



## Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin elektro erozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerine etkisi

Oğuz Erdem<sup>1\*</sup>, Can Çoğun<sup>2</sup>, Levent Urtekin<sup>3</sup>, H. Bekir Özerkan<sup>4</sup>, İbrahim Uslan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Gazi Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ankara

<sup>2</sup>Çankaya Üniversitesi, Mekatronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Ankara

<sup>3</sup>Ahi Evran Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kırşehir

<sup>4</sup>Gazi Üniversitesi, Atatürk Meslek Yüksekokulu, Ankara

### Ö N E Ç I K A N L A R

- EEİ'de dielektrik sıvı olarak toz katkılı silikon yağı kullanımı
- EEİ'de dielektrik sıvının sıcaklığını kontrol etme
- Dielektrik sıvının elektro-reolojik özelliklerinin incelenmesi

### Makale Bilgileri

Geliş: 13.01.2015

Kabul: 28.04.2016

### DOI:

10.17341/gummd.50769

### Anahtar Kelimeler:

elektro erozyon ile işleme,  
silikon yağı,  
nişasta tozu,  
döner elektrot,  
dielektrik ısıtması

### ÖZET

Bu çalışmada, Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) yönteminde daha iyi yüzey kalitesinde delikler elde edebilmek için kendi eksenini etrafında dönen ortası delik pirinç elektrotla, hidrokarbon bazlı dielektrikler yerine karbon ve nişasta tozu katkılı ısıtılmış silikon yağı dielektrik sıvı olarak kullanılmıştır. Elektrik alan altındaki Elektro-reolojik (ER) akışkanın optimum sıcaklık ve toz konsantrasyon değerleri elektro-reometre deneyleri yardımıyla tespit edilmiştir. Döner ve dönmeyen elektrotla yapılan işlemlerde karbon tozu katkılı silikon yağı karışımlarında oldukça yüksek işparçası işleme hızı (İİH) değerleri elde edilirken, nişasta tozu katkılı silikon yağı karışımlarında düşük İİH değerleri elde edilmiştir. İşlenmiş delik yüzeylerinin optik mikroskop incelemelerinde, karbon tozu katkılı dielektriklerde işparçası yüzeyindeki kraterlerin çap ve derinlik açısından küçüldüğü böylece sivri uçlu tepelerin eşit şekilde dağıldığı ve yuvarlandığı görülmüştür. Döner ve dönmeyen elektrotla 30°C ve 75°C'lerdeki karbon tozu katkılı dielektriğe nişasta tozu katkısı, yüzey özelliklerini iyileştirmiştir.

## The effect of powder mixed and heated dielectric on drilling performance of electric discharge machining (EDM)

### H I G H L I G H T S

- Using powder added silicon oil as a dielectric fluid in EDM
- Controlling the temperature of dielectric fluid in EDM
- Investigation of the electro-rheological properties of dielectric fluid

### Article Info

Received: 13.01.2015

Accepted: 28.04.2016

### DOI

10.17341/gummd.50769

### Keywords:

electric discharge machining,  
silicon oil,  
starch powder,  
rotating electrode,  
dielectric heating

### ABSTRACT

In this study, heated silicon oil with added carbon and starch powders was used as dielectric liquid, instead of common hydro-carbon based dielectrics, to obtain better hole surface quality with rotating brass tube electrode in electric discharge machining (EDM). The electro-rheometer tests were conducted to find out the suitable temperature and powder concentration values of the electro-rheological (ER) dielectric under the electric field. Higher workpiece material removal rates (MRR) was obtained in carbon powder added dielectrics than the starch powder added ones for rotating and non-rotating electrodes. The optical microscope observations of the machined hole surfaces indicated that the carbon powder added dielectrics reduced the diameter and depth of the discharge craters, thereby resulting in uniformly distributed and round top peaked surface topography. The starch powder addition to the carbon mixed dielectric further improved the surface quality for both rotating and non-rotating electrodes cases at 30°C and 75°C dielectric temperatures.

\* Sorumlu Yazar/Corresponding author: oguzerdem@gazi.edu.tr / Tel: 0312 354 2726

## 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektro erozyon ile işleme (EEİ), günümüzde yüksek kalitede kalıp ve takım imalatında yaygın olarak kullanılan alışılmamış imal usullerinden biridir [1]. Günümüz endüstrisinde EEİ yöntemi yaygın olarak pres döküm kalıpları, soğuk şekillendirme kalıpları, dövme kalıpları, plastik enjeksiyon kalıpları, toz sıkıştırma kalıpları, kesme ve ezme kalıpları, cıvata başı şişirme kalıpları, çok küçük pompa, motor, robot gibi mikro elektro-mekanik sistemlerin parçaları, nükleer güç reaktörlerinin parçaları, ayrıca uçak ve uzay sanayisiyle ilgili parçaların üretiminde kullanılmaktadır [2-4]. EEİ yöntemi imalatta yaygın olarak kullanılıyorsa da düşük iş parçası işleme hızı (İİH) ve kratersi yüzey yapısı bu yöntemin kullanımını bazı uygulamalar için kısıtlamaktadır. EEİ ile elde edilen yüzeyler mikroskop altında incelendiğinde, elektriksel boşalmaların oluşturduğu kraterlerin üst üste binmesiyle oluşan yüzeyin genellikle pürüzlü olduğu görülür [5]. EEİ'de yüzey kalitesi ve yüzey pürüzlülük değerlerini etkileyen etkenlerin en önemlileri iş parçası malzemesi [4, 6, 7], elektrot malzemesi [4, 8-12], vurum süresi [4, 9, 11], dielektrik sıvısı (türü, uygulama şekli, içerisine katılan çeşitli metal ve metal olmayan tozlar, uygulama basıncı) [5, 11, 13-15], kutuplama [8, 13, 16-19], açık devre gerilimi [4], işleme (boşalım) akımı ( $I_d$ ) [9, 17-20], işleme derinliği [21], elektrot boyutu ve tipidir [10, 22, 23]. Günümüzde EEİ yönteminde toz karışımli dielektrik sıvı kullanılarak yapılmış sınırlı sayıda çalışma mevcuttur. Chow vd. [24], Al ve SiC tozlarını gazyağı dielektrik içerisine ilave ederek yaptıkları çalışmada İİH, elektrot aşınma hızı (EAH), yüzey pürüzlülüğü ( $R_a$ ) ve elektriksel boşalım gerilim dalga formları gibi performans çıktılarını incelemişlerdir. Çalışmalarında klasik EEİ'ye göre İİH artmış,  $R_a$  azalmıştır. Lin vd. [20] EEİ ve ultrasonik işleme mekanizmalarını birleştirerek gerçekleştirdikleri çalışmada İİH'yi artırmak ve  $I_d$ 'nin işleme yüzeyine daha homojen dağılmasını sağlamak amacıyla, dielektrik olarak kullandıkları saf su ve gazyağı içerisine 3  $\mu\text{m}$  ve 9  $\mu\text{m}$  ortalama boyutlarında SiC tozlarını karıştırmışlardır. Uno vd. [21], alüminyum bronz malzemeden yapılan plastik enjeksiyon kalıplarının nikel malzemeyle kaplanması ve takım çeliklerinin yüzeyinde sert titanyum karbür tabakası oluşturulmasına yönelik çalışmalarında dielektrik içerisine nikel ve karbon tozlarını karıştırmışlardır. Narumiya vd. [10], Si, Al, grafit tozlarını dielektrik sıvıya karıştırdıkları çalışmada, tozlarla alaşımlanmış ve klasik EEİ'ye göre daha düzgün yüzeylerin daha kısa işleme sürelerinde elde edildiğini gözlemlemişlerdir. Wong vd. [6] C, Si, Al, SiC, MoS<sub>2</sub> ve cam tozlarını dielektrik sıvı içerisine farklı oranlarda katarak yaptıkları çalışmada, özellikle C, Si ve MoS<sub>2</sub> tozlarının katılmasıyla yapılan deneylerde, Al, SiC ve cam tozlarına nazaran daha iyi yüzeylerin elde edildiğini belirtmişlerdir. Kruth v [12], toz metalürjisi yöntemiyle imal edilmiş elektrotlar kullandıkları çalışmalarında W, Co, Mo, Mn tozlarını dielektrik sıvı içerisine karıştırarak işlenen yüzeylerin pürüzlülük değerlerini ve mikro yapılarını incelemişlerdir. W, Co, Mo ve Mn tozlarıyla

düşük yüzey pürüzlülüğüne sahip yüzeyler elde etmişlerdir. Coğun vd. [25] çalışmalarında, dielektrik sıvı içerisine katılan grafit ve borik asit tozlarının  $R_a$ , İİH, EAH, mikroyapı (içyapı) ve yüzey sertliği gibi performans çıktılarına etkileri deneysel olarak incelenmişlerdir. Her iki toz karışımli dielektrik sıvıda vurum süresi arttıkça  $R_a$ 'nın kötüleştiği görülmüştür. Grafit tozlu çalışmada ise  $R_a$ , saf gazyağı kullanılarak elde edilen yüzeylere göre iyileşmiştir. Borik asit tozlu deneylere göre grafit tozlu deneyler daha iyi  $R_a$  vermiştir. Parlak yüzeyler gerektiren plastik enjeksiyon ve pres döküm kalıplarında kaba EEİ sonrasında yüksek yüzey kalitesi elde etme amaçlı ikinci bir bitirme işlemi (hassas işleme-finiş) uygulanmaktadır [26]. Bitirme işlemi iyi yüzey kalitesi amaçlarken, kaba işleme yüksek İİH'yi hedefler. Son yıllarda her iki aşamayı da birleştiren toz katkılı elektro erozyon ile işleme (TKEEİ) yönteminde dielektrik sıvı içerisine, çoğunlukla 100  $\mu\text{m}$ 'den küçük olmak üzere grafit, silikon, silikon karbür, alüminyum, alüminyum oksit, nikel, titanyum, krom ve bakır tozları ilave edilerek ve uygun işleme parametreleri seçilerek işleme performansı iyileştirilebilmektedir [2, 4, 5, 17, 21, 22, 27]. Bu iyileşmeler EAH'yı,  $R_a$ 'yı ve mikro çatlakları azaltma yanında İİH'nı artırma ve elektriksel boşalım aralığında yüksek elektriksel iletkenlik sağlayarak boşalım gerilimini düşürme yönünde olmaktadır. Elektro-reoloji (ER), elektrik alanına maruz kalan bir akışkanın, akış özelliklerinde meydana gelen değişimlerinin izlendiği bilim dalıdır. Sıvının akmaya karşı gösterdiği direnç elektrik alanının büyüklüğüne, alan frekansına, kayma hızına, kayma gerilmesine, sıcaklığa, içinde tanecikler varsa tanecik boyutuna, tane derişimine ve akışkan ortamına bağlıdır [28, 29]. Elektro-reolojik bir akışkan, kaldığı elektrik alanının şiddetine bağlı olarak su gibi serbestçe akabilir, bal gibi süzülebilir ya da jelatin gibi katılaşabilir. Akışkan bu koşullara bağlı olarak birkaç milisaniye içerisinde bir halden diğerine geçebilir. Bir akışkanın elektro-reolojiye yanıt vermesi, uygulanan sabit elektrik alan altında dağılmış taneciklerin polarize olması anlamındadır. Elektrik alan uygulamasıyla (bu çalışmada iş parçası-elektrot arasına elektrik gerilimi uygulanması) komşu parçacıkların birbirini çekerek sıvı içinde dik lif yapıları oluşturabildiği daha önceden bilinmektedir. Oluşan bu yapıların dielektrik sıvısının iyonizasyon hızında (elektrik iletken hale geçme hızında), boşalım akımının bu lif köprüleri üzerinden akmasında (normal boşalımdan farklı karakteristikte oluşan parçalanmış boşalmalar) ve hareket ettirildiğinde mekanik aşındırma/erozyon etkisi yaratmada etkili olması mümkündür. Literatür incelemesi sonucunda, a) TKEEİ'de silikon yağının ısıtılmasının, b) delik delmede kullanılacak elektrot içinden alışılmış toz katkılarından farklı olarak parlatmada etkisi olabilecek nişasta tozu (metal olmayan toz) katkısı kullanımının, c) elektrotu döndürmenin, d) değişik derişim oranlarına sahip karbon (iletken) tozlarının ve nişasta tozlarının birlikte silikon yağına katılmasının, ve e) toz katkılı silikon yağının ER davranışının işleme performansına etkilerinin, söz konusu başlıkların tamamını birlikte içeren bir çalışmanın var olmadığı görülüp bu nedenle mevcut çalışmanın

