

Araştırma Makalesi – Research Article

TiO₂ Katkılı Çevre Dostu Dielektrik Sıvının Elektro Erozyon Delik Delme Performanslarının Araştırılması

Oğuz Erdem^{1*}, Süleyman Kılıç²

Geliş / Received: 02/04/2020

Revize / Revised: 25/06/2020

Kabul / Accepted: 29/06/2020

ÖZ

Bu çalışmada iş parçası olarak AISI4140 çeliği, elektrot olarak 2 mm dış çapa sahip ortası tek delik bakır tüp, dielektrik sıvı olarak ise yüksek parlama noktasına ve düşük viskoziteye sahip Eurolub EDM ER100 çevreci tip elektro erozyon sıvısı kullanılmıştır. ER100 içerisine farklı derişim oranlarında (katkısız, 5 g/l ve 10 g/l) katılan TiO₂ tozunun hassas (M1), orta (M2) ve kaba (M3) işleme koşullarında elektro erozyon ile işleme (EEİ) çıktı performansları (iş parçası işleme hızı (İİH), elektrot aşınma hızı (EAH), bağıl aşınma (BA) ve ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a)) üzerine etkileri araştırılmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %30,48’lik bir artış elde edilmiştir. Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %57,03’lük bir işleme hızı artışı sağlanmıştır. Elektrotu döndürmek İİH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %99,5 artış sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %13,75 ve M3 işleme tipinde ortalama %9,38 oranlarında artışlara olanak sağlamıştır. TiO₂ tozu katkısıyla hem sabit hem de döner elektrotla yapılan deneylerde, M1 ve M2 işleme tiplerinde elektrot aşınması azalırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte elektrot aşınmasının arttığı sonucuna varılmıştır. BA değerlerinin tıpkı EAH değerleri gibi özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %5,27, M2 için %8 ve M3 için %2,95 oranlarında azaltmıştır. Yine, 10 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %8,15, M2 için %15,07 ve M3 için %6,21 oranlarında azalttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler- Elektro Erozyon Delik Delme, Çevre Dostu Dielektrik Sıvı, TiO₂

^{1*}Sorumlu yazar iletişim: oguz.erdem@ahievran.edu.tr (<https://orcid.org/0000-0002-8094-3222>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bağbaşı Mah. Sahir Kurutluoğlu Cad. No:100 Kırşehir

²İletişim: suleymankilic@gmail.com (<https://orcid.org/0000-0002-1681-9403>)

Makine Mühendisliği Bölümü, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi, Bağbaşı Mah. Sahir Kurutluoğlu Cad. No:100 Kırşehir

Investigation of Electrical Discharge Drilling Performances of TiO₂ Mixed Eco-friendly Dielectric Liquid

ABSTRACT

In this study, AISI4140 steel was used as a workpiece, a single hole copper tube with an outer diameter of 2 mm as the electrode, and Eurolub EDM ER100 environmentally friendly type erosion fluid with a high flash point and low viscosity as a dielectric liquid. The effects of TiO₂ powder, which was added to ER100 at different concentration rates (no added, 5 g/l and 10 g/l), on electrical discharge machining (EDM) output performances (workpiece removal rate (WRR), electrode wear rate (EWR), relative wear (RW) and average surface roughness (R_a)) under sensitive (M1), medium (M2) and rough (M3) machining conditions were investigated. By the agency of 5 g/l TiO₂ powder addition into the dielectric liquid, an average increase of 30.48% was achieved in terms of WRR in all three machining types. Again, with a 10 g/l TiO₂ powder addition into the dielectric liquid, an average machining rate increase of 57.03% was achieved for all three machining types. Rotating the electrode redundant provided an average of 99.5% increase for M1 machining type on WRR values, while an average of 13.75% increase in M2 machining type and an average of 9.38% increase in M3 machining type. In experiments with both fixed and rotary electrodes with TiO₂ powder addition, it has been concluded that electrode wear decreases for M1 and M2 machining types while only for M3 machining type with 10 gram TiO₂ powder added dielectric, electrode wear increases. It was determined that RW values exhibit features just like EWR values. The 5 g/l TiO₂ powder addition into the dielectric fluid had reduced R_a values by 5.27% for M1, 8% for M2 and 2.95% for M3. Also, 10 g/l TiO₂ powder addition was found to reduce R_a values by 8.15% for M1, 15.07% for M2 and 6.21% for M3.

Keywords- *Electrical Discharge Drilling, Eco-Friendly Dielectric Liquid, TiO₂*

I. GİRİŞ

İnsanlar tarafından elektriksel boşalımların (kıvılcım) aşındırıcı etkisi 1770'lerden beri bilinmektedir [1]. 1943 yılında, bilim adamı Lazarenko tarafından geliştirilen kontrol devresiyle ilk olarak dalma elektro erozyon tezgahının temelleri atılmıştır [2]. Elektro erozyon ile işleme (EEİ) yönteminde, yalıtkan bir dielektrik ortam içerisinde birbiriyle temas etmeyen elektrot ve işparçasına uygulanan elektrik akımının oluşturduğu elektriksel kıvılcımlar sayesinde işleme gerçekleşir [3]. Kıvılcımın oluşturduğu plazma kanalındaki elektron bombardımanı sayesinde işparçası yüzeyinde bulunan belirli bir alanın sıcaklığının artması sonucunda ergime ve buharlaşma gerçekleşir ve böylece o bölgedeki malzeme/talaş kaldırılır [4]. EEİ, termal bir proses olduğu için işparçasının sertlik değerinin işlenebilirlik açısından hiçbir önemi yoktur [5]. Yöntem başlangıçta sadece iletken malzemelerin işlenmesi için tercih edilse de [6], günümüzde geliştirilen yardımcı iletken elektrot metodu ile artık yalıtkan seramikleri bile işlemek mümkün olabilmektedir [7]. SiC [6] ve ZTA-TiC gibi seramiklerin [8] yanı sıra, karbon fiber takviyeli plastikler [9] de artık EEİ yöntemiyle işlenebilmektedir. EEİ yöntemi; dalma elektro erozyon [10], elektro erozyon ile delik delme [11], tel elektro erozyon [12], mikro tel elektro erozyon [13], toz katkılı dielektrikle EEİ [14], mikro-EEİ [15], kuru EEİ [16, 17], kuruya yakın EEİ [18, 19] ve üç faz içeren (katı-sıvı-gaz) dielektrikle EEİ [20] olarak sınıflandırılabilir. Geliştirilmiş bu EEİ teknikleriyle, günümüzün kalıpcılık sanayinde, savunma sanayinde, uçak ve uzay sanayinde, elektronik sanayinde, tıp ve biomedikal sektörlerinde ihtiyaç duyulan yüksek kaliteli parçaların imalatları mümkün olmaktadır [21, 22].

Düşük işparçası işleme hızı (İİH) ve yüksek elektrot aşınma hızı (EAH) neticesinde yüksek bağlı aşınma (BA) değerleri, işlenmiş yüzeylerde yüksek ortalama yüzey pürüzlülüğü (R_a) değerleri ve mikro çatlaklar içeren tekrardan katılmış katmanlar, EEİ yönteminin dezavantajları olarak özetlenebilir [23]. Bu gibi handikapların üstesinden gelebilmek için her geçen gün yeni çözümler EEİ yöntemine dahil edilmektedir [24]. Bunlar: dielektrik sıvıya toz katkısı [25], dielektrik sıvıyı ısıtma [26], farklı tipte dielektrik sıvı kullanımı [27], dielektrik sıvı içerisine aşındırıcı madde katkısı [28], döner elektrot kullanımı [29], farklı tipte elektrot kullanımı [30] ve işleme bölgesinde manyetik alan oluşturma [31] olarak örneklendirilebilir. Literatürdeki birçok çalışmada toz katkılı EEİ (TKEEİ) metodunun kullanılmasıyla; İİH'nin arttığı [32], toz parçaların boşalım enerjisini dağıtarak verimliliği artırdığı [33] ve geleneksel EEİ ile işlenmiş parçalara nazaran daha üstün yüzey özelliklerinin sergilendiği [34] rapor edilmiştir. TKEEİ üzerine yapılmış araştırmaların çoğu Al [25, 29], Cu [33], Al_2O_3 [5], B_4C [28], grafit [10, 26], SiC [32], TiO_2 [35] gibi tozları kapsarken, son zamanlarda nano boyutta karbon nanotüp [24] ve grafit oksit pulları [36] gibi farklı formlardaki katkılarda dielektrik sıvılara yapılmaktadır.

TKEEİ üzerine literatürde çok sayıda çalışma mevcuttur. Örneğin; Wang ve arkadaşlarının çalışmasında, EEİ yağına 10 g/l Al tozu katkısı, Inconel 706 işparçalarının aynı işleme parametrelerinde İİH hızını 0,135 mm³/min değerinden 0,283 mm³/min değerine çıkardığı belirtilmiştir. Fakat, Al tozu katkısının EAH değerini farklı işleme koşullarında %6,25 ile %13,7 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Al tozu katkısının yüzey pürüzlülüğü değerlerini %25,9 oranında azalttığı da rapor edilmiştir [25]. Yine, Paul ve arkadaşlarının çalışmasında, dielektrik sıvı içerisine katılan 400 mesh boyutuna sahip Cu tozlarının, özellikle yüksek işleme parametrelerinde Inconel 718 işparçası yüzeyinde Ni_3Nb oluşumunu artırdığı ve bu sayede mikro çatlakları azaltarak işlenmiş yüzeylerde iyileşme sağladığı belirtilmiştir [33]. Kumar ve arkadaşlarının çalışmasında ise, Inconel 825 işparçasının işlenmesinde, dielektrik sıvıya iletken olmayan nano boyuttaki Al_2O_3 tozu katkısının, İİH değerini %57 oranında artırdığı ve işlenmiş yüzeyin R_a değerini 1,487 μm 'ye kadar düşürülebildiği belirtilmiştir. Çalışmada elde edilen bu yüzey pürüzlülüğü değerinin, toz katkısız dielektrikler kullanılarak işlenmiş işparçalarıyla karşılaştırıldığında %63 oranında bir azalmanın olduğu tespit edilmiştir [5].

TiO_2 malzemesi kararlı fiziksel ve kimyasal özelliklere sahip, korozyon direnci yüksek ve foto-katalitik etkilere sahip olduğu için genellikle antibakteriyel ve antiseptik uygulamalarda tercih edilmektedir. Ayrıca, TiO_2 nano partiküllerinin mükemmel oksidasyon yetenekleri sayesinde organik kirleri ve bakterileri çürütebilme özellikleri mevcut olduğu için sağlık alanında sıkça kullanılmaktadır. Yine, TiO_2 malzemesinin bunlar haricinde birçok alanda farklı uygulamaları da mevcuttur [37]. TiO_2 malzemesinin EEİ alanındaki uygulamalarına bakıldığında; Baseri ve arkadaşları, H13 çeliği işparçaları ve 200 dev/min hızla dönen bakır elektrotlar kullanarak gaz yağı dielektrik içerisine 0-1-2-3 g/l oranlarında nano boyutta TiO_2 tozu katkısıyla 2,5-6-9 A boşalım akımı ve 35-50-100 μs vurum süreleri değerleriyle deneysel çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Deneysel çalışmalar sonucunda, gaz yağı içerisine 1 g/l TiO_2 tozu katkısı, İİH değerlerini tüm işleme koşullarında

artırırken 1 g/l katkı oranından sonraki her TiO_2 tozu katkısı, işparçası ve elektrot arasında anormal boşalımını artırdığını tespit etmişlerdir. Bu sebepten, 1 g/l katkı oranından sonraki toz katkısı tüm işleme koşulları için İİH değerlerini düşürdüğünü belirtmişlerdir. Artan toz konsantrasyonunun EAH değerlerini düşürdüğünü de rapor etmişlerdir. Diğer bir taraftan, artan toz konsantrasyonunun işleme bölgesinde talaş yığılmasına engel olarak işlenmiş yüzeylerde parlatma etkisi oluşturduğunu ifade etmişlerdir [35].

