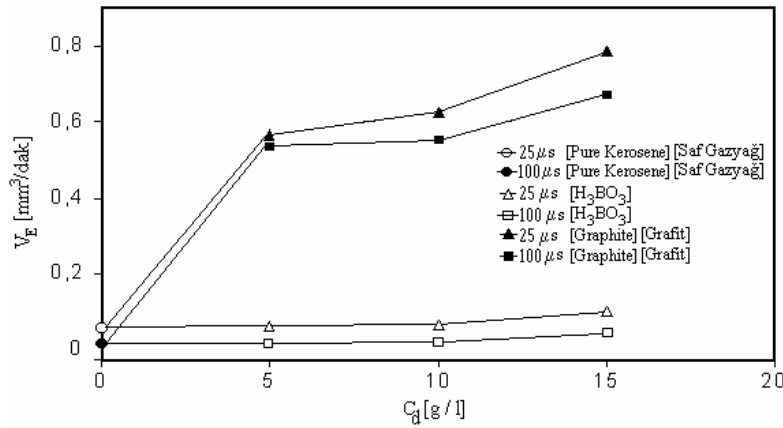


Figure 7. Variation of  $V_E$  with  $t_i$  and  $C_d$ .

Şekil 7.  $V_E$  değerinin  $t_i$  ve  $C_d$  ile değişimi.

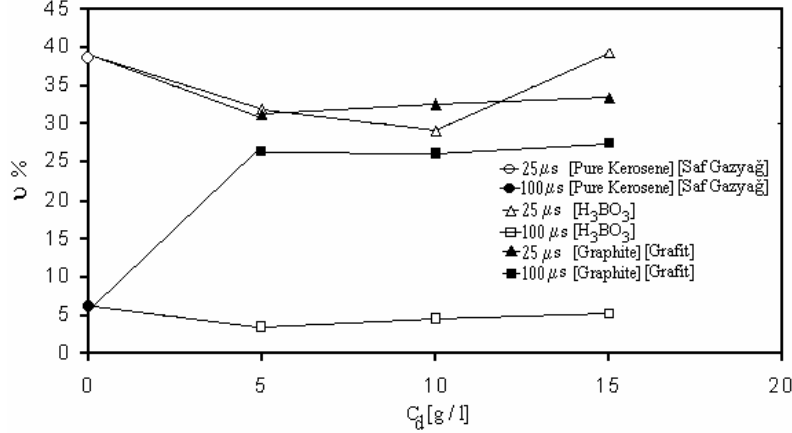


Figure 8. Variation of  $\nu$  with  $t_i$  and  $C_d$

Şekil 8.  $\nu$  değerinin  $t_i$  ve  $C_d$  ile değişimi

#### 4.2 Yüzey Pürüzlülüğünün $t_i$ ve $C_d$ ile Değişimi

##### 4.2.1 $R_a$ , $R_z$ (DIN) ve $S_m$ pürüzlülük parametrelerinin $t_i$ ve $C_d$ ile değişimi

Grafit tozları için  $C_d$  artışı ile  $R_a$  değerlerinin azaldığı görülmektedir (Şekil 9). Şekilden  $H_3BO_3$  tozlu deneylerde artan  $C_d$  değeri için  $R_a$  değerinde hafif bir azalma görülmektedir.  $R_a$  pürüzlülük parametresi ile ilgili bilgi Ek 1.1'de verilmiştir. Bu durum, yüksek grafit toz konsantrasyonunda oluşan kıvılcıkların yüzeyde daha geniş çaplı ısı boşalımı alanı ve bunun sonucunda daha sığ kraterler oluşturmasındandır (Bölüm 2). Yapılan  $R_a$  ölçümleri grafit tozlu deneylerde  $H_3BO_3$  tozlu ve saf gazyağı ile yapılan deneylere göre oldukça iyi yüzey kalitesi elde edildiğini göstermiştir.  $H_3BO_3$  tozlu deneylerde elde edilen  $R_a$  değerleri saf gazyağı ile yapılan deneylerdekine oldukça yakındır. Diğer bir deyişle dielektriğe  $H_3BO_3$  tozu ilavesi  $R_a$  değerlerinde belirgin bir iyileştirme yapmamıştır. Deneylerde en düşük  $R_a$  değeri,  $t_i=25 \mu s$  ve  $C_d=15 g/l$  ayarlarında grafit tozunda  $0,96 \mu m$  olarak elde edilmiştir. En kötü  $R_a$  değeri,  $t_i=100 \mu s$  ve  $C_d=5 g/l$  ayarlarında  $H_3BO_3$  tozunda  $6,94 \mu m$  olarak elde edilmiştir.