gerçekleştirilmesi amaçlanmıştır. Dolayısıyla bu deneysel çalışmada, EEİ delik delme de ortası delik döner bir elektrot içerisinde geçirilen silikon yağının (diğer hidro karbon esaslı dielektriklere nazaran insan ve çevre sağlığına zararsız) işleme/çıktı performansı (İİH, EAH,  $R_a$  ve yüzey topoğrafyası) araştırılmıştır. Çalışmada, silikon yağının işleme performansı etkilerinin daha rahat anlaşılabilmesi adına EEİ delik delme endüstrisinde çok tercih edilen suyla performans çıktılarının kıyaslanması düşünülmüştür. Böylelikle silikon yağının EEİ delik delme işlemi için uygunluğunun sınılanması amaçlanmıştır. Ayrıca, silikon yağındaki karbon ve nişasta tozu derişim oranlarının, silikon yağının ısıtılmasının ve elektrot dönüşünün işleme performansına olan etkilerinin araştırılabilmesi için EEİ parametreleri (boşalım akımı, vuruş süresi, bekleme süresi, polarite ve dielektrik püskürtme basıncı) sabit değerler alınmıştır. Silikon yağının işleme sırasında yoğun bir elektrik alan içerisinde olması nedeniyle bu çalışmada değişik toz katkısına sahip silikon yağının ER davranışları da incelenmiştir.

## 2. DENEYSEL METOT (EXPERIMENTAL METHOD)

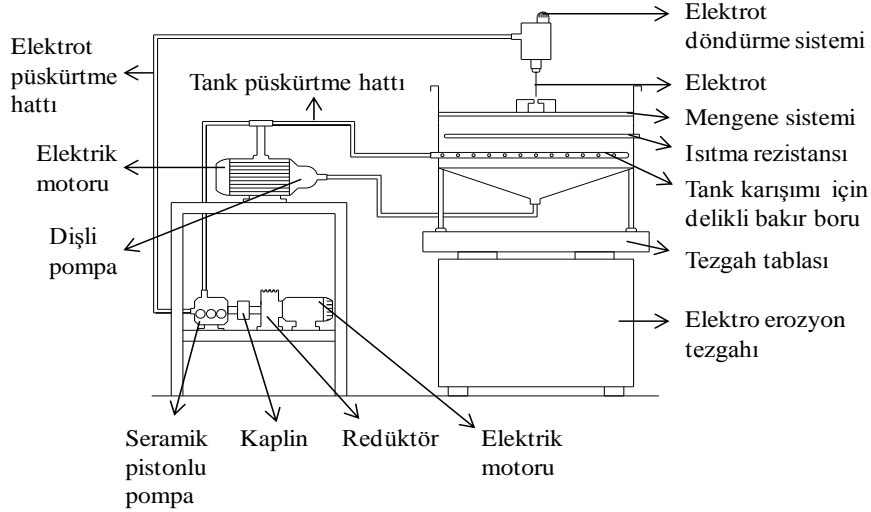
Deneysel çalışmalarda, vuruş jeneratörlü FURKAN EDM M25 dalma elektro erozyon tezgâhı kullanılmıştır. Vuruş jeneratörü, 3 kVA güce/kapasiteye ve 80 V'luk açık devre gerilimine sahip eş vuruşlardan oluşacak şekilde ayarlanmıştır. EEİ parametreleri (boşalım akımı, vuruş süresi, bekleme süresi, polarite vb.) performans çıktılarını (İİH, EAH,  $R_a$  ve yüzey topoğrafyası) doğrudan etkileyen parametreler oldukları için bu çalışmada, EEİ parametrelerinin değiştirilmesiyle performans çıktıları üzerinde oluşacak etkilerin görülmesinden ziyade farklı toz derişim oranlarıyla oluşturulan silikon yaği karışımların işleme performansı açısından uygunluğunun araştırılması amaçlanmıştır. Yani, silikon yağına yapılan karbon ve nişasta tozlarının hangi derişim oranında en iyi sonuçları verebileceği, silikon yağının ısıtmanın ve elektrotu döndürmenin çıktı performansları üzerine etkileri araştırılması hedeflenmiştir. Bunlara ilaveten çalışmada, özellikle silikon yağına yapılacak nişasta tozu katkısının delik yüzeylerindeki parlatma etkisinin görülmesi de amaçlanmıştır. Bu parlatma etkisinin 50 A gibi boşalım akımı ve 1600  $\mu$ s gibi vuruş süresiyle gözlemlenmesinin neredeyse imkansız olacağı düşünülmüştür. Çünkü bu değerlerde yapılacak işlemlerde oldukça kaba ve yanmış yüzeyler elde edileceği kaçınılmazdır. Diğer taraftan 1,5 A boşalım akımı ve 3  $\mu$ s vuruş süresiyle hassas ve düşük  $R_a$  değerine sahip yüzeyler elde edilebileceğine rağmen oldukça düşük İİH ve oldukça yüksek EAH değerleri elde edilmesi kaçınılmazdır. Bu hususlar ve literatürdeki benzer çalışmalardaki performans çıktıları [30, 31] göz önünde bulundurularak çalışmada EEİ parametreleri sabit olarak: 3 A boşalım akımı, 25  $\mu$ s vuruş süresi ve 50  $\mu$ s bekleme süresi olarak alınmıştır (Tablo 1). Çalışmada, farklı toz derişim oranlarıyla oluşturulan silikon yaği karışımların işleme performansı açısından incelenmesi temel amaç olduğu için dielektrik püskürtme basıncı ve elektrot döndürme hızı parametrelerinin sabit değerler alınması düşünülmüştür. Yılmaz vd. çalışmalarında [30, 31], 100 bar

püskürtme basıncıyla deiyonize su kullanılarak ortası delik 2 mm'lik elektrotlarla Ti6Al4V ve IN718 iş parçalarına işlemler yapıldığı belirtilmiştir. Bu çalışmada kullanılan silikon yağının gerek kıvamı ve gerekse ER özellikleri göz önünde bulundurulduğunda püskürtme basıncının 100 bar daha yüksek değerde olması gerektiği düşünülmüştür. Bundan dolayı çalışmada, silikon yağının ve kıyaslama yapılacak diğer dielektriğin (suyun) püskürtme basıncı 140 bar olarak kabul edilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1.** Deneysel çalışma parametreleri  
(The parameters of experimental study)

Parametreler	Değer ve özellikler
Boşalım akımı, $I_d$ (A)	3
Vuruş süresi, $t_s$ ( $\mu$ s)	25
Bekleme süresi, $t_p$ ( $\mu$ s)	50
Çalışma	sürekli
Geri çekilme	-
Polarite	elektrot(+), işparçası (-)
İşparçası	AISI 4140 takım çeliği (%0,9 Cr; %0,8 Mn; %0,38 C; %0,15 Si; %0,15 Mo; %97 Fe)
Elektrot	Pirinç, 2 mm dış çap. (1,2 mm iç çap) tek delik
Elektrot dönme hızı (rpm)	0 ve 1000
Dielektrik	Silikon yaği (340 mPa s dinamik viskozite, 350 mm <sup>2</sup> /s kinematik viskozite, 1,102 g/cm <sup>3</sup> yoğunluk, 140°C kaynama noktası)
Dielektrik basıncı (bar)	140 (Elektrot içinden)
Dielektrik sıcaklığı (°C)	30 ve 75
Karbon tozu	104206 tip (Merck Comp.)
Karbon tozu derişimi (g/l)	10 ve 15
Nişasta tozu	101252 tip (Merck Comp.)
Nişasta tozu derişimi (g/l)	15 ve 30
Delik derinliği (mm)	20

Yılmaz vd. çalışmasında [32], farklı hızlarda (200, 400 ve 600 rpm) dönen elektrotların işleme performansına çok büyük etkiler oluşturmadığı (elektrot hızında her 200 rpm'lik artış, İİH'de yaklaşık %16'lık artış sağlamakta) tespit edilmiştir. Dolayısıyla bu çalışmada, dönmeyen ve maksimum hızda dönen (deney sistemi maksimum 1000 rpm ile dönebilmekte) elektrotlar arasındaki ara hız değerlerinin araştırılması gerek görülmemiştir. Temelde, elektrotun maksimum hızda dönmemesinin ve dönmemesinin performans çıktıları açısından ne gibi etkiler oluşturacağını araştırılması amaçlanmıştır. Isıtma olmayan (ısıtıcı rezistans açılmadan) işleme deneylerinin oda sıcaklığında (25°C) yapılacağı ve EEİ'nin başlamasından sonra işlemeden dolayı dielektrik sıcaklığının kendiliğinden yaklaşık 3-5°C daha artacağı dikkate alınarak, ısıtma olmayan işlemede dielektrik sıcaklığı 30°C kabul edilmiştir. Deneysel çalışmalarda da, ısıtma yapılmayan dielektriklerin sıcaklıkları 28-30°C olarak ölçülmüştür. Isıtma yapılarak



Şekil 1. Deneysel düzeneğin şematik görünümü (The schematic view of the experimental setup)