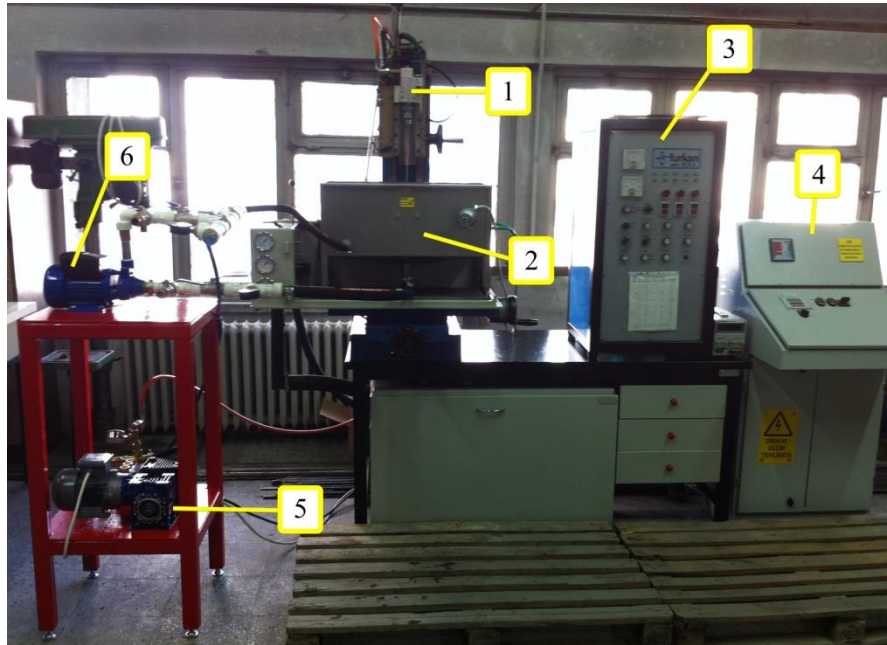
Dielektrikler, EEİ yönteminde kritik rol oynarlar. Dielektriklerin genellikle, işparçası ve elektrot arasındaki kıvılcımın gerçekleşmesine zemin hazırlama ve iyonizasyona olanak sağlama görevlerinin yanı sıra [38], işleme sonrası işparçasının soğumasına ve işleme artıklarının ortamdan uzaklaştırılmasına katkıda bulunma görevleri de vardır [27]. EEİ’de kullanılan dielektrik ortamlar temelde üç kategoride sınıflandırılırlar. Bunlar: a) hidrokarbon esaslı yağlar, b) su bazlı dielektrikler ve c) gaz bazlı dielektrik akışkanlardır [39]. EEİ için alternatif dielektrik ortamlar olarak; atık sebze yağı, jatropha yağı, kanola yağı, ayçiçek yağı, hindistan cevizi yağı, zeytin yağı ve diğer bio-dönüşümlü yağlar da ayrıca kullanılmaktadır. EEİ’de işleme öncesi, doğru dielektriğin seçimi hem İİH açısından hem de çevresel faktörler açısından kritik önem arz etmektedir [40]. EEİ yönteminde işleme esnasında ulaşılan yüksek sıcaklıklar yüzünden hidrokarbon esaslı yağların bozunarak açığa çıkardıkları hidrojen gazı, işleme aralığını ve çalışma voltajını olumsuz yönde etkilemektedir [41]. Dahası, termal enerjiyle bozulan hidrokarbon esaslı yağların oluşturduğu aerosoller ve gazların, canlılar tarafından solunması ve teması, ciddi bağırsak problemlerine neden olabilmektedir. Yine, hidrokarbon esaslı dielektrikler içerisinde, insan ve çevre sağlığını olumsuz yönde etkileyebilecek birçok zehirli bileşiklerin olduğu yapılan araştırmalarla tespit edilmiştir [42]. EEİ sanayisinde dielektrik sıvı olarak; gaz yağı (kerosene), özel üretilmiş EEİ yağları (örneğin; Shell firmasının yağları) ve sentetik yağlar yaygın olarak kullanılmaktadır. Fakat bu gibi hidrokarbon esaslı sıvıların, işleme esnasında bozunup zehirli gazlar çıkarması ve düşük sıcaklıklarda parlama (örneğin; gaz yağı 48 °C’de parlama gösterir) özelliği göstermelerinden dolayı son zamanlarda çevreci EEİ yöntemini benimseyen imalatçılar tarafından tercih edilmemektedir. Artık günümüzde bu olumsuz etkileri ortadan kaldıracak çevreci EEİ sıvıları daha çok kullanılmaktadır [34, 40].

Günümüz endüstrisinde hacim kalıpcılığı sanayisi sürekli olarak kendini yenilemektedir. Bu gelişmelere paralel olarak sektörde kullanılan kalıp çelikleri de güncellenmektedir. Hacim kalıplarının yapım ve tamir maliyetlerinin yüksek olması nedeniyle malzeme seçimi kritik önem arz etmektedir [43]. İyi parlatılabilirlik, mükemmel nitrasyon kabiliyeti, krom kaplamaya uygunluk, yüksek kesit farklılıklarında bile yüzeylerde üniform sertlik dağılımı ve yüksek tokluk değeri özellikleriyle AISI4140 [44, 45] ve AISI 1.2723 [44, 46] çelikleri plastik ve metal enjeksiyon kalıplarının hamillerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. AISI4140 ve AISI 1.2733 çeliklerinin ısıtma işlemi görmemiş sertlik değerlerinin piyasada bulunan ön sertleştirilmiş kalıp çeliklerinin sertlik değerlerine (30-35 HRC) yakın olması, bu gibi çeliklere nitrürleme yapılarak daha sert ve daha yüksek aşınma direncine sahip yüzeyler elde edilebilmesini mümkün kılmaktadır [47]. Literatürde bu gibi sertleştirilmiş çeliklerin ve sertleştirilmiş çelik dışı metallerin EEİ yöntemi kullanılarak işlenebilirliklerinin incelendiği birçok çalışma mevcuttur. Nas ve arkadaşlarının çalışmasında, AISI 1.2738 çeliği işparçası farklı işleme parametreleriyle (100, 200 ve 300 μs vurum süresi, 10, 20 ve 30 μs bekleme süresi, 10, 20 ve 30 amper boşalım akımı) elektro erozyon tezgahında grafit elektrot kullanılarak işlenmiştir. Yapılan çalışmanın sonucunda en düşük yüzey pürüzlülük değerinin 100 μs vurum süresi, 10 μs bekleme süresi ve 20 amper boşalım akımında gerçekleştiği, en yüksek yüzey pürüzlülük değerinin ise 300 μs vurum süresi, 10 μs bekleme süresi ve 30 amper boşalım akımında gerçekleştiği belirtilmiştir [46]. Yine Nas’ın çalışmasında, sıg ve derin kriyojenik işleme tabi tutulan korozyona dayanıklı bir süper alaşım üzerinde EEİ deneyleri gerçekleştirilmiştir. Malzemeye uygulanan kriyojenik işleme tiplerinin EEİ performansı üzerine etkisi araştırılmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımı oluşturmak için vurum süresi (300, 400 ve 500 μs), boşalım akımı (6 ve 10 A) ve malzeme tipleri (kriyojenik işleme tabi tutulmamış, sıg kriyojenik işlenmiş ve derin kriyojenik işlenmiş) olmak üzere deneysel parametreler kullanılmıştır. Ortaya çıkan R_a ve İİH değerleri Taguchi L18 yöntemi kullanılarak optimize edilmiştir. Taguchi bazlı gri ilişkisel analize göre, hem R_a hem de İİH değeri için optimal parametreler sırasıyla kriyojenik işleme, vurum süresi ve boşalım akımı olarak belirlenmiştir. Taguchi yöntemi kullanılarak elde edilen yanıt tablosundan R_a ve İİH değerleri için en etkili faktörler belirlenmiştir. Performansı etkileyen parametreleri belirlemeye yönelik ANOVA sonuçlarına göre, boşalım akımı değeri R_a değerini %74,79 oranında etkilerken, İİH değerini %86,43 oranında etkileyen en etkili faktör olduğu tespit edilmiştir. Taguchi-gri ilişkisel dereceleri açısından incelendiğinde, sıg kriyojenik işleme numunesi ile gerçekleştirilen deneylerde 6 A boşalım akımı ve 300 μs ’lik vurum süresi değerleri hem R_a hem de İİH değerleri bakımından en uygun parametreler olduğu belirtilmiştir [48].

Bu çalışmada, çevreci bir dielektrik sıvı olan ER100 içerisine farklı derişim oranlarında (katkısız, 5 g/l ve 10 g/l) katılan TiO_2 tozunun hassas, orta ve kaba işleme koşullarında EEİ çıktı performansları (işparçası işleme hızı, elektrot aşınma hızı, bağıl aşınma ve ortalama yüzey pürüzlülüğü) üzerine etkileri araştırılmıştır. İşleme anında elektrotu kendi eksenine etrafında 1000 dev/min hızında döndürmenin çıktı performansları üzerine etkileri incelenmiştir. Ayrıca, delinmiş işparçası yüzeylerin özellikleri optik mikroskop yardımıyla belirlenmiştir.

II. DENEYSEL ÇALIŞMA

Bu çalışmada işparçası olarak AISI4140 çeliği, elektrot olarak 2 mm dış çapa sahip ortası tek delik bakır tüp, dielektrik sıvı olarak ise yüksek parlama noktasına (110 °C) ve düşük viskoziteye sahip Euro lub EDM ER100 çevreci tip elektro erozyon sıvısı kullanılmıştır. Deneysel çalışmalar için dalma elektro erozyon tezgahından (FURKAN EDM M25) dönüştürülmüş elektro erozyonla delik delme tezgahı (EEDDT) kullanılmıştır. EEDDT üzerindeki ana üniteler Şekil 1’de gösterilmiştir.