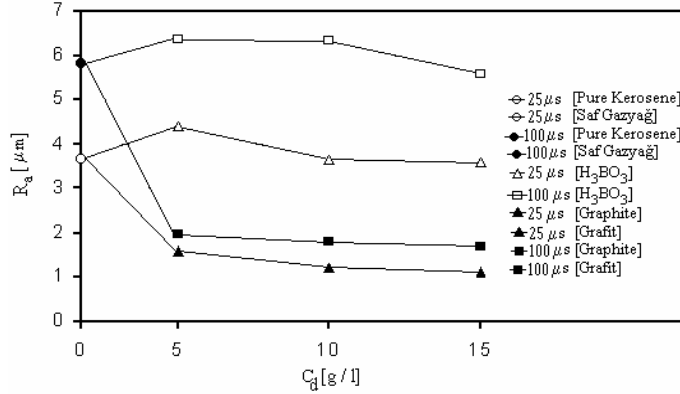


Figure 9. Variation of  $R_a$  with  $t_i$  and  $C_d$   
Şekil 9.  $R_a$ 'nın  $t_i$  ve  $C_d$  ile değişimi

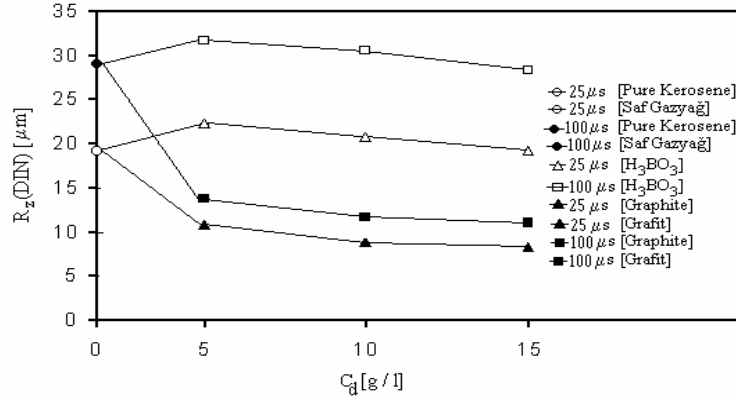
Kullanılan isopuls tipi vurum üreticinin boşalım vurumlarının aynı enerjiye sahip olduğu ve dolayısıyla krater büyüklüklerinin de birbirlerine oldukça yakın olduğu bilinmektedir. Bu gerçek, çalışma sırasında yapılan optik mikroskop incelemeler ile de teyit edilmiştir. Bu durum gözönüne alındığında, bir kraterin tepe noktası ile dip noktası arasındaki yükseklik o kraterin derinliği olarak düşünülürse  $R_z$ (DIN) pürüzlülük parametresi ( $R_z$ (DIN) pürüzlülük parametresi ile ilgili bilgi Ek 1.2'de verilmiştir) ortalama krater yüksekliği hakkında bilgi verecektir. Şekil 10'de  $C_d$  değerinin artırılması ile her iki toz için  $25 \mu s$  ve  $100 \mu s$  vurum sürelerinde ortalama krater derinliği yani  $R_z$ (DIN) değeri azalmaktadır. Grafit tozu kullanılan deneylerde  $H_3BO_3$  tozu kullanılan deneylere göre daha küçük  $R_z$ (DIN) değerleri elde edilmiştir. Grafit tozlu deneylerde saf gazyağı ile yapılan deneylere göre  $R_z$ (DIN) değerlerinde belirgin bir küçülme görülmüştür.  $H_3BO_3$  tozlu deneylerle saf gazyağı ile yapılan deneyler arasında  $R_z$ (DIN) değerlerinde belirgin bir değişim görülmemiştir.

#### 4.2 Variation of Surface Roughness with $t_i$ and $C_d$

##### 4.2.1 Variation of $R_a$ , $R_z$ (DIN) and $S_m$ roughness parameters with $t_i$ and $C_d$

The increase in  $C_d$  reduces average surface roughness  $R_a$  for graphite powder (Figure 9). Figure also shows that a slight decrease in  $R_a$  with increasing  $C_d$  is observed for  $H_3BO_3$  powder. Information about  $R_a$  roughness parameter is given in Appendix 1.1. Improvement in surface roughness with increasing graphite powder concentration can be explained by enlarged discharge heat area which results reduction in discharge density to form large diameter and shallow craters on the surface (Section 2). Experimental results indicate that graphite powder mixing into dielectric gives lower  $R_a$  values than pure kerosene and  $H_3BO_3$  powder mixed cases. Addition of  $H_3BO_3$  powder into kerosene does not provide significant improvement in  $R_a$  values. The minimum  $R_a$  value obtained in the experiments is  $0,96 \mu m$  in graphite powder case with  $t_i=25 \mu s$  and  $C_d=15 g/l$  settings. The maximum value is  $6,94 \mu m$  in  $H_3BO_3$  powder case with  $t_i=100 \mu s$  and  $C_d=5 g/l$  settings.