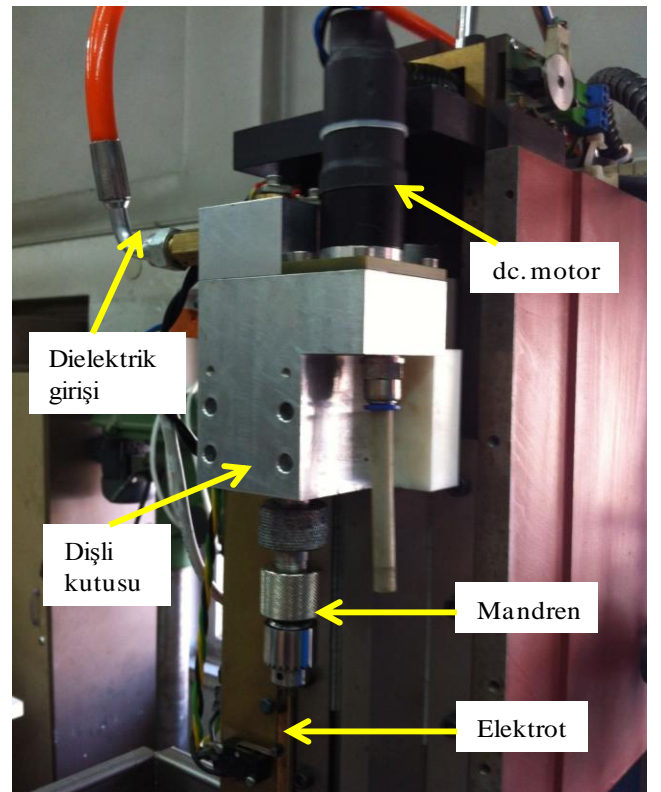
dielektriğin hangi sıcaklığa getirileceğine karar verirken: insan ve çevre sağlığı için risk oluşturmayacak bir değerde olması ve sıcaklık artışıyla viskozite değerinin akış için uygun konuma getirilmesi göz önünde bulundurularak 75°C olması öngörülmüştür. Silikon yağı içerisine yapılacak toz katkıları belirlenirken benzer çalışmalardan faydalanılarak karbon tozu katkısının 10 ve 15 (g/l) olması ve nişasta tozu için 15 ve 30 (g/l) olması düşünülmüştür [25, 27]. Deneysel çalışmalardaki gereksinimlerini karşılayacak deney düzeneği tasarlanmış ve imal edilmiştir (Şekil 1).

yüksek debili bir dişli pompayla gerçekleştirilmiştir. Toz katkılı dielektriğin, ortası delik elektrot içerisinde yüksek basınçla püskürtülmesi ise seramik pistonlu bir pompayla (maks. 200 bar püskürtme basıncı) sağlanmıştır (Şekil 1). Dielektriğin ısıtılması için ısıtma rezistansı ve sıcaklığının ölçülmesi için de ısı çiftleri kullanılmıştır (Şekil 2). Sıcaklık kontrol cihazıyla deneylerde arzu edilen dielektrik sıcaklığı  $\pm 1^\circ\text{C}$  hassasiyetle sağlanmıştır. Ortası delik elektrotun (maks. 1000 rpm) döndürülmesi d.c motorla gerçekleştirilmiştir (Şekil 3).



Şekil 2. Dielektrik tank sistemi (Dielectric tank system)

Deneysel düzeneği; a) dielektrik tank sistemi, b) dielektrik ısıtma ve sıcaklık kontrol sistemi ve c) elektrot döndürme sisteminden oluşmaktadır. Dielektrik tank sistemi, dielektrik sıvının sıcaklığının kontrol edilmesini ve içerisine katılan karbon ve nişasta tozlarının homojen şekilde karıştırılmasını sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Tank içi karışım için tank tabanına yerleştirilmiş üzerinde 2 mm çapında delikler bulunan 20 mm çapındaki bakır borular kullanılmıştır. Bu borular vasıtasıyla püskürtme şeklinde karışım gerçekleştirilmiştir (Şekil 1 ve Şekil 2). Toz katkılı dielektriğin tank içi hızlı dolaşımı,



Şekil 3. Elektrot döndürme sistemi (The rotation system of electrode)

Silikon yağına nişasta tozu ve karbon tozu katkısıyla elde edilecek dielektrik karışımların belli bir kayma hızı değerinde farklı sıcaklık ve farklı elektrik alan altındaki davranışları (viskozite, elektrik alan kuvveti, karışım oranı, sıcaklık) incelenmiştir. Viskozite, başta sıcaklık olmak üzere karbon ve nişasta derişimine (g/l), akışkan özellikleri (silikon yağı) ve elektrot dönme hızı gibi parametrelerden etkilendiği için kritik önem arz etmektedir. Elektrik alan altında, karbon ve nişasta tozlarının polarizasyonu incelenirken, sıcaklığa bağlı olarak viskozite (ağdalılık) ölçümleri yapılmıştır. Karışımların viskozite değerleri ölçülürken dönen konsantrik silindir yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem de genel olarak, torsiyon reometresinde (dönen kesme hız tahrikli reometre) çift konik disk içerisindeki test boşluğunda bulunan numuneler, diskin dönmeye (salınım yapmaya) başlamasıyla bir kayma hızı ( $s^{-1}$ ) oluşturur. Bu etkiyle paralel disk yüzeyleri arasındaki mesafede bir kayma gerilmesi (Pa) oluşur. Kayma gerilmesinin kayma hızına oranıyla istenen sıcaklıkta ve elektrik alanında viskozite (Pa s) değerleri elde edilir. Karbon ve/veya nişasta toz miktarının artmasıyla viskozitedeki değişimler belirlenmiştir. Elektro-tork-reometre ve TGA/DTA (karışımların parlama ve bozulma sıcaklığı) analizleriyle silikon esaslı yağ için uygun çalışma sıcaklık aralığı belirlenmiştir. Ölçümler için kullanılan karışımların formülasyonları Tablo 2 verilmiştir.

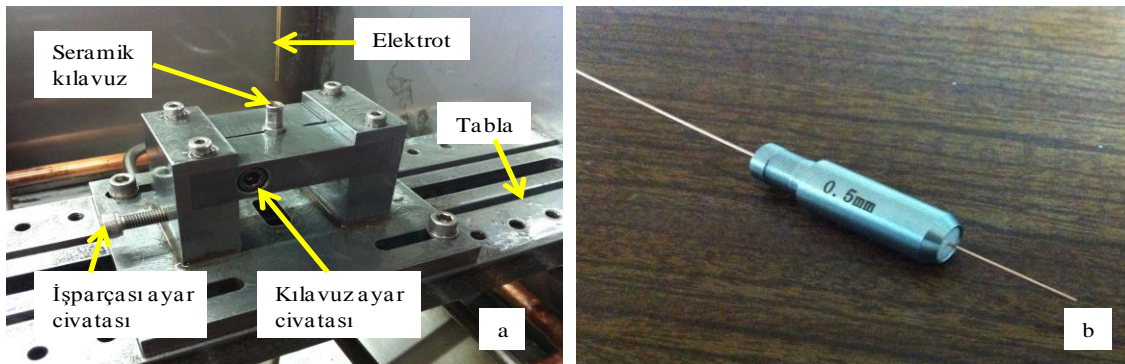
**Tablo 2.** Dielektrik karışımlar (Dielectric mixtures)

Dielektrik karışım kodu	Karışım formülasyonu
A	Silikon yağı (katkısız)
B	Silikon yağı + karbon (10 g/l)
C	Silikon yağı + karbon (15 g/l)
D	Silikon yağı + nişasta (15 g/l)
E	Silikon yağı + nişasta (30 g/l)
F	Silikon yağı + karbon (10 g/l) + nişasta (15 g/l)
G	Silikon yağı + karbon (10 g/l) + nişasta (30 g/l)
H	Silikon yağı + karbon (15 g/l) + nişasta (15 g/l)
I	Silikon yağı + karbon (15 g/l) + nişasta (30 g/l)
W	Su

Çalışmada öngörülen elektro-tork-reometre testleri ve EEİ deneyleri arasındaki benzeşimler; a) EEİ tezgâhında elektrotun kendi eksenini etrafında dönmesiyle elektrot-sıvı

arasında oluşan tork ile elektro-tork-reometre cihazında dielektrik sıvının paralel plakalar arasında hareket ederek yarattığı tork arasında, b) EEİ tankında dielektrik sıvının ısıtılması ile elektro-tork-reometre cihazında silikon yağı + nişasta tozu + karbon tozu karışımlarının ısıtılması arasında, ve c) EEİ sırasında dielektrik sıvının ve nişasta/karbon tozlarının elektrik boşalımı altındaki davranışı ile elektro-tork-reometre cihazında silikon yağı içerisindeki taneciklerin elektrik alan (E) karşısındaki davranışı (polarize olması), olarak sıralanabilir. Tablo 2'de, silikon yağı (A) ve farklı formülasyonlarına sahip karışımlarının (B-I), EEİ delik delmede performans çıktıları açısından kıyaslanabilmesi için farklı bir dielektrik olarak suyun da kullanılması düşünülmüştür. Deneysel çalışmalar sonucunda silikon yağı ile su arasında herhangi bir tercih yapılması değil, silikon yağı ve karışımlarının EEİ performans çıktıları açısından nasıl bir dielektrik olduğunun araştırılması amaçlanmıştır. Bu amaç doğrultusunda yapılacak çalışmada, farklı formülasyonlardaki silikon yağı ve karışımları arasında İH, EAH,  $R_a$  ve yüzey topoğrafyası açısından hangisinin daha iyi olduğunun araştırılması hedeflenmiştir.

ER deneyleri Thermo-Haake RS600 model 35 mm çapında paralel plakalı elektro-tork-reometre cihazında gerçekleştirilmiştir. Tablo 2'de belirtilen dokuz farklı karışımdan (A-I) hazırlanan yaklaşık 100 ml hacmindeki karışımların 30, 45, 60, 75 ve 90°C sıcaklıklarda 1000 rpm reometre diski dönüş hızı ( $17 s^{-1}$  kayma hızı) için viskozite değerleri tespit edilmiştir. Ayrıca, karışımların 30°C ve 75°C'de 0, 0,5, 1, 1,5, 2, 2,5, 3 ve 3,5 kV/mm elektrik alanlarında viskozite değerleri belirlenmiştir. İşparçası  $R_a$  ölçümleri Surcorder SE1200 tarayıcı uçlu taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla yapılmıştır. Ölçümlerde örnekleme uzunluğu standart tablolardan 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu 2,5 mm olarak seçilmiştir. İşparçalarının işlenmiş (delik) yüzeyinden üç farklı noktadan (delik girişi, ortası ve çıkışı) alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması kullanılmıştır. Mikroyapı incelemesi Olympus marka dijital kamera donanımlı optik mikroskopla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesinden önce, işparçaları %2 Nitrik asit + %98 saf Ethanol çözeltisiyle 45 dakika dağlanmıştır. Daha sonra dağlanan işparçası yüzeyleri sodyum hipoklorit + %5 toz anyonik madde karışımıyla fırçalanarak temizlenmiştir. 10 kat büyütmeyle önceden belirlenen



**Şekil 4.** Mengene sistemi: a) mengene ve b) seramik kılavuz (Clamp system: a) clamp and b) ceramic guide)

noktalardan mikroyapı fotoğrafları çekilmiştir. Deneylerde, dikdörtgenler prizması şeklinde 20x20 mm kesit ve 40 mm uzunluğuna sahip (Tablo 1'de özellikleri verilen) AISI4140 çeliği iş parçaları kullanılmıştır. İş parçalarının tüm yüzeyleri taşlanmıştır. Deneylerde, iş parçalarına delinecek 20 mm derinliğindeki deliklerin daha rahat incelenebilmesi için iki adet işparçası mengenede (Şekil 4a) birleştirilerek arayüzey oluşturulmuş ve delme işlemi bu arayüzeyde gerçekleştirilmiştir. İşleme esnasında ortası delik elektrotun salınımlarını engellemek ve eksen kaçıklığını gidermek için seramik kılavuz kullanılmıştır (Şekil 4b). Delme sonunda işparçaları birbirinden ayrılmış ve gerekli incelemeler (yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı) yapılmıştır. Şekil 5'de  $I_d=3$  A,  $t_s=25$   $\mu$ s ve  $t_p=50$   $\mu$ s işleme parametrelerinde  $h=20$  mm delinmiş işparçasının yarısı görülmektedir.