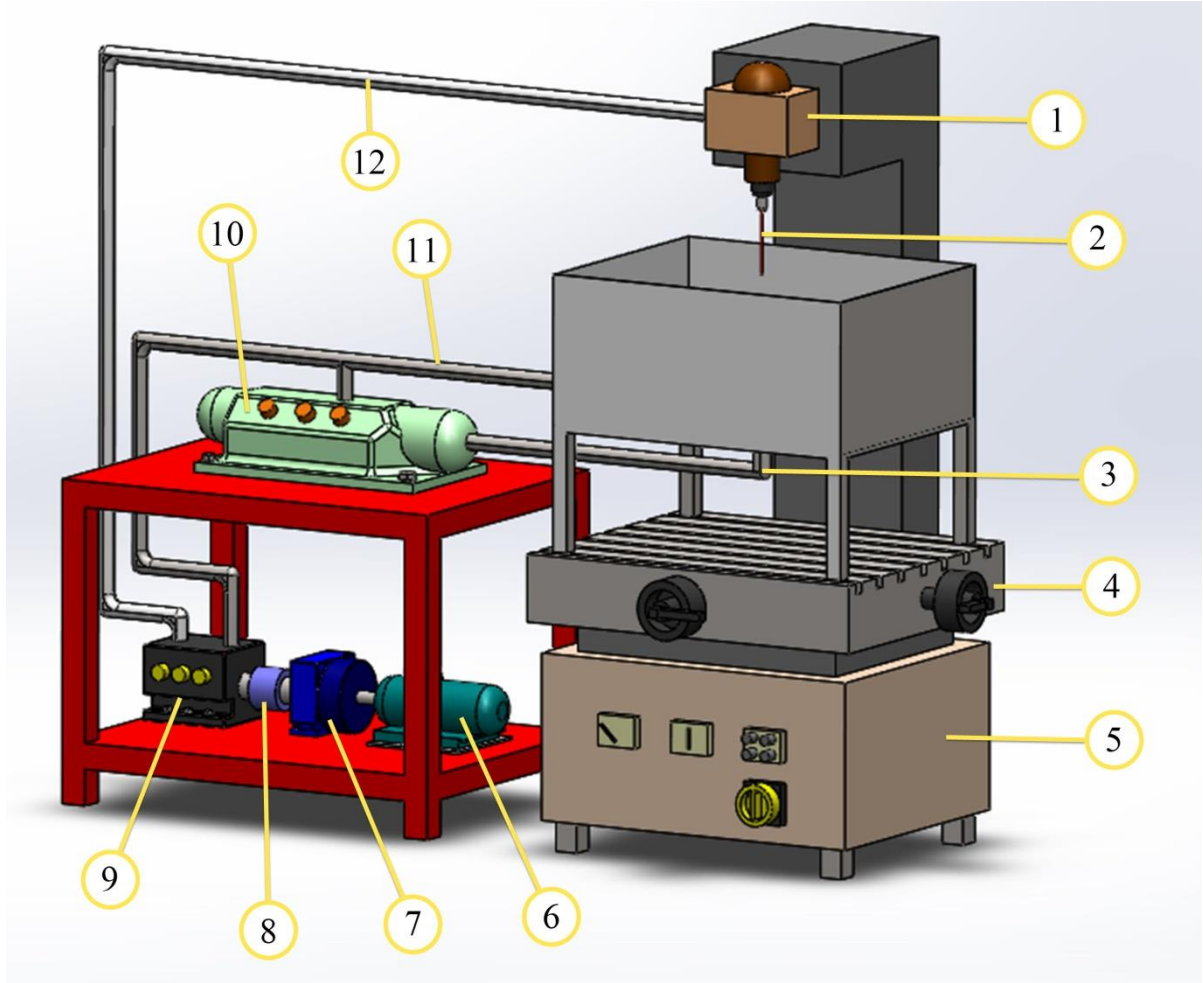


Şekil 1. EEDDT (1. elektrot döndürme sistemi, 2. tank sistemi, 3. tezgah kontrol paneli, 4. elektrik panosu, 5. dielektrik basınçlandırma ünitesi, 6. dielektrik karıştırma ünitesi) [45]

Dielektrik tank tabanında bulunan delikli borular sayesinde püskürtme mekanizmasıyla ER100 içerisine katılan TiO_2 tozlarının homojen şekilde karıştırılması gerçekleştirilmiştir. TiO_2 tozu katkılı ER100 dielektrik sıvısının tank içindeki dolaşımı, yüksek debiye sahip dişli bir pompa sayesinde gerçekleştirilmiştir. Toz katkılı dielektriğin, ortası tek delik bakır elektrot içerisinden yüksek basınçla püskürtülmesi için seramik pistonlu bir pompa kullanılmıştır. Bu deneysel çalışmada kullanılan ER100 dielektrik sıvısının viskozite özelliklerinin akış için herhangi bir sorun oluşturmayacağı düşünüldükten, ısıtma sistemi aktif edilmemiştir. Elektrotun döndürülmesi için doğru akımla çalışan bir motor ve motor devrinin ayarlanabilmesi için doğru akım güç kaynağı kullanılmıştır (Şekil 2).

Tezgahın kıvılcım boşalımaları, 80 V'luk devre gerilim ve 3 kVA güce sahip eş vurumlardan oluşacak şekilde ayarlanmıştır. EEİ parametreleri (boşalım akımı (I_d), vurum süresi (t_{on}), bekleme süresi (t_{off}), polarite, dielektrik uygulama şekli vb.) performans çıktıları (İİH, EAH, BA, R_a ve yüzey topoğrafyası) doğrudan etkileyen parametreler oldukları için bu çalışmanın amacına uygun deney parametreleri belirlenmiştir (Tablo 1). Deneylerde kullanılan tezgahın kapasitesi ve hassasiyeti göz önünde bulundurularak EEİ deneyleri için kaba, orta ve hassas işleme olmak üzere 3 tip işleme tipi kararlaştırılmıştır (Tablo 2). Bu üç işleme (M1, M2 ve M3)

tipiyle farklı dielektrik sıvı ortamlarda (katkısız, 5 g/l ve 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrik sıvı) işleme deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sabit ve döner elektrot (1000 dev/min) ile işleme deneyleri gerçekleştirilerek performans çıktıları belirlenmiştir. İşparçası ve elektrotun işleme öncesi ve sonrası ağırlıkları 1/1000 hassasiyette elektronik terazi kullanılarak tartılmıştır. Her deney üç kez tekrarlanıp çıktı değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak İİH, EAH ve BA değerleri hesaplanmıştır (Eşitlik 1-Eşitlik 3) [26, 45, 49].



Şekil 2. EEDDT şematik görünümü (1. elektrot döndürme sistemi, 2. elektrot, 3. tank karışımı için dönüş hattı, 4. tezgah tablası, 5. elektro erozyon tezgahı, 6. elektrik motoru, 7. redüktör, 8. kaplin, 9. seramik pistonlu pompa, 10. dişli pompa, 11. tank için dielektrik gönderme hattı, 12. elektrot için dielektrik gönderme hattı)

$$\text{İİH} = \frac{(\text{işparçası ilk ağırlık} - \text{işparçası son ağırlık})/\text{yoğunluk}}{\text{işleme süresi}} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) \quad (1)$$

$$\text{EAH} = \frac{(\text{elektrot ilk ağırlık} - \text{elektrot son ağırlık})/\text{yoğunluk}}{\text{işleme süresi}} \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{min}} \right) \quad (2)$$

$$\text{BA} = \frac{\text{EAH}}{\text{İİH}} \times 100 \quad (3)$$

Tablo 1. Deney parametreleri

Parametre	Ayarlar
Boşalım akımı, I_d (A)	3, 12, 25
Vurum süresi, t_{on} (µs)	25, 100, 400
Bekleme süresi, t_{off} (µs)	50, 25, 12
Çalışma süresi	12,8 s çalışma
Geri çekilme	0,8 s geri çekilme
Kutuplama	elektrot (+), işparçası (-)
İşparçası	AlSi4140 çeliği (20x20x40 mm dikdörtgenler prizması)
Elektrot tipi ve özellikleri	400 mm uzunluk ve 2 mm dış çapa sahip ortası tek delik bakır
Elektrot dönüş hızı (dev/min)	0 ve 1000
Dielektrik sıvı tipi ve basıncı (bar)	ER100, 140
Dielektrik sıvı uygulama tipi	Elektrot içerisinden
TiO ₂ tozu konsantrasyonu (g/l)	0, 5 ve 10

Tablo 2. Hassas, orta ve kaba işleme tiplerinin EEİ parametreleri

Parametre	Ayarlar
Hassas işleme (M1)	3A boşalım akımı, 25 µs vurum süresi, 50 µs bekleme süresi
Orta işleme (M2)	12A boşalım akımı, 100 µs vurum süresi, 25 µs bekleme süresi
Kaba işleme (M3)	25A boşalım akımı, 400 µs vurum süresi, 12 µs bekleme süresi

Eurolub EDM ER100 çevreci tip elektro erozyon sıvısının teknik özellikleri Tablo 3'te verilmiştir [50]. TiO₂ tozunun özellikleri ise Tablo 4'te verilmiş olup ortalama tane boyutu ($d_{0,5}$) Malvern Mastersizer lazerle boyut ölçme cihazıyla belirlenmiştir [51]. Bu çalışmadaki araştırmacıların geçmiş çalışmalarında, silikon yağına karbon (15g/l) ve nişasta tozu (30 g/l) katkısıyla oluşturulan dielektrik karışımların elektro-tork-reometre cihazı vasıtasıyla elektro-reolojik özellikleri araştırılmıştır. Elektro-reoloji çalışmaları sonucunda, 10 µm ($d_{0,5}$) altında olan karbon ve nişasta tozlarının dielektrik sıvılar içerisinde homojen şekilde dağılabildikleri ve 10 µm altında olan tozlarla oluşturulan dielektrik karışımların viskozite değerlerinin EEİ bakımından sorun oluşturmadıkları tespit edilmiştir. Bunun üzerine, 10 µm ($d_{0,5}$) altında olan karbon ve nişasta toz malzemelerine her hangi bir öğütme işlemine gerek olmadığı sonucuna varılmıştır. Bu bağlamda bu çalışmadaki araştırmacıların daha önceki deneysel çalışmalarından edindikleri tecrübeler göz önünde bulundurularak 5,48 µm ($d_{0,5}$) boyuta sahip TiO₂ tozunun ER100 dielektrik sıvısına katkısının EEİ'de dielektrik akış bakımından herhangi bir sorun oluşturmayaacağı düşünüldükten öğütme işlemi gerçekleştirilmemiştir [26, 45, 52, 53].

Çalışmada, farklı toz derişim oranlarıyla oluşturulan ER100 karışımların işleme performansı açısından incelenmesi temel amaç olduğu için dielektrik püskürtme basıncı ve elektrot döndürme hızı parametrelerinin sabit değerler alınmasına karar verilmiştir. ER100 dielektrik sıvısının elektrot içerisindeki püskürtme basınç değerine karar verilirken, yine bu çalışmadaki araştırmacıların daha önceki deneysel çalışmalarından edindikleri tecrübelerden faydalanılmıştır [26]. Buna göre, Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmalarında [30, 31], 100 bar püskürtme basıncıyla deiyonize su kullanılarak ortası delik 2 mm'lik elektrotlarla Ti6Al4V ve IN718 işparçalarına işlemler yapıldığı tespit edilmiştir. Çalışmada kullanılan ER100 sıvısının gerek kıvamı ve gerekse elektro reolojik özellikleri göz önünde bulundurulduğunda püskürtme basıncının 100 bar değerinden daha yüksek değerde olması gerektiği düşünülmüştür. Dolayısıyla bu çalışmada, ER100 dielektriğin püskürtme basıncı 140 bar olarak kabul edilmiştir.