The isopulse type generator used in this study generates equal discharge duration (and energy) discharges which result in almost identical size of craters on machined workpiece surface. This fact is also confirmed by optical microscope investigations conducted in the study. Since the machined surface is formed by overlapping craters,  $R_z$ (DIN) roughness measurement (information about  $R_z$ (DIN) roughness parameter is given in Appendix 1.2) is expected to provide information about average depth of craters. Here, depth of a crater is defined as distance between peak-to-valley height of coinciding craters. As shown in Figure 10, increase in  $C_d$  reduces  $R_z$ (DIN) (i.e. average crater depth) for graphite powder and a slight decrease in  $R_z$ (DIN) is observed for  $H_3BO_3$  powder case. Experimental results indicate that graphite powder mixing into dielectric gives much lower  $R_z$ (DIN) values than pure kerosene and  $H_3BO_3$  powder cases. Addition of  $H_3BO_3$  powder into kerosene does not provide improvement in  $R_z$ (DIN) values.



**Figure 10.** Variation of  $R_z(\text{DIN})$  with  $t_i$  and  $C_d$   
**Şekil 10.**  $R_z(\text{DIN})$  değerinin  $t_i$  ve  $C_d$  ile değişimi

$S_m$  pürüzlülük parametresinin, yüzey profilindeki ardışık tepe noktaları arasındaki uzaklıkların ortalaması olduğu bilindiğinden (Ek 1.3), bu parametre ortalama krater çapına eşdeğer olarak düşünülmüştür. Burada krater çapı birbiriyle çakışmış kraterlerin tepeleri arasındaki uzaklık olarak tanımlanmıştır. Şekil 11’de, her iki toz için  $C_d$  değerinin artırılması ile  $S_m$  değerinin (ortalama krater çapının) azaldığı görülmektedir. Grafit tozlu deneylerde elde edilen  $R_z(\text{DIN})$  ve  $S_m$  değerlerinin saf gazyağı ve  $\text{H}_3\text{BO}_3$  tozu ile yapılan deneylerden daha küçük olduğu görülmektedir.  $\text{H}_3\text{BO}_3$  tozlu çalışmada  $C_d=5$  g/l için  $S_m$  değerlerinin saf gazyağına göre biraz yüksek olduğu ancak  $C_d$ ’nin artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün saf gazyağı ile yapılan çalışmadaki aynı değerlere yaklaştığı görülmektedir.  $\text{H}_3\text{BO}_3$  tozu ilavesi özellikle yüksek  $t_i$  değerleri için  $S_m$  değerlerinde iyileştirme (küçültme) sağlamaktadır.

Deneyler az miktarda bir grafit tozu ilavesinin  $R_a$ ,  $R_z(\text{DIN})$ ,  $S_m$  pürüzlülük parametrelerinde çok belirgin bir iyileştirme sağladığını (krater çapının ve derinliğinin azalması) göstermiştir. Yapılan daha fazla grafit ilavesi yüzey pürüzlülük parametrelerini daha yavaş iyileştirmektedir. Deneylerde, grafit tozunun düşük  $t_i$  ve yüksek  $C_d$  değerlerinde elde edilen  $R_a$ ,  $R_z(\text{DIN})$ ,  $S_m$  pürüzlülük parametrelerinin en düşük olduğu görülmüştür.  $\text{H}_3\text{BO}_3$  tozlu çalışmalarda ise düşük  $t_i$  ve yüksek  $C_d$  değerlerinde yüzey pürüzlülük parametrelerinin saf gazyağı ile elde edilenlere yakın olduğu görülmüştür. Şekil 12’de pürüzlülük ölçümleri yapılan yüzeylerden bazılarının yüzey profil fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraf incelemeleri yüzeylerde oluşan kraterlerin, grafit tozlu çalışmada her iki vuruş süresinde de saf gazyağı ve  $\text{H}_3\text{BO}_3$  tozlu çalışmalara nazaran daha küçük olduğunu göstermiştir.

$S_m$  roughness measurements (information about  $S_m$  roughness parameter is given in Appendix 1.3) are expected to provide information about average diameter of craters. Here, diameter of a crater is defined as distance between peak-to-peak distance of coinciding craters on a surface profile. As shown in Figure 11, the increase in  $C_d$  reduces  $S_m$  (i.e. average crater diameter) for graphite powder and for  $\text{H}_3\text{BO}_3$  powder cases. Also, graphite powder mixing into dielectric gives much lower  $S_m$  values than pure kerosene and  $\text{H}_3\text{BO}_3$  powder cases. Addition of  $\text{H}_3\text{BO}_3$  powder provide improvement in  $S_m$  values especially at high  $t_i$  settings compared to pure kerosene case.