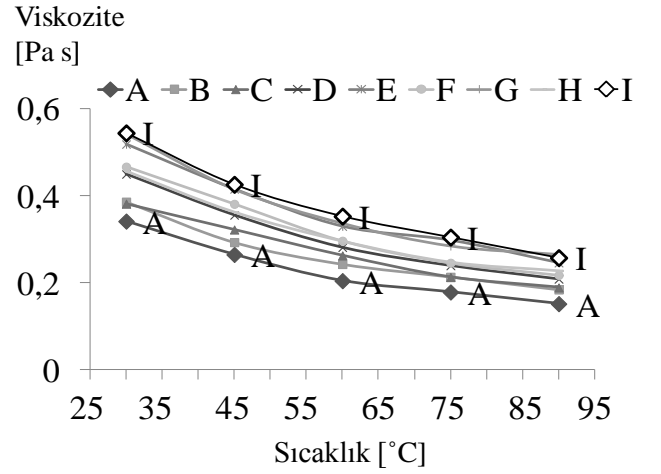
Şekil 5. Yarım iş parçası (Half a work piece)

### 3. SONUÇLAR VE TARTIŞMALAR (RESULTS AND DISCUSSIONS)

#### 3.1. ER Deneylerinin Sonuçları (The Results of ER Experiments)

A-I karışımlarından hazırlanan numunelerin 1000 rpm (17  $s^{-1}$  kayma hızı) reometre diski dönüş hızında, elektrik alanı uygulaması olmaksızın ( $E=0$  kV/mm) 30, 45, 60, 75 ve

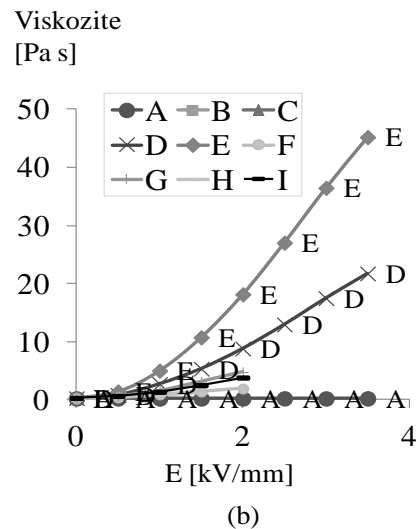
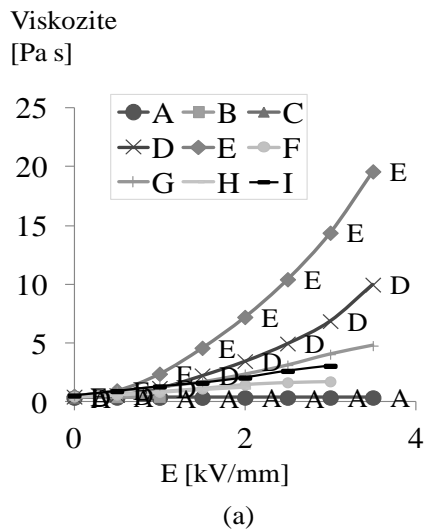
90°C dielektrik sıvı sıcaklıklarında viskozite değerlerinin değişimi Şekil 6'da görülmektedir.



Şekil 6. Elektrik alan olmaksızın dielektrik karışımların viskozite-sıcaklık değişimleri

(The viscosity-temperature variations of dielectric mixtures without electric field)

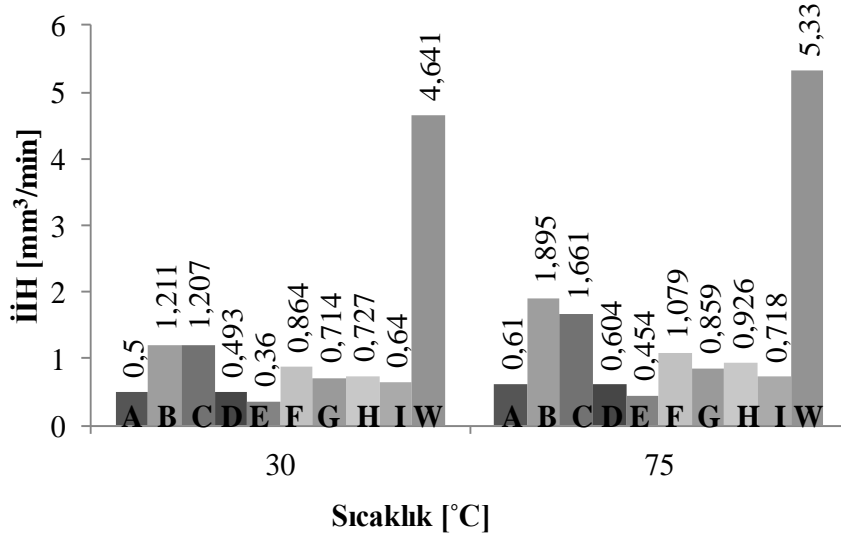
Şekil 6'dan bütün karışımlarda sıcaklık değeri arttıkça viskozite değerlerinin düştüğü görülmektedir. Yani sıcaklık değeri yükseldikçe akışa karşı gösterilen direnç azalmaktadır. A karışımının (katkısız silikon yağı) viskozite değerleri diğer karışımların viskozite değerlerinden düşüktür. En yüksek toz katkısı olan I karışımının viskozite değerleri ise en yüksektir. Diğer karışımların (B-H) viskozite değerleri birbirlerine oldukça yakın olduğu görülmektedir. Tüm karışımların viskozite değerleri 1000 Pa s'den çok çok düşük olduğundan elektrik alan uygulanmayan karışımların viskozite değerleri literatürdeki diğer çalışmalar göz önünde bulundurularak EEİ'de dielektrik akışı açısından sorun teşkil etmeyeceği düşünülmektedir. EEİ deneylerinin 30 ve 75°C'de



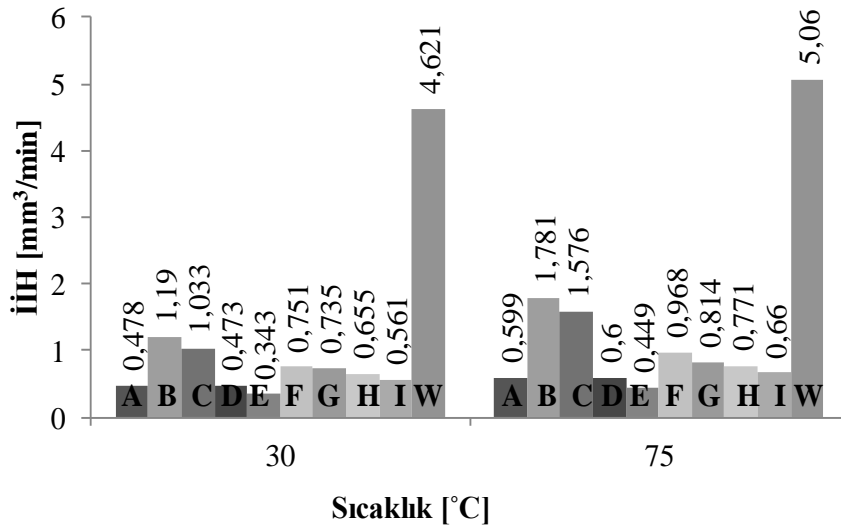
Şekil 7. Dielektrik karışımların viskozite-elektrik alan değişimleri: a) 30°C ve b) 75°C  
(The viscosity-electric field variations of dielectric mixtures: a) 30°C and b) 75°C)

yapılmasına karar verilerek farklı elektrik alan altındaki ER deneyleri de bu sıcaklıklarda yapılmıştır (Şekil 7a ve 7b). Bazı karışımlarda karbon tozu katkısı iletkenliği çok arttığı için tork reometre cihazı ark oluşturmuş ve bu nedenle ölçüm yapılamamıştır. Şekil 7 incelendiğinde, A karışımının (katkısız silikon yağı) elektrik alan altında çok farklı reolojik özellikler göstermediği görülmektedir. D ve E karışımlarının elektrik alan altında diğer karışımlara (B, C, E, F, G, H, I) nazaran oldukça yüksek viskozite değerleri göstermiştir. Bu duruma, karışıma sadece nişasta tozu katkısının sebep olduğu tespit edilmiştir. A karışımının 3,5 kV/mm elektrik alan altında viskozite değeri 0,21 Pa s iken, E karışımın aynı elektrik alan altındaki viskozite değeri 45,19 Pa s'dır (yaklaşık 200 kat büyük). Bu durumun EEİ

deneylerinde dar işleme ortamında dielektrik akışı açısından (elektrot içerisinde akış) sorun oluşturabileceği düşünülmüştür. Karbon+nişasta tozu katkılı karışımlarında (F, G, H ve I) viskozite değerleri elektrik alan uygulamasıyla artmaktadır. Bu karışımlar içerisinde de var olan nişasta tozunun elektrik alanın artırılmasıyla birlikte viskoziteyi artırdığı düşünülmektedir. Yine bu karışımlarda 2,5 kV/mm elektrik alan uygulamasından büyük değerlerde viskozite ölçümü yapılamamıştır (ark oluşumu nedeniyle). Ayrıca sıcaklığın artmasıyla özellikle E karışımı içerisindeki nişasta tozları topaklanma yaparak viskoziteyi yaklaşık 2 kat artırdığı gözlemlenmiştir. ER deneyleri sonucunda, karbon ve nişasta tozu derişimlerinin artmasıyla viskozitenin artması beklenen bir durumdur. Derin delik