Elektrotun kendi ekseni etrafındaki dönüş hızına karar verilirken literatürdeki diğer deneysel çalışmalardan faydalanılmıştır. Yılmaz ve arkadaşlarının çalışmasında [32], farklı hızlarda (200, 400 ve 600 dev/min) dönen elektrotların işleme performansına çok büyük etkiler oluşturmadığı (elektrot hızında her 200 dev/min'lik artış, İİH'de yaklaşık %16'lık artış sağlamakta) rapor edilmiştir. Bundan dolayı bu çalışmada, dönmeyen ve maksimum hızda dönen (elektrot döndürme sistemi maksimum 1000 dev/min ile dönebilmektedir) elektrotlar arasındaki ara hız değerlerinin araştırılmasına gerek duyulmamıştır. Temelde, elektrotun maksimum hızda dönmemesinin ve dönmemesinin performans çıktıları üzerine ne gibi etkiler oluşturacağını araştırılması amaçlanmıştır. ER100 dielektrik sıvısı içerisine yapılacak toz katkılarını belirlenirken ise, literatürdeki benzer çalışmalardan faydalanılarak TiO₂ tozu katkısının 5 ve 10 g/l olmasına karar verilmiştir (Tablo 1) [25, 27].

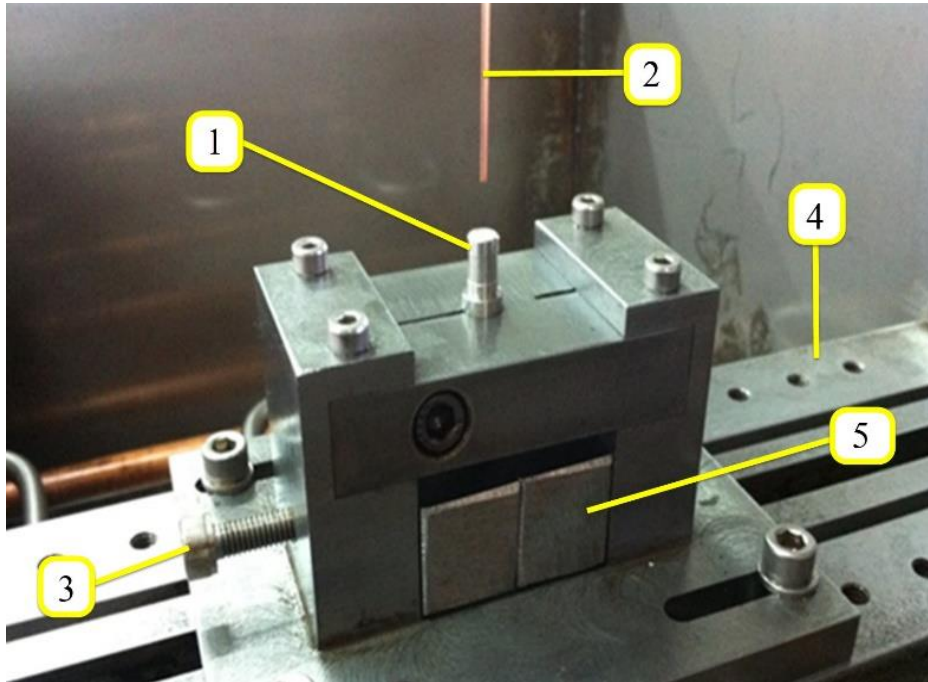
Tablo 3. Eurolub EDM ER100 çevreci tip EEİ sıvısının teknik özellikleri

Özellik	Değer
Hal	Sıvı, renksiz (şeffaf)
Buhar basıncı	0,04 kPa
Viskozite (ASTM D445)	2,17 Pa.s 40 °C'de
Yoğunluk	0,766 g/cm ³ 20 °C'de
Suda çözünbilme	0,1 %
Isı iletkenliği	0,15 50 °C'de
Parlama noktası	101 °C
Akma noktası (ASTM D97)	-5 °C
Ph (TS 4614)	5,0

Tablo 4. TiO₂ tozu teknik özellikleri

Özellik	Değer
Cas No	100808
Ticari isim / Tedarik	Titanium oxide / Merck Co.
Yoğunluk	6,43 g/cm ³ 20 °C'de
Toz boyutu (d _{0,5})	5,48 µm
Suda çözünürlük	79,87 g/mol 20 °C'de
Kaynama noktası	1900 °C

20x20 mm kare çubuktan (lamadan) 40 mm uzunluğunda olacak şekilde kesilen dikdörtgenler prizması biçimindeki AISI4140 çeliği işparçasının tüm yüzeylerine taşlama işlemi uygulanarak yüzeyler parlatılmıştır. İşparçalarına delinecek 20 mm derinliğindeki deliklerin işleme sonrası daha rahat incelenebilmesi için iki adet işparçası tank içerisindeki mengenede birleştirilerek ara yüzey oluşturulmuş ve delme işlemi bu ara yüzeyde gerçekleştirilmiştir. İşleme esnasında ortası delik elektrotun salınımlarını engellemek ve eksen kaçıklığını gidermek için seramik kılavuz kullanılmıştır (Şekil 3). Delme işlemi sonunda işparçaları birbirinden ayrılmış ve gerekli yüzey incelemeleri (yüzey pürüzlülüğü ve mikroyapı) gerçekleştirilmiştir. İşparçası R_a ölçümleri Marsurf PS10 tarayıcı uçlu taşınabilir yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazıyla yapılmıştır (Şekil 4).



Şekil 3. Tank içerisindeki mengine sistemi (1. seramik kılavuz, 2. elektrot, 3. sıkıştırma vidası, 4. tabla, 5. işparçası) [45]



Şekil 4. EEİ yöntemiyle delinmiş işparçası yüzeyinin Mahr MarSurf PS 10 cihazıyla yüzey pürüzlülüğü ölçümü

Ölçümlerde örnekleme uzunluğu standart tablolardan 0,8 mm ve ölçüm uzunluğu 2,5 mm olarak seçilmiştir. İşparçalarının işlenmiş (delik) yüzeylerinden üç farklı noktadan (delik girişi, ortası ve çıkışı) olacak şekilde alınan ölçümlerin aritmetik ortalaması kullanılmıştır [54]. Mikroyapı incelemesi Olympus marka dijital kamera donanımlı optik mikroskopla gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı incelemesinden önce, işparçaları %2 Nitrik asit + %98 saf Ethanol çözeltisiyle 45 dakika dağlanmış. Daha sonra, dağlanan işparçası yüzeyleri sodyum hipoklorit + %5 toz anyonik madde karışımıyla fırçalanarak temizlenmiştir. 10-20 kat büyütmeyle önceden belirlenen noktalardan mikroyapı fotoğrafları çekilmiş ve incelenmiştir [26, 45, 49, 54].

III. BULGULAR VE TARTIŞMALAR

A. EEİ Performans Çıktıları

Şekil 5'ten anlaşılacağı üzere sabit (dönmeyen) elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO_2 tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) işleme hızı değerlerini artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı İİH değerlerini M1 için %52,94, M2 için %8,44 ve M3 için %30,07 oranlarında artırmıştır. Yani, dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %30,48'lik bir artış elde edilmiştir. Benzer şekilde 10 g/l TiO_2 tozu katkısı İİH değerlerini M1 için %100, M2 için %21,47 ve M3 için %49,64 oranlarında artırdığı tespit edilmiştir. Bu durumda, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO_2 tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %57,03'lük bir işleme hızı artışı sağlanmıştır.

Yine Şekil 6 incelendiğinde, döner elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO_2 tozu katkısı her işleme tipinde İİH değerlerini artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %16,72'lik bir artış elde edilmiştir (M1 için %13,13, M2 için %15,12 ve M3 için %21,90 oranlarında artış). Benzer şekilde, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO_2 tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %25,66'lık bir işleme hızı artışı sağlanmıştır (M1 için %18,48, M2 için %25,03 ve M3 için %33,48 oranlarında artış).

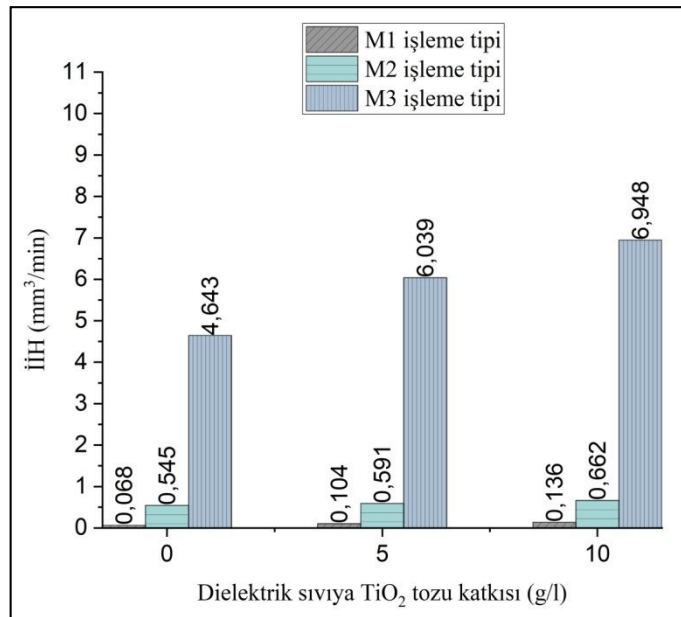
Yapılan EEİ deneyleri sonucunda elektrotu döndürmenin İİH değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) artırdığı Şekil 5 ile Şekil 6 kıyaslandığında anlaşılmaktadır. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrik sıvılar için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek İİH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %99,5 artış sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %13,75 ve M3 işleme tipinde ortalama %9,38 oranlarında artışlara olanak sağlamıştır (Tablo 5).