$R_a$ ,  $R_z(\text{DIN})$  and  $S_m$  measurements indicate that addition of small amount of graphite powder into dielectric improves surface roughness parameters (reducing diameter and depth of the craters) drastically. Further addition of graphite powder into dielectric reduces surface roughness parameters at a slower rate. In the experiments with graphite powder, minimum  $R_a$ ,  $R_z(\text{DIN})$  and  $S_m$  values are obtained at high  $C_d$  and low  $t_i$  values. In pure kerosene and  $\text{H}_3\text{BO}_3$  powder mixed cases, the  $R_a$ ,  $R_z(\text{DIN})$  and  $S_m$  values are close especially at high  $C_d$  and low  $t_i$  values. In Figure 12, photographs of sample machined surfaces are given. Photographs confirm that size of craters in graphite powder mixed dielectric case are smaller than the craters for both  $t_i$  settings in pure kerosene and  $\text{H}_3\text{BO}_3$  powder mixed dielectric cases.

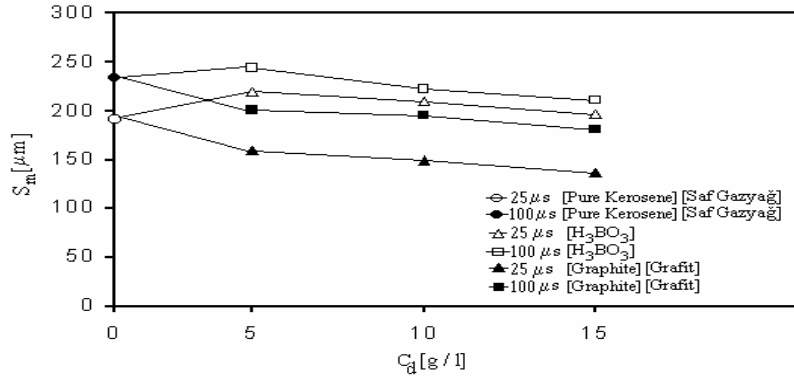


Figure 11. Variation of  $S_m$  with  $t_s$  and  $C_d$

Şekil 11.  $S_m$  değerinin  $t_s$  ve  $C_d$  ile değişimi

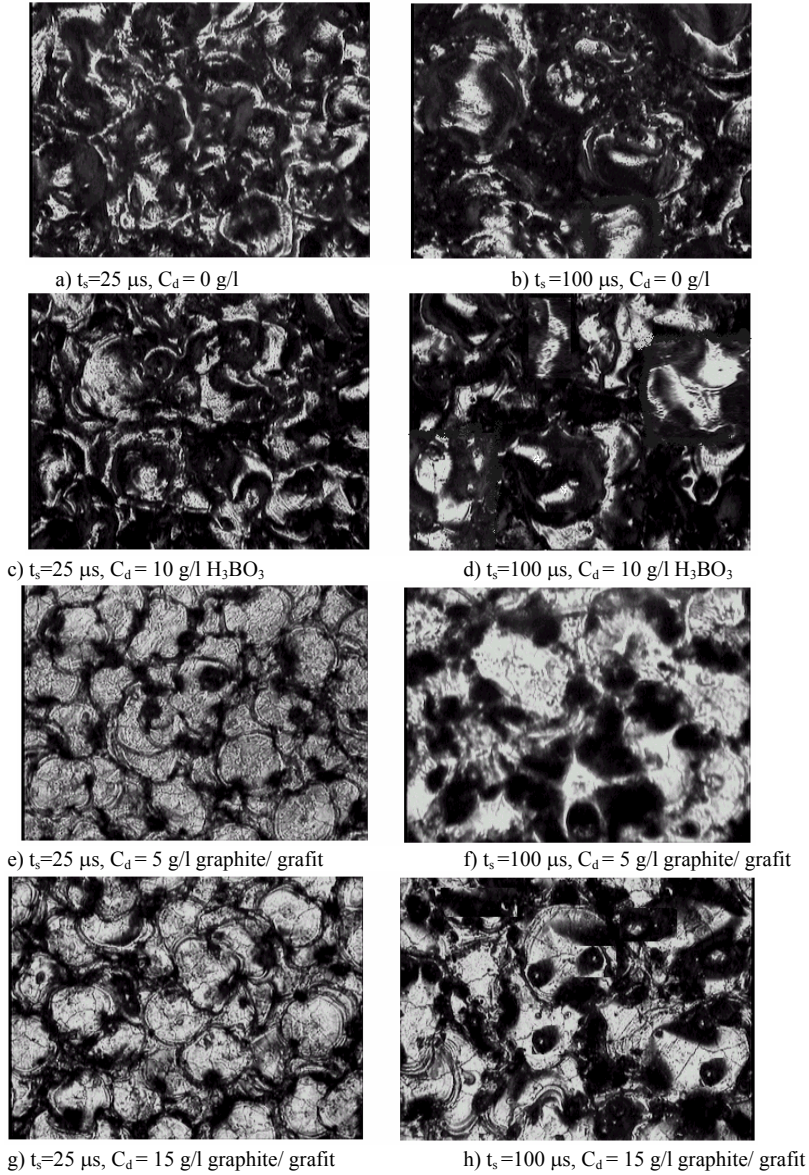


Figure 12. Surface photographs of machined workpieces with and without powder (x400 magnification)