Şekil 8. Farklı karışımlar içinde döner elektrotla işlemede İİH-sıcaklık değişimleri  
(The MRR-temperature variations at machining with rotating electrode in different mixtures)



Şekil 9. Farklı karışımlar içinde dönmeyen elektrotla işlemede İİH-sıcaklık değişimleri  
(The MRR-temperature variations at machining with non-rotating electrode in different mixtures)

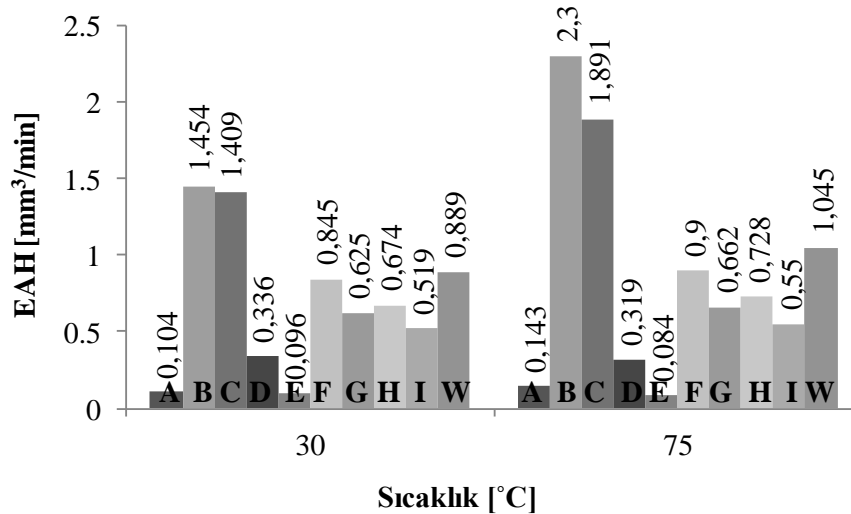
delme işlemlerinde ve karmaşık kalıp geometrilerinin işlenmesinde dielektrik sıvının (ER akışkan) geometrik detaylara kadar erişebilmesi için düşük viskoziteli olması gerekmektedir. Buna karşın, elektrik alanında dielektrik sıvı içerisindeki nişasta tanelerinin polarize olabilmesi ve döner elektrot yardımıyla metal yüzeylere çarptırılabilmesi (yüzeyi parlatması amaçlı) için nişasta toz derişiminin artması gerekmektedir. Fakat bu da, işleme ortamında dolaşımı zor olan yüksek viskoziteli bir dielektrik sıvı oluşturmaktadır. Dielektrik sıvı içerisine katılacak karbon tozları vasıtasıyla, elektrik alan içerisinde köprüler oluşturmak ve boşalım kıvılcımını daha küçük kıvılcımlara parçalayarak boşalım enerji yoğunluğu azaltması hedeflenmektedir. Bu sayede işleme ortamında daha küçük boyutlu ergime kraterlerinin oluşması (daha düşük yüzey pürüzlülüğü) sağlanabilecektir. Yapılan ER ve ısıtma deneyleri sonucunda kararlı EEİ koşullarının sağlanabilmesi için silikon yağı dielektrik içinde en fazla 30 g/l nişasta tozu ve 10-15 g/l aralığında karbon tozunun olması gerektiği sonucuna varılmıştır. Silikon yağı kullanılarak yapılan işleme deneylerinde, 2 mm'lik (dış çap) elektrottan daha küçük çaplardaki elektrotlarla silikon yağının 100°C'ye ısıtılmasına ve 150 bar püskürtme basıncına ayarlanmasına rağmen işleme gerçekleştirilememiştir. Silikon yağının suya nazaran koyu kıvamı, 1 mm'lik (dış çap) elektrot içerisinden püskürtülmesine/akışına engel olurken, suyun 1 mm'lik elektrottan rahatlıkla geçmekte olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuca göre, silikon yağının EEİ delik delme de küçük çaplarda (1 mm ve altı) kullanılamayacağı tespit edilmiştir.

### 3.2. EEİ Performans Çıktıları (EDM Performance Outputs)

Döner elektrotla yapılan işlemlerde (Şekil 8), silikon yağına karbon tozu katkısı İİH değerlerini artırırken, nişasta tozu katkısı İİH değerlerini düşürmüştür. Hem döner elektrotla hem de dönmeyen elektrotla işleme de su

dielektrik, katkısız silikon yağına (A) kıyasla/göre 30°C ve 75°C'de yaklaşık 9 kat daha hızlı işleme (daha yüksek İİH) elde edilmiştir. Elektrotun döndürülmesi sayesinde dönmeyen elektrotta (Şekil 9) kıyasla 30°C'deki tüm karışımlarda İİH değerlerinde %0,5 ile %16,84 arasında, 75°C'deki tüm karışımlarda %1,84 ile %20,1 arasında artış tespit edilmiştir. Genel olarak bakıldığında elektrotun döndürülmesi bütün karışımlarda İİH değerini artırmıştır (Şekil 8-9). Bu sonuç, Yılmaz vd.'nin çalışmasıyla örtüşmektedir [32]. Dönmeyen ve döner elektrotlarla yapılan işlemlerde silikon yağının A-I karışımlarında sıcaklık artışı, İİH değerini %17,65 ile %56,48 arasında artırmıştır (Şekil 8-9). Suyun sıcaklığında yapılan artış ise İİH değerini %9,5 ile %14,84 arasında artırmıştır. Yani, İİH değerlerini artırmak için silikon yağını ve karışımlarını (A-I) ısıtmak, suyu (W) ısıtmaktan daha etkili olduğu ve İİH'de daha yüksek artışa olanak sağladığı (sıcaklık artışı silikon yağında İİH'yi %56,48 artırırken suda sıcaklık artışı İİH'yi %14,84 artırmıştır) tespit edilmiştir (Şekil 8-9). Bu sonuca silikon yağının ER özelliklerinin sebep olduğu düşünülmektedir. Deneyler esnasında silikon yağının ısıtılmasıyla da koyu kıvamının ciddi oranlarda azalarak daha akışkan duruma geldi gözlemlenmiştir. İİH açısından silikon yağının suyla kıyaslanmasında, silikon yağının (A) ve karışımlarının (B-I) özellikle hızlı gerçekleştirilmesi gereken işlemlerde (EEİ'de hızlı delik delme) iyi bir dielektrik olamayacağı sonucuna varılmıştır.

Çalışmanın amaçları kısmında da belirtildiği üzere bu sonuca varabilmek için silikon yağının başka bir dielektrikle (su) kıyaslanmasının da oldukça kolaylık sağlayan bir karar olduğu görülmüştür (Şekil 8-9). Elektrotun döndürülmesiyle, 30°C'de karbon ve nişasta tozu katkılı F, H ve I karışımlarında EAH değerlerinde %6,5 ile %12,9 arasında, 75°C'de G, H ve I karışımlarında EAH değerlerinde %3,4 ile %5,9 arasında artış tespit



Şekil 10. Farklı karışımlar içinde döner elektrotla işlemede EAH-sıcaklık değişimleri  
(The EWR-temperature variations at machining with rotating electrode in different mixtures)



edilmiştir (Şekil 10). Dönmeyen elektrotla işlemede silikon yağına 10 g/l karbon tozu katkısı (B), 30°C ve 75°C için EAH değerini %661 ve %672 artırmıştır (Şekil 11). Silikon yağına 15 g/l karbon tozu katkısı (C), aynı sıcaklıklarda EAH değerini %577 ve %578 artırmıştır. Elektro-reoloji deneylerinde B ve C karışımları için 0,5 kV/mm elektrik alan değerinde aşırı iletkenlikten dolayı ark oluştuğundan ölçüm yapılamadığı belirtilmiştir. Bu çalışmada yapılan deneylerde uygulanan elektrik alanı ( $= (80 \text{ V}) / (30 \text{ } \mu\text{m})$ ) yaklaşık 2,7 kV/mm olup elektro-reoloji deneylerinde uygulanan elektrik alanından çok yüksektir. Diğer deyişle dielektrik ortam çok iletken hale geçmiştir. Deneylerde kullanılan bekleme süresinde ( $t_p$ ) dielektrik sıvı tamamen deiyonize olamadığından ark tipi vurumlar belirgin olarak artmış, bu da doğrudan EAH'yı artırmıştır. Çalışmada kullanılan elektriksel parametreler sabit olduğundan EAH değerini düşürmenin uygun yolu olarak karbon tozu konsantrasyonunun azaltılması öngörülmüştür.

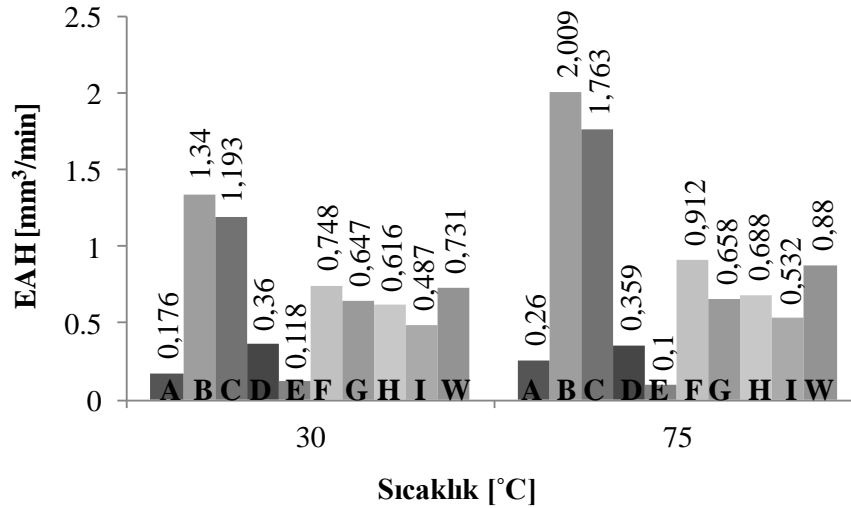
Özerkan çalışmasında [27], her ne kadar farklı elektriksel parametreler kullanılmış olsa da, gaz yağına 5 g/l karbon tozu katkısı EAH değerini %8 ile %55 arasında artırmıştır. Bu çalışmada dielektrik olarak kullanılan silikon yağına karbon tozu katkısı (10 g/l ve 15 g/l) iletkenlik açısından çok daha fazla etki göstererek EAH'yı %600 civarında artırmıştır. Bu durum, silikon yağındaki karbon tozu derişiminin diğer tip dielektriklere göre daha dikkatli ayarlanması gerektiği sonucunu ortaya çıkarmıştır. Dönmeyen ve döner elektrotla 30°C ve 75°C'de yapılan deneylerde silikon yağının nişasta tozu katkılı karışımlarının (D, E, F, G, H, I) diğer karışımlara nazaran daha düşük EAH değerleri verdiği ve bu sonuca göre nişasta tozu katkısının EAH'yı dengeleyici bir etki gösterdiği kanaatine varılmıştır. Bu durumun, nişasta tozunun karışımların (D-I) elektrik iletkenliğini düşürerek EAH'nin azalmasına yardımcı olduğu düşünülmektedir.