Tablo 5. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun İİH değerleri üzerine etkileri

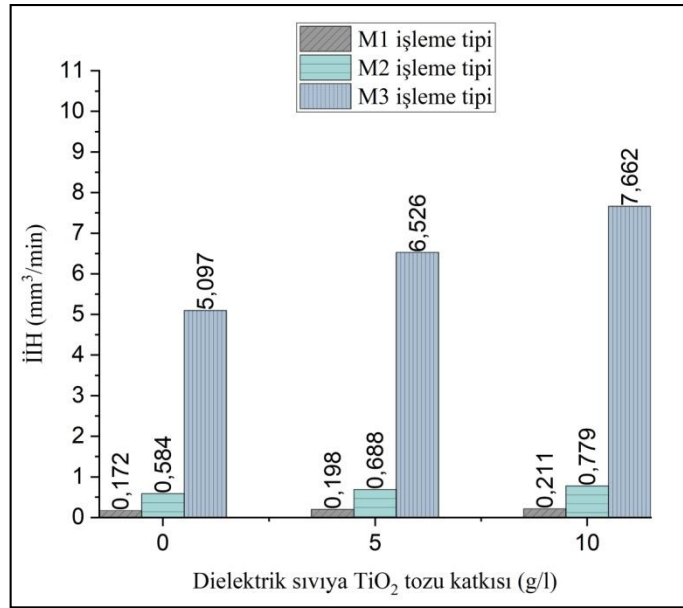
İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda İİH değerinin işleme tiplerine göre % artışı			% Ort. değişim
	Katkısız	5 g/l TiO ₂ tozu katkılı	10 g/l TiO ₂ tozu katkılı	
M1	152,94 (+)	90,38 (+)	55,14 (+)	99,5 (+)
M2	7,16 (+)	16,41 (+)	17,67 (+)	13,75 (+)
M3	9,78 (+)	8,06 (+)	10,28 (+)	9,38 (+)

M2 ve M3 işleme tiplerine nazaran M1 işleme tipindeki bu çarpıcı artışın en temel sebebinin; hassas işleme koşullarında (M1: $I_d = 3A$, $t_{on} = 25 \mu s$ ve $t_{off} = 50 \mu s$) döner elektrotun işleme ortamında oluşturduğu girdap etkisini daha belirgin biçimde gösterebildiğidir. Çünkü, M1 işleme tipinde en uzun süre bekleme süresi (50 μs) ve en düşük vurum süresi (25 μs) değerlerinin olması sayesinde işleme ortamındaki talaşların işparçası yüzeyine tekrardan katılaşmasına fırsat vermeden elektrotu döndürerek akışı hızlandırılmış dielektrik sıvının, talaşları ortamdaki daha hızlı uzaklaştırabilirdiği kanaatine varılmıştır. Bu sebeplerden ötürü, M1 işleme tipi için elektrotu döndürmenin İİH değerlerini daha fazla artırdığı düşünülmektedir. Diğer iki işleme tipinde (M2 ve M3) elektrotun döndürülmesi, gerek vurum süresi değerleri ve gerekse bekleme süresi değerleri bakımından oluşan girdap etkisinin nispeten daha az görülmesine ve bu nedenle İİH değerlerinin nispeten daha az artmasına sebep olduğu düşünülmektedir.

Şekil 5 ve 6 birlikte incelendiğinde dielektrik sıvıya TiO₂ tozu katkısı hem sabit hem de döner elektrot kullanılan M1, M2 ve M3 işleme tiplerinde İİH değerlerini artırdığı rahatlıkla görülebilmektedir. Her üç işleme tipindeki bu artışların temel sebepleri; işleme ortamlarındaki dielektrik sıvı iletkenliğiyle işleme parametrelerinin (I_d ve t_{on}) oldukça uyumlu olmasıdır. Ayrıca, TiO₂ tozu katkısı işleme ortamındaki dengeyi sağlayarak işleme esnasındaki boşalım kıvılcımlarının işparçası yüzeyine eşit olarak yayılmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu işleme mekanizması sayesinde TiO₂ tozu katkısının genel olarak İİH değerlerinin artmasına katkı sağladığı keşfedilmiştir. Dielektrik sıvıya çeşitli toz katkılarının İİH'yi artırdığı, toz parçaların boşalım enerjisini dağıtarak verimliliği artırdığı literatürdeki birçok çalışmada da rapor edilmiştir [5, 10, 25, 26, 28, 29, 32, 33, 35]. Yine bu çalışma ile kıyaslanabilecek Baseri ve arkadaşlarının [35] çalışmasında, gaz yağı içerisine 1 g/l TiO₂ tozu katkısı, İİH değerlerini tüm işleme koşullarında artırdığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda gerçekleştirilen deneysel çalışma, Baseri ve arkadaşlarının çalışmasıyla da örtüşmektedir.



Şekil 5. EEİ'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki İİH değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi



Şekil 6. EEİ'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki İİH değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

Deneyisel çalışmalar esnasında, litreye 10 gramdan fazla yapılan TiO₂ tozu katkılarının ER100 dielektrik sıvısının akış özelliklerini olumsuz yönde etkilediği gözlemlenmiştir. Nispeten yüksek toz konsantrasyonundan dolayı 2 mm dış çapa sahip bakır elektrotun iç deliğinde tıkanıklık oluşarak dielektrik sıvının elektrot içerisinden akmadığı görülmüştür. Yaşanan tıkanıklık durumunun benzeri bu çalışmadaki araştırmacıların daha önceki çalışmasında da görülmüştür [26]. Artan toz konsantrasyonuyla dielektrik karışımın viskozite değeri arttığı için kesit alanı dar olan elektrot içerisinde dielektrik sıvı geçememiştir. Diğer bir taraftan tank tabanında TiO₂ tozu tortulanması ve topaklanması görülmüştür. Görülen bu tortulanmanın ve topaklanmanın tank tabanında bulunan karıştırma ünitesinin yetersiz kalmasından kaynaklandığı sonucuna varılmıştır. Tank tabanında bulunan ve püskürtme etkisi oluşturmak için imal edilmiş delikli bakır boru sistemi yüksek toz konsantrasyonlarında iyi bir karıştırma performansı gösterememiştir. Ayrıca, dielektrik sıvıda artan toz konsantrasyonuyla işleme dengesinin bozulduğu ve ark tipi boşalımın (kısa devre boşalım) arttığı tespit edilmiştir. Yapılan deneylerin sonucunda, litreye 10 gramdan daha fazla TiO₂ tozu katkılarının deneyel olarak araştırılmasına gerek duyulmamıştır. Bu çerçevede, gerçekleştirilen deneyel çalışmada artan toz konsantrasyonun olumsuz etkileri literatürdeki benzer çalışmalarla da paralellik göstermektedir. Örneğin, Baseri ve arkadaşları [35], gaz yağı dielektrik içerisine 0-1-2-3 g/l oranlarında nano boyutta TiO₂ tozu katkısıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, 1 g/l katkı oranından sonraki her TiO₂ tozu katkısı işparçası ve elektrot arasında anormal boşalımın artırdığını ve işlemeyi olumsuz yönde etkilediğini tespit etmişlerdir. Fakat, bu çalışmada artan toz konsantrasyonun olumsuz etkileri 10 g/l TiO₂ tozu katkı oranlarından sonraki katkı oranlarında görünürken, Baseri ve arkadaşlarının çalışmasında bu etkiler 1 g/l katkı oranlarından sonraki oranlarda görülmesinin en temel sebebinin; Baseri ve arkadaşlarının çalışmasında nano boyutta toz kullanılmasıdır. Çünkü nano boyuttaki TiO₂ tozu katkısı dielektrik sıvı içerisinde daha homojen ve hızlı biçimde karışabilmektedir. Dolayısıyla bu olumsuz etkileri daha düşük toz konsantrasyonlarında gösterebilmektedir.

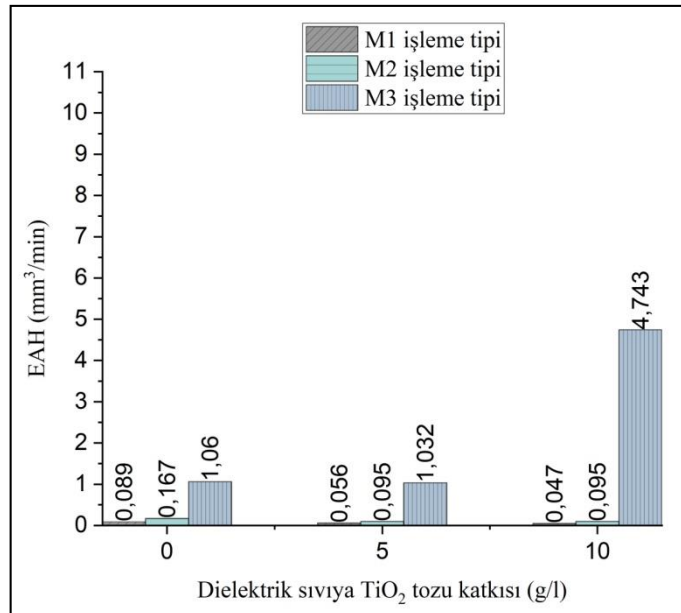
Şekil 7'de görüleceği üzere sabit elektrotla yapılan EEİ deneylerinde, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde elektrot aşınmasını azaltırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte elektrot aşınmasını artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde EAH değerinin ortalama %45,81 oranında (M1 için %58,93, M2 için %75,8 ve M3 için %2,71 oranlarında EAH azalması) azaldığı tespit edilmiştir. Benzer şekilde 10 g/l TiO₂ tozu katkısı EAH değerlerini M1 için %89,36 ve M2 için %75,8 oranlarında azaltırken, M3 için %347,45 oranlarında artırdığı tespit edilmiştir. M3 işleme tipi için EAH değerinin bu denli yüksek oranda artmasına sebep olan en önemli parametre boşalım akımıdır (I_d = 25 A). Çünkü, M3 işleme tipi diğer işleme tiplerine nazaran daha saldırgan bir işleme tipidir ve normalden daha fazla talaş kaldırmak amacıyla kurgulanmıştır. Daha yüksek işleme değerleri

elde etmek isterken daha fazla elektrot aşınmasının da bu durumda kaçınılmaz olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, Baseri ve arkadaşlarının [35], gaz yağı dielektrik içerisine 0-1-2-3 g/l oranlarında nano boyutta TiO_2 tozu katkısıyla gerçekleştirdikleri çalışmada, TiO_2 tozu katkısının EAH değerlerini düşürdüğü rapor edilmiştir. Bu bağlamda, gerçekleştirilen çalışmada TiO_2 tozu katkısının EAH değerlerini düşürdüğü tespiti literatürdeki diğer çalışmalar ile de paralellik göstermektedir. Yine, Şekil 7'ye bakıldığında döner elektrotla EEİ deneylerinde, TiO_2 tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde EAH değerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrikte EAH değerini artırmıştır. 5 g/l TiO_2 tozu katkısıyla oluşturulan dielektrik sıvıda her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde EAH değerinin ortalama %39,15 (M1 için %49,72, M2 için %55,19 ve M3 için %12,54 oranlarında EAH azalması) oranında azaldığı görülmüştür. Aynı şekilde 10 g/l TiO_2 tozu katkısı EAH değerlerini M1 için %219,05 ve M2 için %73,16 oranlarında azaltırken, M3 için %82 oranında artırdığı tespit edilmiştir. M1 işleme tipi için litreye 10 gram TiO_2 tozu katkılı işlemlerde EAH değerinin düşmesindeki en önemli sebep ise; M1 işleme tipindeki düşük vurum süresi (25 μs) ve yüksek bekleme süresi (50 μs) değerleridir. Bu işleme parametrelerinde elektrot aşınması açısından işlemin dengeli olduğu söylenebilir. Fakat, M3 işleme tipi için EAH değerinin artmasının en temel sebebi; yine boşalım akımıdır.