Şekil 12. TK/EEİ ve EEİ ile işlenmiş parçaların mikro yüzey profilleri (x400)

### 4.3 Yüzeysel Sertliğin $t_i$ ve $C_d$ ile Değişimi

Deneylerde kullanılan çelik işparçasının sertliği yaklaşık 90 HV olarak ölçülmüştür. Saf gazyağı kullanılan deneylerde her iki vuruş süresi için işparçası yüzeyi sertleşmiştir.  $t_i = 100 \mu s$ 'de  $25 \mu s$ 'ye nazaran daha sert bir yüzey elde edilmiştir (Şekil 13). Bunun sebebi  $100 \mu s$  vuruş süresinde yüzeyde daha derin ısıl etkilenmiş bir ergimiş-katlaşmış katman oluşmasıdır. Şekil 13'te, grafit ve  $H_3BO_3$  tozlu deneylerde yüzey sertliğinin tüm vuruş sürelerinde saf gazyağı ile işlenmiş yüzeylerden daha fazla olduğu görülmektedir.  $t_i$  ve  $C_d$  arttıkça yüzey sertliği de artmaktadır. Bu durum grafit tozlu çalışmada daha belirgin olarak görülmektedir. Grafit tozları,  $H_3BO_3$  tozlarına nazaran yüzey sertliğini daha çok arttırmıştır. Grafit tozlarının yüksek sıcaklıkta yüzeye difüze edip martenzit oluşumunu artırmasından dolayı yüzey sertliğini arttırmada etkili olduğu daha önce yapılan bir çalışmada vurgulanmıştı [6]. En yüksek sertlik değerleri,  $t_i = 100 \mu s$  değerinde grafitin yüksek konsantrasyonlu olduğu deneylerde ( $C_d = 10 g/l$  ve  $15 g/l$ ) elde edilmiştir.

### 4.3 Variation of surface hardness with $t_i$ and $C_d$

The hardness of the workpiece material (base metal) before electric discharge machining is measured as 90 HV. After machining with pure kerosene, hardness of machined surface is found harder than the initial hardness for both  $t_i$  settings. In case of pure kerosene use, the hardness measured for  $100 \mu s$  pulse time is higher than  $25 \mu s$  pulse time (Figure 13). This is mainly due to the thicker resolidified layer formed by higher energy discharges during machining. Figure 19 also indicates that surface hardness values obtained for both graphite and  $H_3BO_3$  powder mixed machining are higher than pure kerosene case for all  $t_i$  settings. As shown in the figure, surface hardness increases with increasing  $t_i$  and  $C_d$ . The hardness values obtained in graphite powder mixed dielectric cases are higher than that of  $H_3BO_3$  powder case. The higher hardness obtained in graphite case is attributed to martensite formation on the machined surface due to high temperature diffusion of graphite powders to the surface [6]. Maximum hardness values obtained in the experimentation is in use of graphite powder at long  $t_i$  setting ( $t_i = 100 \mu s$ ) and at high  $C_d$  cases ( $C_d = 10 g/l$  and  $15 g/l$ ).