Diğer taraftan, dalma EEİ ile işlemeden farklı olarak EEİ ile delik delme de kullanılan elektrotlar sarf malzemeler oldukları için ve ayrıca EEİ ile delik delme işleminde EAH'nin, İİH ve  $R_a$  kadar kritik olmadığı göz önünde bulundurulduğunda silikon yağının yüksek EAH değerleri vermesinin kullanılabilirliği açısından sorun teşkil etmeyeceği düşünülmüştür. Dönmeyen ve döner elektrotla 30°C ve 75°C'de yapılan deneylerde silikon yağına 10 g/l karbon ve 15 g/l nişasta tozu katkılı karışım (F) diğer karışımlara göre en düşük  $R_a$  değerlerini vermiştir (Şekil 12-13). Dönmeyen ve döner elektrotla 30°C ve 75°C'de silikon yağı (A) ve karışımları (B-I) ile yapılan EEİ delik delme deneylerinde işlenmiş yüzeylerin  $R_a$ 'sı suya kıyasla daha düşük çıkmıştır (Şekil 12-13).

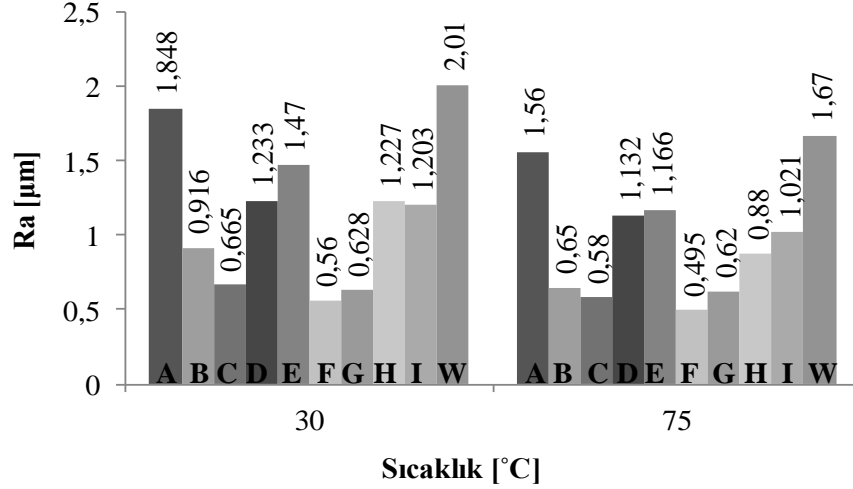
Bu sonuçlara göre, daha kalite/düzgün ve hassas (daha düşük  $R_a$ 'ya sahip yüzeyler) yüzeylerin işlenmesinde silikon yağının ve karışımlarının kullanılabilir bir dielektrik olabileceği görülmüştür. Hatta en düşük  $R_a$  değeri (0,495  $\mu\text{m}$ ) 75°C'de F karışımında döner elektrotla işlemede elde edilmiş ve bu değer, katkısız silikon yağına (A) kıyasla yaklaşık %69 daha düşük olduğu görülmüştür (Şekil 12). Yani, silikon yağına yapılan karbon ve nişasta tozu katkılarının işleme yüzeylerini daha da iyileştirdiği sonucuna varılmıştır. Ayrıca silikon yağının (A) ve karışımlarının (B-I) ısıtmak ve elektrotu döndürmek  $R_a$ 'yı azalttığı tespit edilmiştir (Şekil 12-13).

### 3.3. Mikroyapı İncelemesi (Microstructure Investigation)

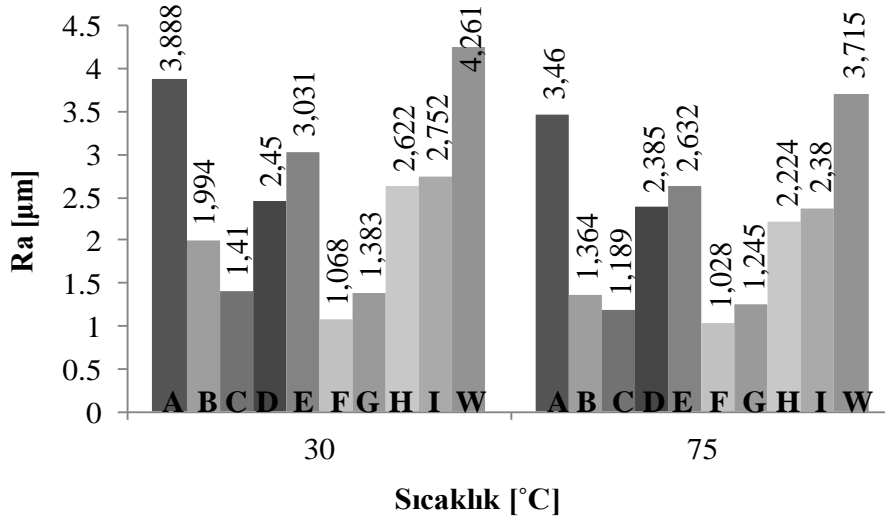
Bu çalışmada, silikon yağı içerisine karıştırılan nişasta ve karbon tozu yanında silikon yağının yüksek sıcaklıklara kadar problemsiz ısıtılabilmesi sayesinde ısıtmanın, karıştırılan tozların ve toz derişimlerinin yüzey topoğrafyasının değişimine etkisi incelenebilmiştir.



Şekil 11. Farklı karışımlar içinde dönmeyen elektrotla işlemede EAH-sıcaklık değişimleri  
(The EWR-temperature variations at machining with non-rotating electrode in different mixtures)



**Şekil 12.** Farklı karışımlar içinde döner elektrotla işlemede  $R_a$ -sıcaklık değişimleri  
(The  $R_a$ -temperature variations at machining with rotating electrode in different mixtures)

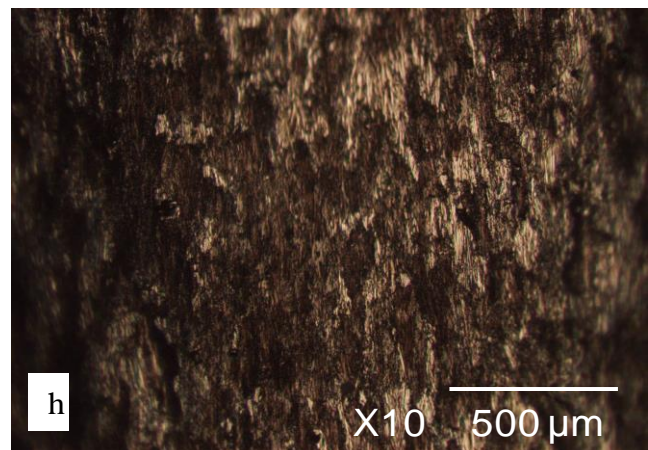
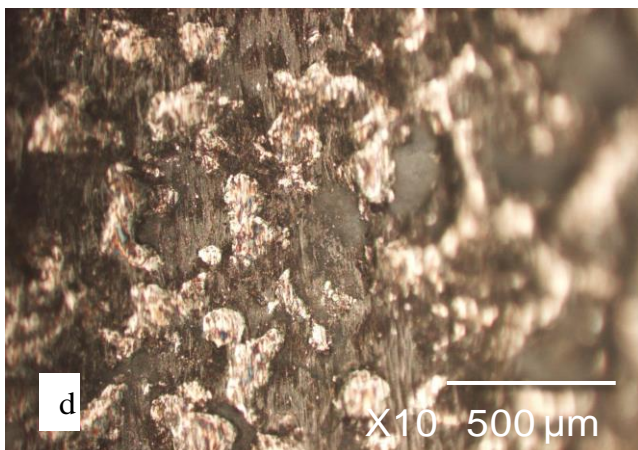
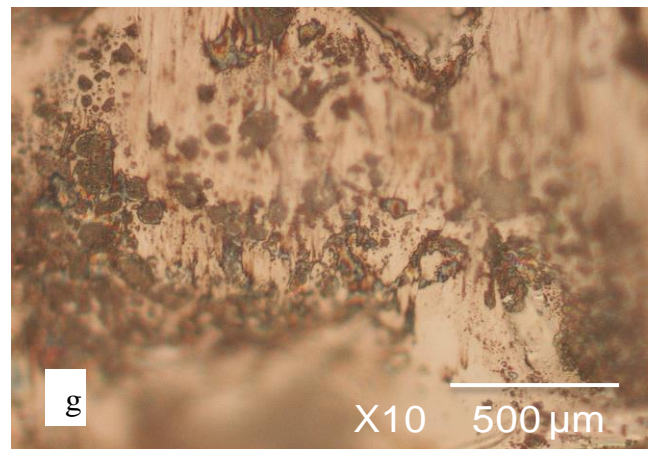
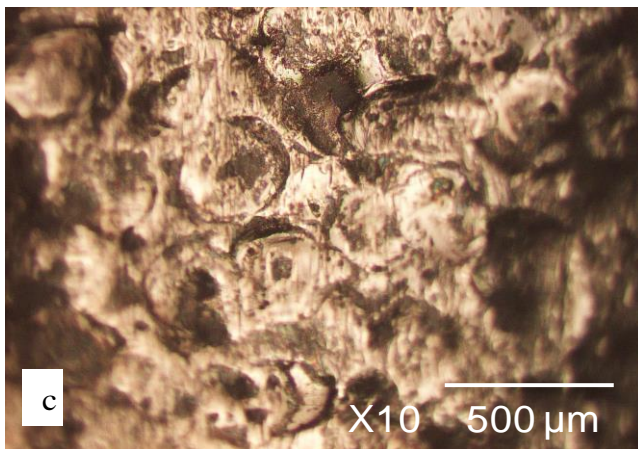
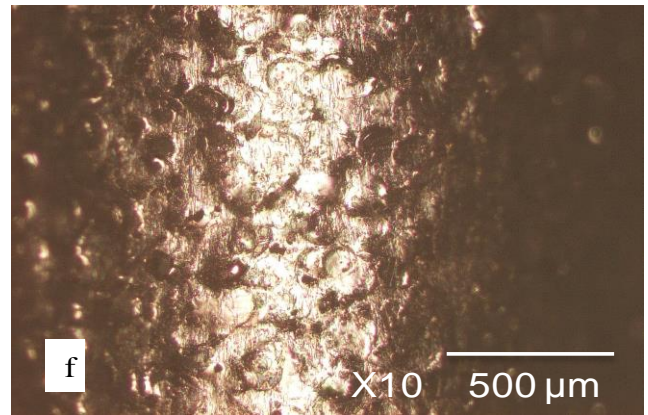
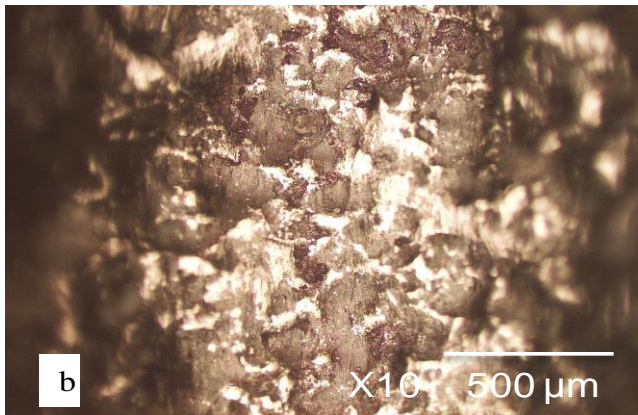
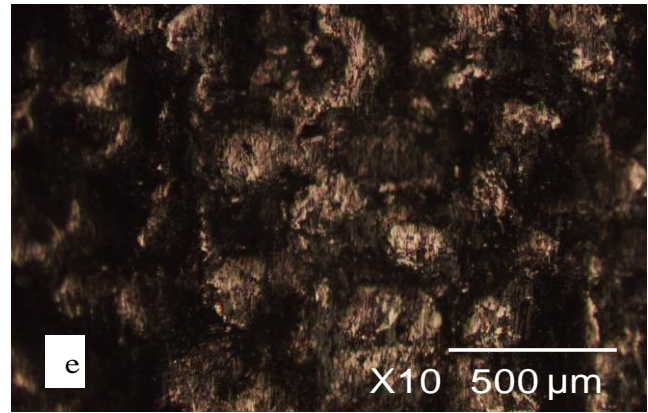
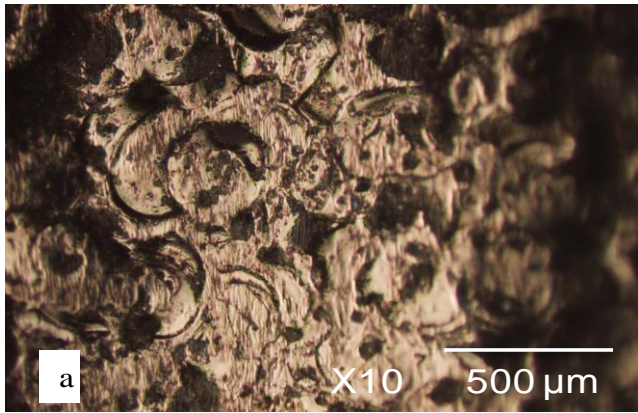