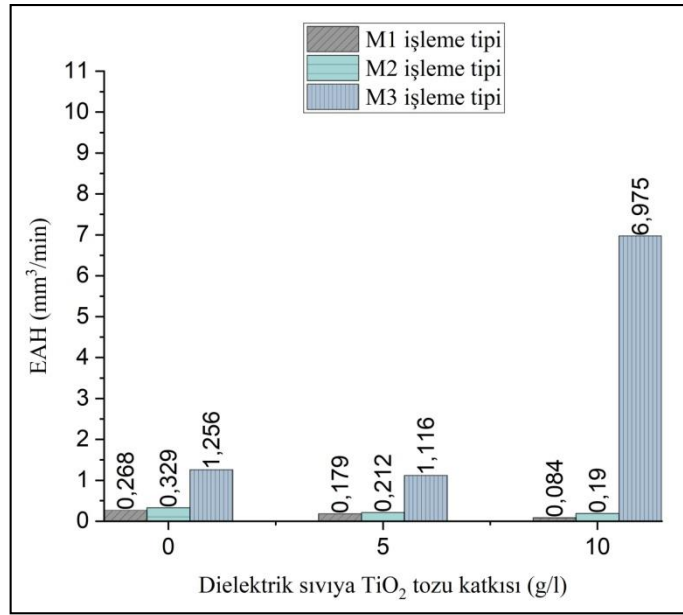
Şekil 7 ve Şekil 8 birlikte değerlendirildiğinde, EEİ'de elektrotu döndürmenin EAH değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) artırdığı görülebilmektedir. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrikler için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek EAH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %166,50 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %106,72 ve M3 işleme tipinde ortalama %24,57 oranlarında artışlara sebep olmuştur (Tablo 6).

Tablo 6. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun EAH değerleri üzerine etkileri

İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda EAH değerinin işleme tiplerine göre % artışı			% Ort. değişim
	Katkısız	5 g/l TiO_2 tozu katkılı	10 g/l TiO_2 tozu katkılı	
M1	201,12 (+)	219,64 (+)	78,72 (+)	166,50 (+)
M2	97 (+)	123,16 (+)	100 (+)	106,72 (+)
M3	18,5 (+)	8,14 (+)	47,06 (+)	24,57 (+)



Şekil 7. EEİ'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki EAH değerlerinin dielektriğe katılan TiO_2 tozu oranıyla değişimi



Şekil 8. EEİ'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki EAH değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

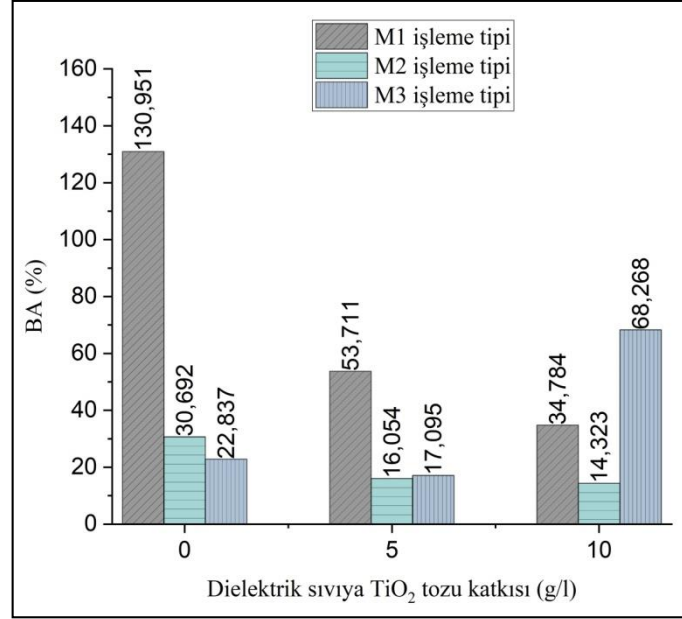
Sabit elektrotla yapılan işlemlerde elektrotun uç kısımlarında daha çok aşınma meydana gelirken, döner elektrotla yapılan işlemlerdeki bu aşınmanın silindirik elektrotun tüm çeperlerine eşit olarak yayılabildiği görülmüştür. Ayrıca, döner elektrot kullanılarak yapılan deneylerde elektrotların uç kısımlarında dönme etkisinden ötürü bariz konikleşmeler de tespit edilmiştir. Bu tespitlerin ışığında, elektrotu döndürerek yapılan işlemlerde EAH değerlerinin artmasındaki temel sebebin; işleme esnasında oluşan kıvılcımların silindirik elektrotun tüm çeperlerine dağılabilmesi ve birim zamanda daha fazla elektrotun aşınmasına neden olabildiği yönündedir.

Şekil 9 incelendiğinde, BA değerlerinin tıpkı EAH değerleri gibi özellikler sergilediği anlaşılabilmektedir. Sabit elektrotla EEİ deneylerinde, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde BA değerlerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte BA değeri artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde BA değerinin ortalama %89,53 oranında (M1 için %143,81, M2 için %91,18 ve M3 için %33,59 oranlarında BA azalması) azaldığı görülmüştür. 10 g/l TiO₂ tozu katkısı ise BA değerlerini M1 için %276,47 ve M2 için %114,28 oranlarında azaltırken, M3 için %66,55 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Döner elektrotla yapılan EEİ deneylerinde ise, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde BA değerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte BA değerini artırmıştır (Şekil 10). Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde BA değeri ortalama %66,51 (M1 için %72,64, M2 için %82,86 ve M3 için %44,03 oranlarında BA azalması) oranında azalmıştır. Benzer şekilde 10 g/l TiO₂ tozu katkısı BA değerlerini M1 için %292,46 ve M2 için %131,37 oranlarında azaltırken, M3 için %72,94 oranında artırdığı tespit edilmiştir.

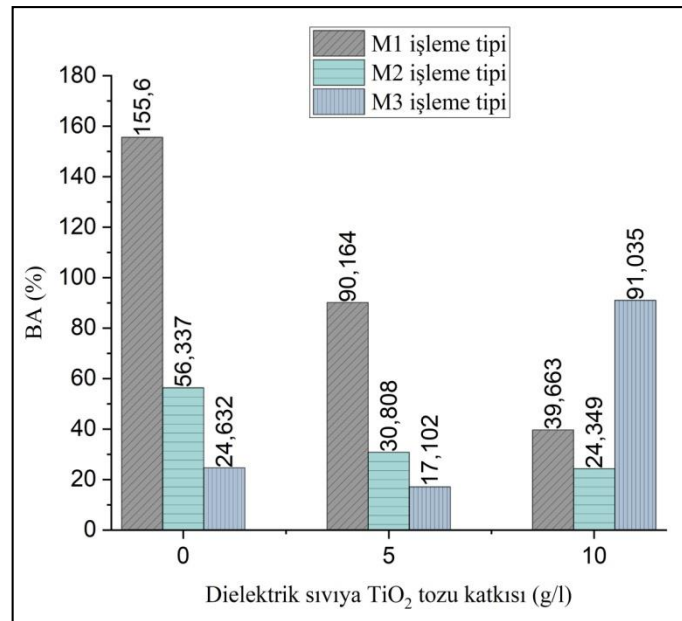
Şekil 9 ve Şekil 10 birlikte değerlendirildiğinde, EEİ'de elektrotu döndürmenin BA değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) artırdığı görülebilmektedir. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikler için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek BA değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %22,87 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %45,53 ve M3 işleme tipinde ortalama %10,78 oranlarında artışlara sebep olmuştur (Tablo 7). Daha önce de ifade edildiği üzere, elektrotu döndürerek yapılan işlemlerde EAH değerlerinin artmasından ötürü, BA değerleri de artış göstermektedir. EEİ'de genel olarak %100'ün üzerindeki BA değerleri çok hoş karşılanmasa da, özellikle hassas işlemeye ihtiyaç duyulan hacim kalıpcılığında bu durum göz ardı edilebilmektedir.

Tablo 7. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun BA değerleri üzerine etkileri

İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda BA değerinin işleme tiplerine göre % artışı			% Ort. değişim
	Katkısız	5 g/l TiO ₂ tozu katkılı	10 g/l TiO ₂ tozu katkılı	
M1	15,87 (+)	40,43 (+)	12,30 (+)	22,87 (+)
M2	45,52 (+)	47,89 (+)	41,18 (+)	45,53 (+)
M3	7,29 (+)	0,04 (+)	25 (+)	10,78 (+)



Şekil 9. EEİ'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki BA değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi



Şekil 10. EEİ'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki BA değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

Daha hızlı işleme için kurgulanmış M3 işleme tipinde ($I_d = 25$ A, $t_{on} = 400$ μ s ve $t_{off} = 12$ μ s), elektrot ve işparçası için bütün parametrelerin aynı olması rağmen, nispeten yüksek boşalım akımı değeri kullanıldığı durumlarda vurum süresi değeri ve bekleme süresi değeri elektrot için kritik önem arz etmektedir. M3 işleme tipindeki nispeten yüksek vurum süresi ve düşük bekleme süresi değerleri olduğu için elektrotun işparçasına nazaran daha fazla aşınmasına sebep olmuştur. Dolayısıyla, M3 işleme tipi için litreye 10 gram TiO_2 tozu katkılı işlemlerde, BA değerini artmasının en önemli sebebinin; yüksek vurum süresi ve düşük bekleme süresi değerleri olduğu düşünülmektedir. BA değerinin, boşalım akımı ve vurum süresi parametreleriyle genel olarak ters orantılı olduğu söylenebilir (Şekil 9-10). Fakat bu çalışmada, M3 işleme tipinde 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrik sıvıda yapılan işlemlerdeki BA değeri istisnai bir durumdadır. Bu durumun en önemli sebebi; artan boşalım akımı ve vurum süresi değerleri, İİH değerini EAH değerine nazaran daha çok artırmakta olduğudur. Böylece, BA değeri hesabında İİH değeri payda da olduğu için BA değeri azalmaktadır.

Şekil 11'den anlaşılabacağı üzere sabit elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO_2 tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) R_a değerlerini azaltmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %5,27, M2 için %8 ve M3 için %2,95 oranlarında azaltmıştır. Yani, dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde R_a değeri açısından ortalama %5,41'lik bir azalma elde edilmiştir. Benzer şekilde 10 g/l TiO_2 tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %8,15, M2 için %15,07 ve M3 için %6,21 oranlarında azalttığı tespit edilmiştir. Bu durumda, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO_2 tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %9,81'lik bir R_a değeri düşüşü sağlanmıştır.

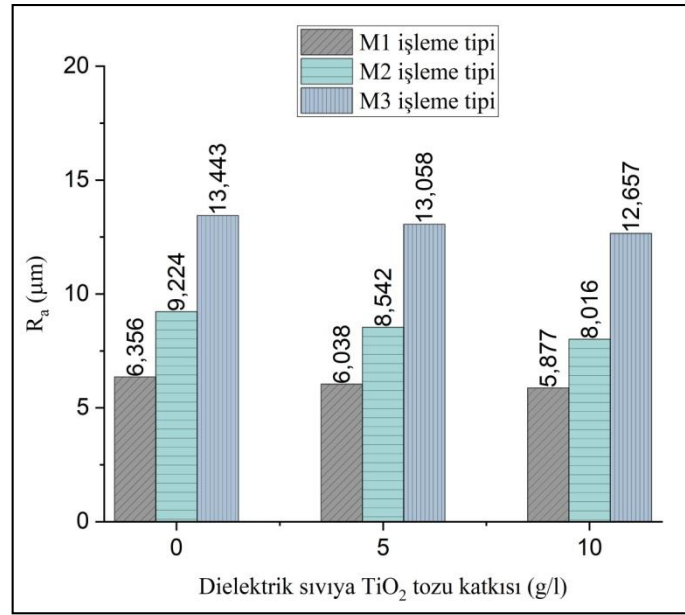
Döner elektrotla yapılan EEİ deneylerinde ise, TiO_2 tozu katkısı her işleme tipinde R_a değerlerini benzer şekilde azaltmıştır (Şekil 12). Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO_2 tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde R_a değeri için ortalama %7,87'lik bir azalma elde edilmiştir (M1 için %10,41, M2 için %8,85 ve M3 için %4,36 oranlarında azalma). Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO_2 tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %13,04'lük bir R_a değeri düşüşü sağlanmıştır (M1 için %17,82, M2 için %11,76 ve M3 için %9,54 oranlarında azalma). Elektrotu döndürmenin R_a değerini her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) düşürdüğü Şekil 11 ile Şekil 12 karşılaştırıldığında anlaşılmaktadır. Katkısız dielektrik, 5 g/l ve 10 g/l TiO_2 tozu katkılı dielektrik sıvılar için sabit ve döner elektrot kullanılarak yapılan deney sonuçları kıyaslandığında; elektrotu döndürmek R_a değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %14,38 azalma sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %3,54 ve M3 işleme tipinde ortalama %7,82 oranlarında azalmaya olanak sağlamıştır (Tablo 8).