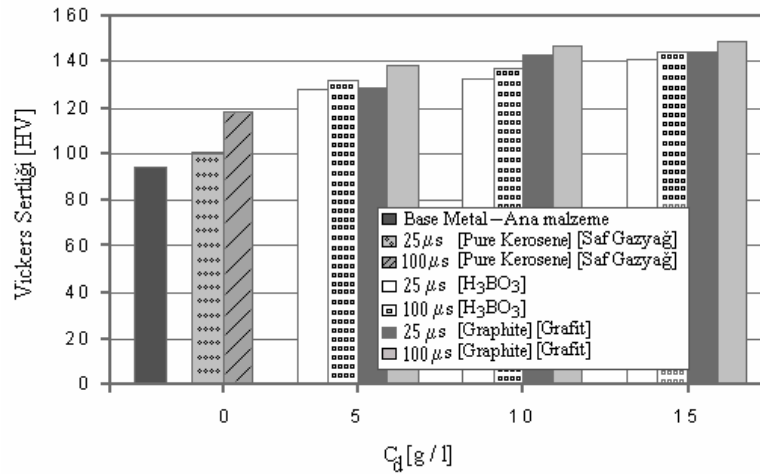


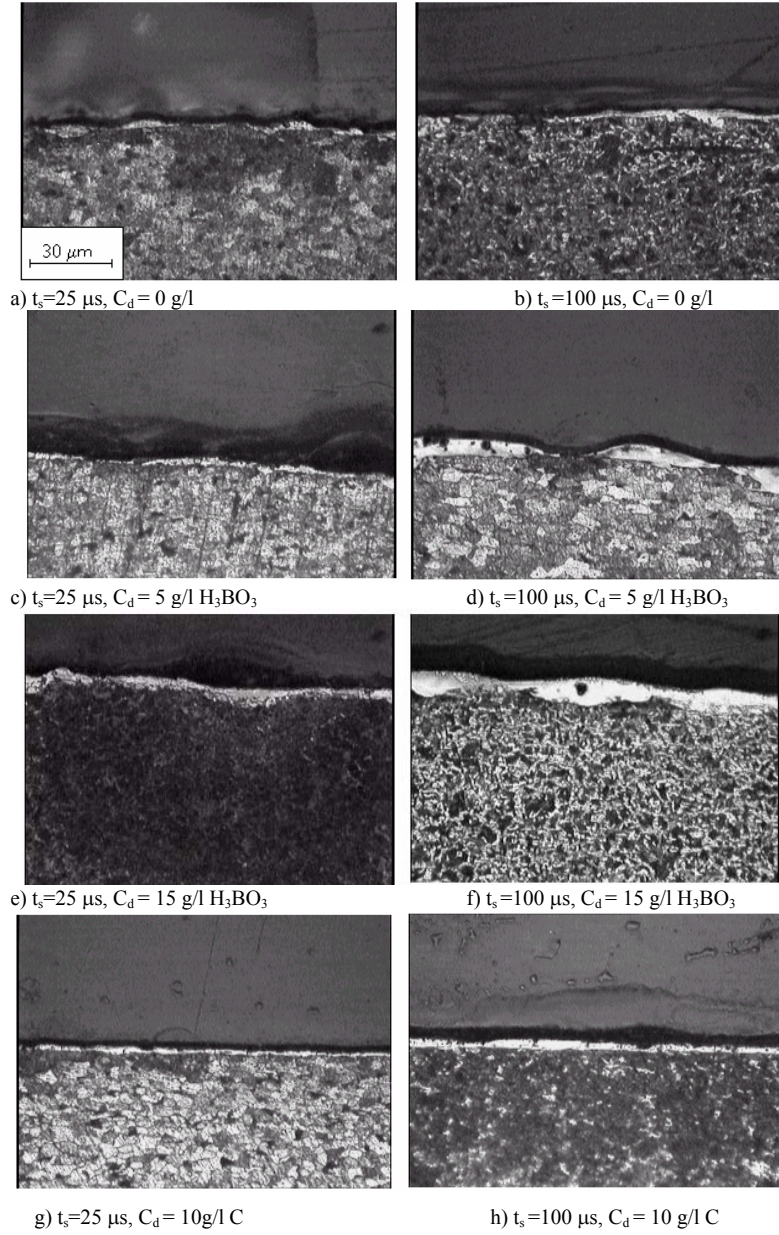
Figure 13. Variation of machined surface hardness with  $t_i$  and  $C_d$   
Şekil 13. İşlenmiş yüzeylerin sertliğinin  $t_i$  ve  $C_d$  ile değişimi

### 4.4 Mikroyapının ile ilgili Gözlemler

Mikro yapının incelenmesi sonucunda işparçalarında farklı özellikte yüzey katmanların meydana gelmediği görülmüştür. Ancak işparçalarının işlenmiş üst yüzeylerinde beyaz bir tabakanın oluştuğu tespit edilmiştir (Şekil 14). Grafit tozlu deneylerde yüzeyde görülen beyaz tabakanın düzgün yapıda olduğu,  $t_i$  ve  $C_d$  arttıkça her iki tip tozda da bu tabakanın kalınlığının arttığı gözlenmiştir. Bu tabakanın grafit tozlu deneylerde daha düzgün oluşması bu deneyler için ölçülen küçük pürüzlülük değerleri ile de uyusmaktadır. Oluşan beyaz tabaka çok sert ve kırılgan olduğundan ve tabakanın kalınlığının 2-9  $\mu m$  aralığında (çok ince) değişmesinden dolayı tabakanın sertlik ölçümü yapılmamıştır. Bu tabakanın sertliğinin ana malzemenin sertliğinden %50 ile %90 arasında daha yüksek olduğu bilinmektedir [4,11,15].

### 4.4 Observations about microstructure

Optical investigation of microstructure indicated that no metallurgically affected surface layers formed under pure and powder mixed kerosene machining conditions. However, a thin white layer is observed on top of all machined workpiece surfaces (Figure 14). It is found that thickness of the white layer increases with increasing  $t_i$  and  $C_d$  for both graphite and  $H_3BO_3$  powder cases. For graphite powder case, the white layer is continuous and evenly distributed in thickness over the surface. Since the white layer is found very hard and brittle and its thickness varies between 2 and 9  $\mu m$ , hardness measurements of the layer couldn't be performed. The hardness of this hard white layer is known to be 50% to 90% higher than that of the base metal [4, 11, 15].



**Figure 14.** White layer formed on machined work surfaces (x400 magnification)

Şekil 14. İşlenen işparçalarının mikro yapısı (x400)

## 5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, dielektrik sıvı içerisine katılan grafit ve  $H_3BO_3$  tozlarının yüzey pürüzlülüğüne, işparçası işleme hızına, elektrot aşınma hızına, mikro yapıya ve yüzey sertliğine etkileri deneysel olarak incelenmiştir.