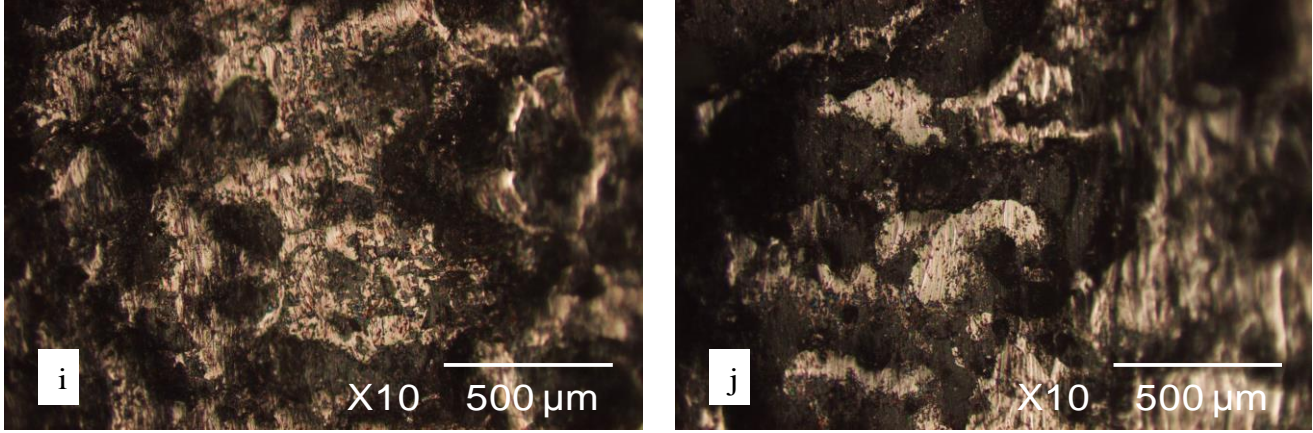
**Şekil 13.** Farklı karışımlar içinde dönmeyen elektrotla işlemede  $R_a$ -sıcaklık değişimleri  
(The  $R_a$ -temperature variations at machining with non-rotating electrode in different mixtures)

Şekil 14'de Silikon yağı (A) ve karışımlarıyla (B-I) ve suyla (W) 140 bar basınçta ve sabit EEİ parametreleriyle ( $I_d=3$  A,  $t_d=25$   $\mu$ s ve  $t_p=50$   $\mu$ s) işlenmiş yüzeylerin optik (ışık) mikroskobu fotoğrafları görülmektedir. Burada, karbon tozu katkılı olan B (10 g/l) ve C (15 g/l) karışımlarıyla (Şekil 14b-14c), her ikisi de sadece nişasta tozu katkılı olan D (15 g/l) ve E (30 g/l) karışımlarıyla (Şekil 14d-14e) ve ayrıca G-H-I karışımlarıyla (Şekil 14g-14h-14i) işlenmiş yüzeylerin optik (ışık) mikroskobu fotoğrafları, oldukça yakın görsel özellikler sergilediği ve kıyaslama açısından anlamlı farkların oluşmadığı görülmüştür. Fakat Şekil 14a-14b-14f-14j'ye bakıldığında daha belirgin farklılıkların olduğu gözlemlenebilir. Buna göre, döner elektrotla 75°C'de katkısız silikon yağıyla (A) yapılan işlemede, iş parçası yüzeyinde geniş kraterler görülmektedir (Şekil 14a). Silikon yağına 10g/l karbon tozu katkısı (B) birim alanda daha çok sayıda ancak daha sığ ve küçük çaplı kraterler

oluşmasını sağlamış, yüzey tepelerinin sivri uçları yuvarlanmıştır (Şekil 14b). Silikon yağına 10 g/l karbon ve 15 g/l nişasta tozu katkılı karışımla (F) yapılan işlemede iş parçası yüzeyindeki kraterlerin sivri uçları oldukça azalmış ve iş parçası yüzeyi nişasta tozunun aşındırma (cılama) etkisi sayesinde daha parlak bir görüntü almıştır (Şekil 14f). Daha önce Tsai vd. [33] EEİ dışı bir uygulama çalışmalarında da benzer bir parlatma etkisi sağlanmıştı. 75°C'de döner elektrot ve su (W) dielektrikle yapılan işlemede iş parçası yüzeyinde karbon kalıntılarının yoğun olduğu kratersi yapı ve oldukça derin vadiler dikkat çekmektedir (Şekil 14j).

Su dielektrikle işlenmiş yüzeydeki karbon birikimleri ve derin vadiler, bu dielektriğin yüksek İİH değerleri vermesine rağmen düşük  $R_a$  istenen yüzeylerin işlenmesinde sıkıntılar oluşturabileceğini göstermiştir.





**Şekil 14.** 75°C'deki farklı karışımlar içinde döner elektrotla işlenmiş işparçalarının delik yüzey görüntüleri: a) A, b) B, c) C, d) D, e) E, f) F, g) G, h) H, i) I ve j) W  
(The hole surface images of machined workpiece with rotating electrode in different mixtures at 75°C: a) A, b) B, c) C, d) D, e) E, f) F, g) G, h) H, i) I and j) W)

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu deneysel çalışmada, EEİ delik delmede ortası delik döner bir elektrot içerisinde geçirilen silikon yağının (diğer hidrokarbon esaslı dielektriklere nazaran insan ve çevre sağlığına zararsız) işleme/çıktı performansı (İİH, EAH,  $R_a$  ve yüzey topoğrafyası) araştırılmıştır. Ayrıca silikon yağının işleme sırasında yoğun bir elektrik alan içerisinde olması nedeniyle, farklı oranlarda toz katkılarına sahip silikon yağı karışımlarının farklı elektrik alanlar altındaki ER davranışları da incelenmiştir. Çalışmada, silikon yağındaki karbon ve nişasta tozu derişim oranlarının, silikon yağının ısıtılmasının ve elektrot dönüşünün performans çıktıklarına olan etkilerinin daha rahat araştırılabilmesi için EEİ parametreleri (boşalım akımı, vurma süresi, bekleme süresi, polarite ve dielektrik püskürtme basıncı) sabit değerler alınmıştır. Silikon yağının (A) ve farklı formülasyonlarına sahip karışımlarının (B-I), EEİ ile delik delmede performans çıktıkları açısından kıyaslanabilmesi için farklı bir dielektrik olarak suyun da kullanıldığı bu çalışmada, silikon yağı ile su arasında herhangi bir tercih yapılmaksızın aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

EEİ ile delik delmede daha önce dielektrik sıvı olarak denenmemiş olan silikon yağı denenmiş ve dielektrik sıvı olarak kullanılabilceği anlaşılmıştır. Elde edilen İİH değerlerine bakıldığında, her ne kadar silikon yağıyla yapılan işlemlerin İİH değerleri, piyasada sıklıkla kullanılan su, gazyağı ve benzeri hidrokarbon esaslı dielektrik sıvılarınkine kıyasla düşük olsa da, silikon yağının; a) yüksek miktarda karbon ve nişasta tozlarını homojen bir süspansiyon olarak tutabilmesi, b) diğer yaygın dielektriklere göre çok daha yüksek sıcaklıklara ısıtılabilmesi (silikon yağının parlama noktası 300 °C), c) diğer ticari dielektrikler gibi işleme esnasında zehirli gazlara sebep olmayarak çevre ve insan sağlığına zararsız olması, ve d) düşük maliyeti gibi avantajlarının göz ardı

edilmemesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Farklı derişimlerde karbon ve nişasta tozlarıyla yapılan elektro-reoloji ve dielektrik ısıtma deneyleri sonucunda kararlı işleme koşullarının sağlanabilmesi için silikon yağı dielektrik içinde en fazla 30 g/l nişasta tozu olması gerektiği tespit edilmiştir. Silikon yağı kullanılarak yapılan işleme deneylerinde, 2 mm'lik (dış çap) elektrottan daha küçük çaplardaki elektrotlarla işlemin gerçekleştirilememiştir. Ayrıca, silikon yağının EEİ ile delik delme de küçük çaplarda (1 mm ve altı) kullanılmayacağı tespit edilmiştir. Dönmeyen ve döner elektrotla yapılan işlemlerde karbon tozu katkılı silikon yağı karışımlarında, yüksek İİH değerleri elde edilirken, nişasta tozu katkılı silikon yağı karışımlarında düşük İİH değerleri elde edilmiştir. İİH değerlerini artırmak için silikon yağının ve karışımlarının (A-I) ısıtmak, suyu (W) ısıtmaktan daha etkili olduğu ve İİH'de daha yüksek artışa olanak sağladığı (sıcaklık artışı silikon yağında İİH'yi %56,48 artırırken suda sıcaklık artışı İİH'yi %14,84 artırmıştır) tespit edilmiştir. İİH açısından silikon yağının suyla kıyaslanmasında, silikon yağının (A) ve karışımlarının (B-I) özellikle hızlı gerçekleştirilmesi gereken işlemlerde (EEİ'de hızlı delik delme) iyi bir dielektrik olamayacağı sonucuna varılmıştır. Silikon yağı ve karışımları (A-I) ve su dielektriklerin tümü göz önüne alındığında, döner elektrotla yapılan deneylerde dönmeyen elektrota göre daha yüksek İİH değerleri elde edilmiştir. Hem dönmeyen hem de döner elektrotla silikon yağı karışımları (A-I) ve su dielektrikle yapılmış işleme deneylerinin tümü değerlendirildiğinde, dielektrik sıvı sıcaklığının 30°C'den 75°C'ye çıkarılması İİH değerlerini genel olarak artırdığı tespit edilmiştir. Dalma EEİ ile işlemeden farklı olarak EEİ ile delik delme de kullanılan elektrotlar sarf malzemeler oldukları için ve ayrıca EEİ ile delik delme işleminde EAH'nin, İİH ve  $R_a$  kadar kritik olmadığı göz önünde bulundurulduğunda silikon yağının yüksek EAH değerleri vermesinin dielektrik sıvı olarak kullanılabilirliği açısından sorun teşkil etmeyeceği

sonucuna varılmıştır. Döner elektrot kullanıldığında ve silikon yağına 10 g/l karbon ve 15 g/l nişasta tozu katkısı (F karışımı) yapıldığında saf silikon yağına (A) kıyasla  $R_a$ 'da yaklaşık %69 iyileşme (düşüş) sağlanmıştır. En düşük  $R_a$  değeri de bu karışımda elde edilmiştir (0,495  $\mu\text{m}$ ). Silikon yağını ve toz katkılı karışımlarını ısıtmak ve elektrotu döndürmek  $R_a$  değerlerini iyileştirmiştir. Ayrıca, yüzey pürüzlülüğünü iyileştirmede, silikon yağına tek başına nişasta tozu katkısı yerine karbon ve nişasta tozu katkısının daha etkili olduğu tespit edilmiştir. Silikon yağı ve su,  $R_a$  açısından kıyaslandığında silikon yağının daha iyi bir dielektrik olabileceği kararına varılmıştır. Delik yüzeylerinin mikroyapı incelemelerinde, silikon yağına 10 g/l karbon tozu katıldığında iş parçası yüzeyinde oluşan kraterlerin daha sığ ve küçük çaplı olduğu, yüzey kraterleri yanında görülen tepelerin uçlarının yuvarlaklaştığı tespit edilmiştir. Yüzey topoğrafyasındaki bu değişimler sonucunda daha düşük  $R_a$  değerleri elde edilmiştir. Silikon yağına 10 g/l karbon ve 15 g/l nişasta tozu katkısıyla oluşturulan karışım (F karışımı) ile yapılan işlemede işparçası yüzeyindeki kraterlerin sivri uçları daha da yuvarlaklaşmış ve işparçası yüzeyi nişasta tozu sayesinde daha parlak bir görünüme sahip olmuştur.

## 5. SİMGELER (SYMBOLS)

h:	Delik derinliği [mm]
E:	Elektrik alan [kV/mm]
$I_d$ :	Boşalım akımı [A]
$R_a$ :	Ortalama yüzey pürüzlülüğü [ $\mu\text{m}$ ]
$t_s$ :	Vurum süresi [ $\mu\text{s}$ ]
$t_p$ :	Bekleme süresi [ $\mu\text{s}$ ]

## 6. KISALTMALAR (ABBREVIATIONS)

DTA:	Diferansiyel termogravimetrik analiz
EAH:	Elektrot aşınma hızı [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]
EEİ:	Elektro erozyon ile işleme
ER:	Elektro reoloji
İİH:	İş parçası işleme hızı [ $\text{mm}^3/\text{min}$ ]
TGA:	Termo gravimetrik analiz
TKEEİ:	Toz katkılı elektro erozyon ile işleme

## TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGEMENT)

Bu proje 111M596 no'lu TÜBİTAK proje desteğinde gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, TÜBİTAK'a verilen destekten dolayı teşekkür ederler.

## KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Sarıkavak Y., Çoğun C., Thermal Modelling of Machining Mechanism in Electrical Discharge Machining, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 25 (3), 517-531, 2010.
2. Singh A.K., Kumar S., Singh V.P., Effect of the addition of conductive powder in dielectric on the surface properties of superalloy Super Co 605 by EDM

- process, International Journal Advanced Manufacturing Technol, 77 (2), 99-106, 2015.
3. Hourmand M., Farahany S., Sarhan A.A.D., Noordin, M. Y., Investigating the electrical discharge machining (EDM) parameter effects on Al-Mg2Si metal matrix composite (MMC) for high material removal rate (MRR) and less EWR-RSM approach, International Journal Advanced Manufacturing Technol, 77 (2), 831-838, 2015.
4. Unses E., Cogun C., Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric, Strojnicki Vestnik-Journal of Mechanical Engineering, 61 (6), 409-418, 2015.
5. Kumar H., Development of Mirror Like Surface Characteristics Using Nano Powder Mixed Electric Discharge Machining (NPMEDM), International Journal Advanced Manufacturing Technol, 76, 105-113, 2015.
6. 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 (2), 30-40, 1998.
7. Reddy V.V., Valli P.M., Kumar A., Reddy C. S., Multi-objective Optimization of Electrical Discharge Machining of PH17-4 Stainless Steel with Surfactant-mixed and Graphite Powder-mixed Dielectric Using Taguchi-data Envelopment Analysis-based Ranking Method, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers-Part B, Journal of Engineering Manufacture, 229 (3), 487-494, 2015.
8. Gülcan O., Usulan İ., Usta Y., Çoğun C., Effect of Use of Cu-Cr P/M Electrodes on Machining Performance of Electric Discharge Machining, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30 (3), 381-394, 2015.
9. Chen S.L., Lin M. H., Huang G X., Wang C.C., Research of the Recast Layer on Implant Surface Modified by Micro-current Electrical Discharge Machining Using Deionized Water Mixed with Titanium Powder as Dielectric Solvent, Applied Surface Science, 311, 47-53, 2014.
10. 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.
11. Das A., Misra J.P., Experimental Investigation on Surface Modification of Aluminum by Electric Discharge Coating Process Using TiC/Cu Green Compact Tool-electrode, Machining Science and Technology, 16 (4), 601-623, 2012.
12. 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 (2), 33-38, 1998.
13. Kumar D., Mittal K., Kataria S., Kadiyan S., Sharma S., Experimental Investigation on Surface Modification of WC-Co by Electric Discharge Coating Process Using SiC/Cu Green Compact Tool-electrode, International

- Journal of Research in Mechanical Engineering and Technology, 3 (2), 274-278, 2013.
14. Reddy V.V., Kumar A., Valli P.M., Reddy C. S., Influence of Surfactant and Graphite Powder Concentration on Electrical Discharge Machining of PH17-4 Stainless Steel, Journal of the Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering, 37 (2), 641-655, 2015.
  15. Peng H., Yu D., Zhang X., Wang S., Wen Y., Fabrication of Hollow Nickel Micro-spheres with High Degree of Hallowness by Silicon Powder-mixed Spark Erosion, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 85, 131-134, 2014.
  16. Singh B., Kumar J., Kumar S., Influences of Process Parameters on MRR Improvement in Simple and Powder-Mixed EDM of AA6061/10%SiC Composite, Materials and Manufacturing Processes, 30 (1), 303-312, 2015.
  17. 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 (2), 138-144, 2001.
  18. Singh A.K., Kumar S., Singh V.P., Optimization of Parameters Using Conductive Powder in Dielectric for EDM of Super Co 605 with Multiple Quality Characteristics, Materials and Manufacturing Processes, 29 (3), 267-273, 2014.
  19. Singh B., Kumar J., Kumar S., Experimental Investigation on Surface Characteristics in Powder-Mixed Electrodischarge Machining of AA6061/10%SiC Composite, Materials and Manufacturing Processes, 29, 287-297, 2014.
  20. 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.
  21. 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, 34-42, 2001.
  22. Bai X., Zhang Q., Zhang J., Kong D., Yang T., Machining Efficiency of Powder Mixed Near Dry Electrical Discharge Machining Based on Different Material Combinations of Tool Electrode and Workpiece Electrode, Journal of Manufacturing Processes, 15, 474-482, 2013.
  23. Sidhu S.S., Batish A., Kumar S., Study of Surface Properties in Particulate-Reinforced Metal Matrix Composites (MMCs) Using Powder-Mixed Electrical Discharge Machining (EDM), Materials and Manufacturing Processes, 29, 46-52, 2014.
  24. 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.
  25. Çoğun C., Özerkan B., Karaçay T., An Experimental Investigation on Effect of Powder Mixed Dielectric on Machining Performance in Electric Discharge Machining (EDM), Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 220 (7), 1035-1050, 2006.
  26. Uno Y., Okada A., Surface Generation in Electrical Discharge Machining with Silicon Powder Mixed Fluid, International Journal of Electrical Machining, 2, 13-18, 1997.
  27. Özerkan H.B., Elektro erozyon ile işlemede toz karışımli dielektrik sıvının işleme performansına etkisinin deneysel incelenmesi, Yüksek Lisans tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 1-63, 2003.
  28. Urtekin L., Uslan İ., Tuç B., Investigation of Properties of Powder Injection-Molded Steatites, Journal of Materials Engineering and Performance, 21 (3), 358-365, 2012.
  29. Urtekin L., Uslan İ., Tuç B., Investigation of Effect of Feedstock Rheologies for Injection Molding of Steatite, Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 27 (2), 333-341, 2012.
  30. Yılmaz O., Bozdana A.T., Okka M.A., An Intelligent and Automated System for Electrical Discharge Drilling of Aerospace Alloys: Inconel 718 and Ti-6Al-4V, International Journal Advanced Manufacturing Technol, 74, 1323-1336, 2014.
  31. Yılmaz O., Okka M.A., Effect of Single and Multi-channel Electrodes Application on EDM Fast Hole Drilling Performance, International Journal Advanced Manufacturing Technol, 51, 185-194, 2010.
  32. Yılmaz V., Sarıkaya M., Dilipak H., Deep Micro-Hole Drilling for Hadfield Steel by Electro-Discharge Machining (EDM), Materiali in tehnologije/Materials and technology, 49 (3), 377-386, 2015.
  33. Tsai Y.Y., Tseng C.H., Chang C.K., Development of a Combined Machining Method Using Electrorheological Fluids for EDM, Journal of Materials Processing Technology, 201, 565-569, 2008.