ER100 dielektrik sıvısına TiO_2 tozu katkısı kaba, orta ve hassas işleme tiplerinde R_a değerlerini düşürerek yüzey özelliklerini iyileştirdiği hem sabit hem de döner elektrot kullanılarak yapılan deneylerden tespit edilmiştir. Bu çalışmada, TiO_2 tozu katkısının işlenmiş işparçası R_a değerleri üzerine etkileri, literatürdeki birçok çalışmayla benzerlik sergilemektedir. Örneğin, Wang ve arkadaşlarının çalışmasında [25], dielektrik sıvıya 10 g/l Al tozu katkısı, Inconel 706 işparçalarının aynı işleme parametrelerinde yüzey pürüzlülüğü değerlerini %25,9 oranında azalttığı belirtilmiştir. Paul ve arkadaşlarının çalışmasında [33] ise, dielektrik sıvı içerisine katılan Cu tozlarının, özellikle yüksek işleme parametreleri kullanılarak yapılan işlemlerde Inconel 718 işparçasının R_a değerlerini düşürdüğü tespit edilmiştir.

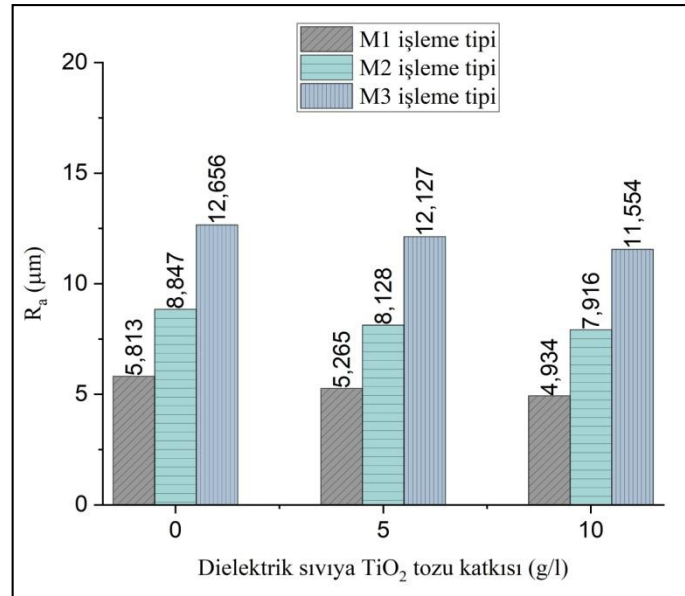
Tablo 8. 1000 dev/min hızında dönen elektrotun R_a değerleri üzerine etkileri

İşleme tipi	Dielektrik sıvılarda R_a değerinin işleme tiplerine göre % azalışı			
	Katkısız	5 g/l TiO_2 tozu katkılı	10 g/l TiO_2 tozu katkılı	% Ort. değişim
M1	9,34 (-)	14,68 (-)	19,11 (-)	14,38 (-)
M2	4,26 (-)	5,09 (-)	1,26 (-)	3,54 (-)
M3	6,22 (-)	7,68 (-)	9,55 (-)	7,82 (-)

Yine, Kumar ve arkadaşlarının çalışmasında [5], Inconel 825 işparçasının işlenmesinde, dielektrik sıvıya iletken olmayan nano boyuttaki Al_2O_3 toz katkısı R_a değerini 1,487 μ m değerine kadar düşürebildiği ve bu sayede R_a değerinde %63 oranında bir azalmanın olduğu bildirilmiştir. Benzer şekilde bu deneysel çalışmayla örtüşebilecek Baseri ve arkadaşlarının çalışmasında [35], gaz yağı içerisine katılan nano boyuttaki TiO_2 tozlarının tüm işleme koşullarında işparçası işlenmiş yüzeylerinin R_a değerlerini düşürdüğü belirtilmiştir.



Şekil 11. EEİ'de sabit elektrotla farklı işleme tiplerindeki R_a değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi



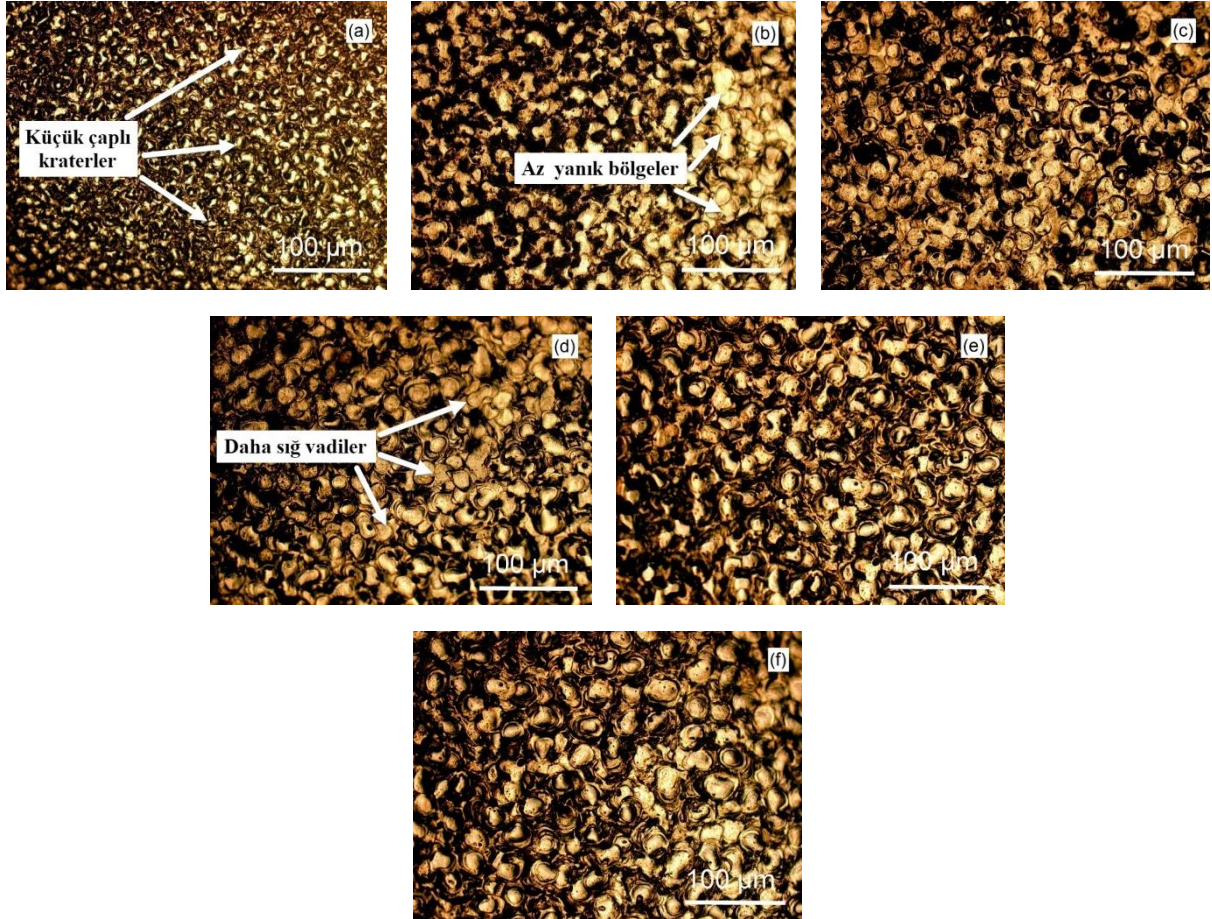
Şekil 12. EEİ'de döner elektrotla farklı işleme tiplerindeki R_a değerlerinin dielektriğe katılan TiO₂ tozu oranıyla değişimi

R_a değerlerinin boşalım akımı ve vurum süresi parametreleriyle doğru orantılı olduğu deneysel çalışmalardan tespit edilmiştir. Artan boşalım akımı ve vurum süresi değerleri (M3 işleme tipi) işparçaların R_a değerlerini artırırken, düşük boşalım akımı ve vurum süresi değerleri (M1 işleme tipi) çeliklerin R_a değerlerini düşürmektedir (Şekil 11-12).

B. Optik Mikroskop Görüntüleri

Şekil 13'te sabit ve döner elektrot kullanılarak farklı konsantrasyonlarda TiO₂ tozu katkılı dielektrik sıvılarda M1 işleme tipiyle delinmiş işparçalarının işlenmiş yüzeylerinin optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafları

verilmiştir. Yine benzer biçimde, Şekil 14'te M2 ve Şekil 15'te ise M3 işleme tipiyle delinmiş işparçalarının optik mikroskopla çekilmiş fotoğrafları görülmektedir.