Gerek grafit ve gerekse  $H_3BO_3$  toz karışımı deneylerde, vurum süresi arttıkça yüzey pürüzlülüğünün kötüleştiği görülmüştür.  $H_3BO_3$  tozu kullanıldığında, artan toz konsantrasyonu ile yüzey pürüzlülüğü değerlerinde saf gazyağına göre belirgin bir değişim görülmemiştir. Grafit tozlu çalışmada ise yüzey pürüzlülüğünde, saf gazyağı kullanılarak elde edilen yüzeylere göre belirgin bir iyileşme görülmüştür. Grafit tozlu deneylerde elde edilen  $R_a$ ,  $R_z$ (DIN) ve  $S_m$  pürüzlülük parametreleri bütün deneylerde elde edilen en küçük değerlerdir. Toz karışımı

## 5. CONCLUSION

In this study, effects of mixing graphite and boric acid ( $H_3BO_3$ ) powders into kerosene dielectric on surface roughness, workpiece removal rate, electrode wear rate, micro structure and surface hardness are investigated experimentally in PM/EDM process.

It found experimentally that increasing pulse time increases surface roughness for both graphite and  $H_3BO_3$  powder mixed kerosene cases. No significant change in surface roughness compared to pure kerosene is observed with increasing concentration of  $H_3BO_3$  powder in kerosene. Mixing of graphite powder into kerosene dielectric significantly improves surface quality. The smallest values of  $R_a$ ,  $R_z$ (DIN) and  $S_m$  surface roughness parameters are obtained in use of graphite powder mixed



deneylerde,  $S_m$  ve  $R_z(DIN)$  pürüzlülük parametrelerinin artan toz konsantrasyonu ile azalması krater boyutlarının (çapının ve derinliğinin) azaldığını göstermiştir. Bu durum çekilen yüzey profil fotoğraflarındaki kraterler incelendiğinde de görülmektedir.

Sonuç olarak, grafit tozlu işlemlerde işleme aralığında oluşan toz köprüleri boşalım süresince daha fazla sayıda boşalım kanalı oluşturarak  $H_3BO_3$  tozlu ve tozsuz dielektrik sıvıya göre aynı boşalım enerjisini birim işleme alanına daha düşük yoğunlukta iletmıştır. Bu da yüzey pürüzlülüğünü belirgin şekilde iyileştirmiştir. Dielektrik sıvıya katılan  $H_3BO_3$  tozunun kötü iletken olmasından dolayı saf gazyağına göre  $R_a$ ,  $R_z(DIN)$  ve  $S_m$  pürüzlülük parametrelerinin değerlerinde iyileşme sağlanamamıştır.

Grafit tozlu deneylerde toz konsantrasyonun ve vuruş süresinin artırılmasıyla saf gazyağı ve  $H_3BO_3$  tozlu deneylere nazaran çok daha yüksek işleme hızı değerlerine ulaşılmıştır.  $H_3BO_3$  tozlu çalışmada, işleme hızında saf gazyağına göre belirgin bir iyileşme sağlanamamıştır. Elektrot aşınma hızında artan her iki toz konsantrasyonu ile birlikte belirgin bir artış görülmüştür. Grafit tozu karışımı deneylerde artan toz konsantrasyonu ve düşük vuruş süresinde saf gazyağı ve  $H_3BO_3$  tozu ile yapılan deneylere göre yüksek elektrot aşınma hızı elde edilmiştir. Bütün deneylerde uzun vuruş sürelerinde elektrot aşınması azalmıştır. Grafit tozlu deneylerde vuruş süresinin artışı ile saf gazyağı ve  $H_3BO_3$  tozlu deneylere göre bağlı aşınma değerlerinde belirgin bir artış görülmüştür.

Bütün toz karışımı deneylerde artan toz konsantrasyonu ve vuruş süresi ile yüzey sertliğinin ana malzemeye ve saf gazyağı ile işlenmiş yüzeylere göre arttığı görülmüştür. Grafit tozunun kullanıldığı deneylerde  $H_3BO_3$  tozuna göre daha yüksek sertlik değerleri gözlemlenmiştir. Bu sonuç karbonun yüzey tabakasında martenzit oluşumunu artırmasından dolayıdır.

Mikro yapı fotoğrafları işparçası yüzeyinde farklı katmanların oluşmadığını göstermiştir. Ancak işparçalarının işlenmiş yüzeylerinde bölgesel olarak 2-9  $\mu m$  kalınlığında beyaz renkli çok sert ve kırılmalı bir katman oluştuğu tespit edilmiştir. Her iki tozla yapılan deneylerde toz konsantrasyonu ve vuruş süresi arttıkça beyaz katmanın kalınlığı artmıştır.

Yapılan deneyler,  $H_3BO_3$  tozlarının yüzey sertliği dışında saf gazyağı ile yapılan deneylere göre işleme hızı ve yüzey pürüzlülüğü açısından belirgin bir üstünlük sağlamadığını göstermiştir. Bu durum,  $H_3BO_3$  tozunun kötü elektrik iletken bir toz olduğu gerçeği ile izah edilmiştir. Bor esaslı tozların TK/EEI yönteminde yüzey alایشlamasında kullanım verimi daha yüksek iletkenliğe sahip bor esaslı tozların veya bor esaslı tozların diğer iletken tozlarla karıştırılarak kullanımı ile artırılabilir.

kerosene. In this study,  $S_m$  and  $R_z(DIN)$  surface roughness parameters are used in place of crater diameter and crater depth, respectively. It is found that the surface roughness parameters (i.e. crater diameter and depth) decrease with increasing powder concentration, especially for graphite powder. The results are also confirmed by optical microscope investigation of the surfaces.

In graphite powder mixed cases, increasing powder concentration and pulse time increases material removal rate more than pure kerosene and  $H_3BO_3$  powder mixed cases.  $H_3BO_3$  powder mixing does not improve material removal rate significantly. Electrode removal rate is increased with the addition of both powders to dielectric. Mixing of graphite powder gives higher electrode wear rate than pure and  $H_3BO_3$  powder mixed kerosene especially at high powder concentrations and short pulse time settings. In all experiments electrode wear rate decreases with increasing pulse time. Relative wear in graphite powder case is higher than both pure and  $H_3BO_3$  powder cases.

It found that for both powders, increasing powder concentration and pulse time increases hardness of machined workpiece surface with respect to base metal. The hardness values for both powder mixed machinings are higher than pure kerosene case. Graphite powder mixing gives higher hardness values than  $H_3BO_3$  powder mixing. This is attributed to the formation of hard martensite layer on the work surface in use of graphite mixed kerosene.

Optical microstructure investigations and photographs taken do not indicate formation of surface layers after PM/EDM. A thin white layer (2-9  $\mu m$  thickness) is observed on top of all machined surfaces and it is found that thickness of the layer increases with increasing  $t_i$  and  $C_d$  for graphite and  $H_3BO_3$  powder cases.

The experiments conducted indicated that use of boron based  $H_3BO_3$  powder mixing into kerosene dielectric does not improve machining results significantly in EDM process, except hardness of the machined surface. The alloying effect of boron based powders on PM/EDM surfaces could be improved by using more conductive boron based mineral powders or by mixing boron based powders with conductive powders.

## KAYNAKLAR/ REFERENCES

1. 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).
2. 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).
3. Uno, Y., Okada, A., Çetin, S., “Surface modification of EDMed surface with powder mixed fluid”, *2<sup>nd</sup> International Conference on Design and Production of Dies and Molds, Kuşadası*, (2001).
4. Uno, Y., Okada, A., “Surface generation in electrical discharge machining with silicon powder mixed fluid”, *International Journal of Electrical Machining*, 2, 13-18, (1997).
5. 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).
6. Ming, Q.Y., He, L.Y., “Powder-suspension dielectric fluid for EDM”, *Journal of Materials Processing Technology*, 52, 44-54, (1995).
7. Narumiya, H., Mohri, N., Saito, N., Ootake, H., Teunekewa, Y., Takawashi, T., Kobayashi., “EDM by powder suspended working fluid”, *Proceedings of the 9th International Symposium for Electrode Machining*, 5-8, (1989).
8. Wong, Y.S., Lim, L.C., Rahuman, I., Tee, W.M., “Near-mirror-finish phenomenon in EDM using powder-mixed dielectric”, *Journal of Materials Processing Technology*, 79, 30-40, (1998).
9. Mohri, N., Saito, N., Higashi, M., “A new process of finish machining on free surface by EDM methods”, *Annals of the CIRP*, 40, 1, 207-210, (1991).
10. 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 International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology*, 25, 138-144, (2001).
11. Kruth, J.-P., Froyen, L., Stevens, L., Dejonghe, P., “In-process alloying of the white layer of a workpiece machined by die-sinking EDM”, *International Journal of Electrical Machining*, 3, 33-38, (1998).
12. Tzeng, Y. F., Lee, C. Y., “Effects of powder characteristics on electro discharge machining efficiency”, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, 586-592, (2001).
13. Masui, K., Demizu, K., Sato, Y., Sone, T., “Surface modification of tool steels by alloying method using EDM process”, *Proc. of ISEM-XI*, 419-426, (1995).
14. Çalık, A., “Turkey’s boron minerals and their properties”, *Journal of Engineer and Machine*, 508, 36-42, (2002) (text in Turkish).
15. Kruth, J. P., Stevens, L., Froyen, L., Lauwers, B., “Study of the white layer of a surface machined by die-sinking electro-discharge machining”, *Annals of the CIRP*, 44, 1, 169-172, (1995).

Received/ Geliş Tarihi: 11,05,2004    Accepted/Kabul Tarihi: 19,11,2004