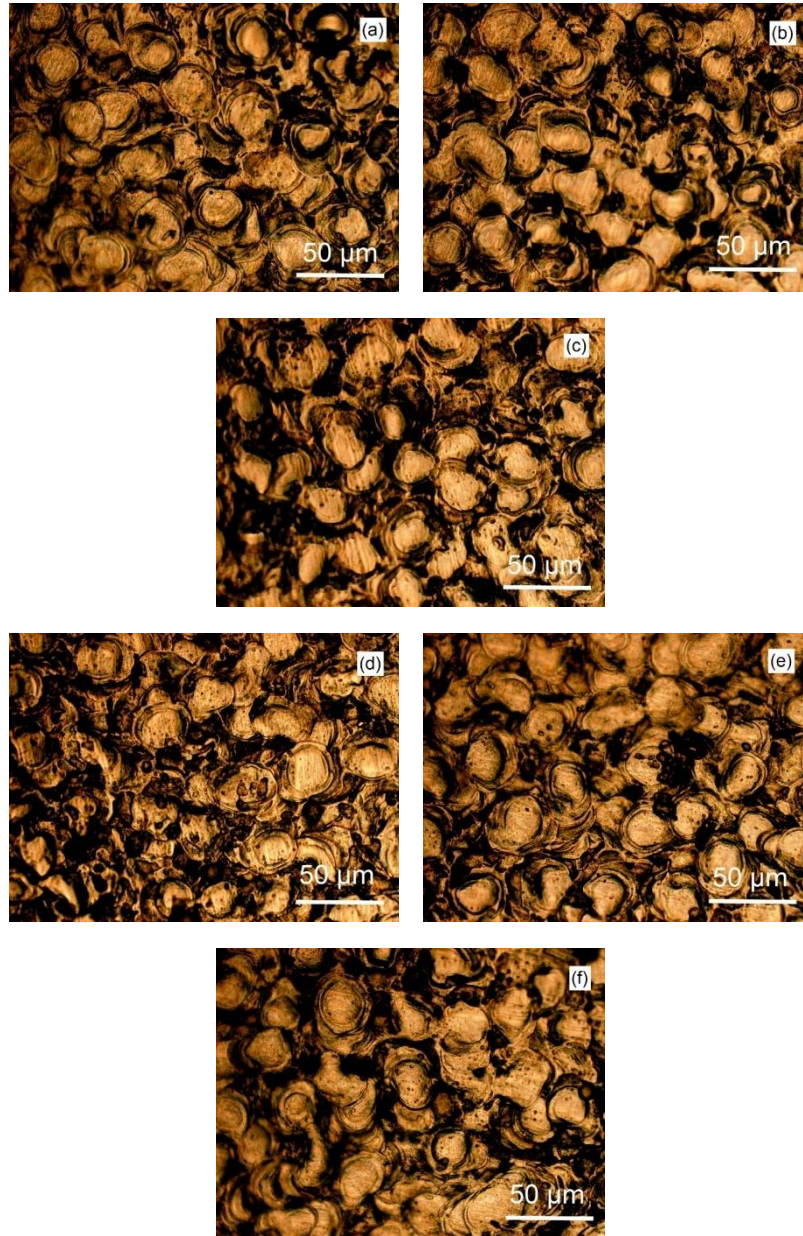
Şekil 13. M1 işleme tipiyle işlenmiş yüzeyler: a) sabit elektrotla katkısız dielektrikte, b) döner elektrotla katkısız dielektrikte, c) sabit elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, d) döner elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, e) sabit elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, f) döner elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte

M1, M2 ve M3 işleme tipleriyle delinmiş işparçalarının işlenmiş yüzeylerin optik fotoğrafları genel olarak değerlendirilir ve Şekil 13-15'in (a), (c) ve (e) fotoğrafları kıyaslanırsa, TiO₂ tozu katkılarının yüzey topoğrafyasında belirgin farklılıklar oluşturabildiği görülebilmektedir. Burada TiO₂ tozu katkısıyla işlenmiş parçaların birim yüzey alanında daha çok sayıda fakat daha sığ ve küçük çaplı kraterlerin oluştuğu tespit edilmiştir. Yine, Şekil 13-15'in (b), (d) ve (f) fotoğraflarına bakıldığında, elektrotun dönme etkisiyle az da olsa yüzeylerdeki tepelerin sivri uçlarının yuvarlatılmış oldukları görülebilmektedir.

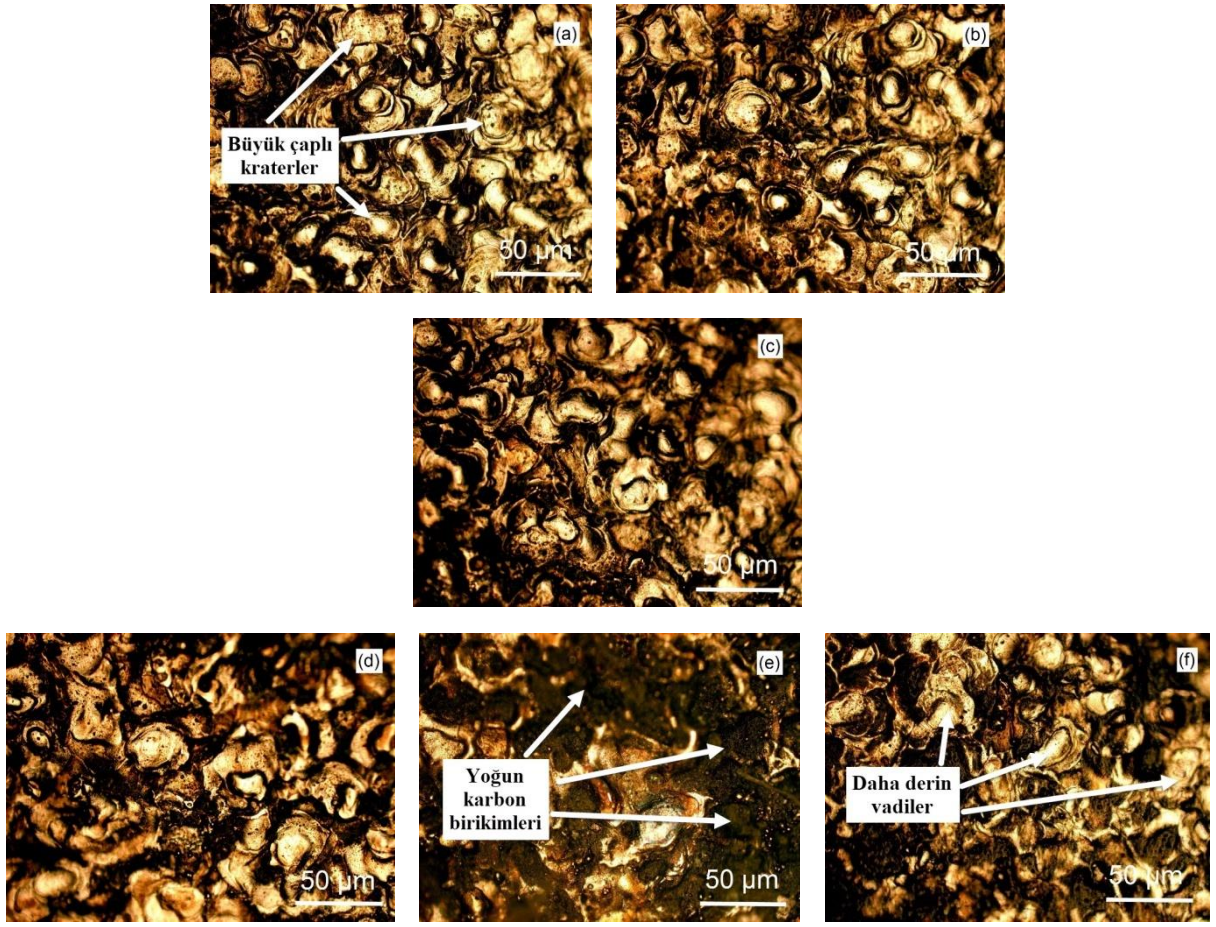
M1, M2 ve M3 işleme tipleriyle işlenmiş yüzeylerin optik mikroskop fotoğrafları EEİ parametreleri (I_d , t_{on} ve t_{off}) açısından kendi aralarında kıyaslandığında, M1 ile işlenmiş yüzeylerde (Şekil 13), M2 ve M3 ile işlenmiş yüzeylere (Şekil 14-15) nazaran daha az yanıklar ve daha sığ vadiler tespit edilmiştir. Özellikle M3 ile işlenmiş yüzeylerde (Şekil 15), yüksek boşalım akımı, yüksek vurum süresi ve düşük bekleme süresi değerleri yüzünden yoğun karbon birikimleri ve derin vadiler görülmüştür.

İşlenmiş yüzeylere yapılan optik mikroskop incelemelerinden, artan boşalım akımı ve vurum süresi değerlerinin yüzey özelliklerini olumsuz yönde etkiledikleri tespit edilmiştir. M3 işleme tipiyle her ne kadar yüksek İİH değerleri elde edilmiş olsa da işlenmiş parçaların yüzey özellikleri bakımından kabul edilebilirliğinin

şüpheli olduğu sonucuna varılmıştır. Bunun üzerine, EEİ'de kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğüne sahip makine parçalarını makul sürelerde (yüksek İİH'de) delebilmek için operasyon stratejisi belirlenmesi gerektiği düşünülmektedir. Bunun için delinecek parçaların geometrik toleransları göz önünde bulundurularak öncelikle kaba işleme (M3), sonra orta işleme (M2) ve en sonunda hassas işleme (M1) yapılmasıyla beklentileri karşılayabilecek makine parçalarının üretilebileceği sonucuna varılmıştır.



Şekil 14. M2 işleme tipiyle işlenmiş yüzeyler: a) sabit elektrotla katkısız dielektrikte, b) döner elektrotla katkısız dielektrikte, c) sabit elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, d) döner elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, e) sabit elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, f) döner elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte



Şekil 15. M3 işleme tipiyle işlenmiş yüzeyler: a) sabit elektrotla katkısız dielektrikte, b) döner elektrotla katkısız dielektrikte, c) sabit elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, d) döner elektrotla 5 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, e) sabit elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte, f) döner elektrotla 10 g/l TiO₂ tozu katkılı dielektrikte

IV. SONUÇ

Bu çalışmada, farklı konsantrasyonlara sahip TiO₂ tozu katkılı ER100 dielektrik sıvı ve farklı dönüş hızlarında elektrot (dönmeyen ve döner) kullanılarak yapılan EEİ deneyleri sonucunda, İİH, EAH, BA, R_a ve işparçası mikro yapısı gibi EEİ'nin ana performans çıktıları elde edilmiştir. Yapılan deneysel çalışmadan çıkan sonuçlar şu şekilde özetlenebilir:

Hem sabit hem de döner elektrotla EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) İİH değerlerini artırdığı tespit edilmiştir. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde İİH değeri açısından ortalama %30,48'lik bir artış elde edilmiştir. Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %57,03'lük bir işleme hızı artışı sağlanmıştır. TiO₂ tozu katkısı işleme ortamındaki dengeyi sağlayarak işleme esnasındaki boşalım kıvılcımlarının işparçası yüzeyine eşit olarak yayılmasına katkı sağladığı düşünülmektedir. Bu işleme mekanizması sayesinde TiO₂ tozu katkısının genel olarak İİH değerlerinin artmasına katkı sağladığı keşfedilmiştir. Ayrıca, elektrotu döndürmek İİH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %99,5 artış sağlarken, M2 işleme tipinde ortalama %13,75 ve M3 işleme tipinde ortalama %9,38 oranlarında artışlara olanak sağlamıştır.

TiO₂ tozu katkısıyla hem sabit hem de döner elektrotla yapılan deneylerde, M1 ve M2 işleme tiplerinde elektrot aşınması azalırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte elektrot aşınmasının arttığı sonucuna varılmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan

deneylerde EAH değerinin ortalama %45,81 oranında (M1 için %58,93, M2 için %75,8 ve M3 için %2,71 oranlarında EAH azalması) azaldığı tespit edilmiştir. Fakat, 10 g/l TiO₂ tozu katkısı EAH değerlerini M1 için %89,36 ve M2 için %75,8 oranlarında azaltırken, M3 için %347,45 oranlarında artırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca, elektrotu döndürmek EAH değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %166,50 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %106,72 ve M3 işleme tipinde ortalama %24,57 oranlarında artışlara sebep olmuştur.

BA değerlerinin tıpkı EAH değerleri gibi özellikler sergilediği görülmüştür. Sabit elektrotla EEİ deneylerinde, TiO₂ tozu katkısı M1 ve M2 işleme tiplerinde BA değerlerini azaltırken sadece M3 işleme tipinde litreye 10 gram TiO₂ tozu katkılı dielektrikte BA değeri artırmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipiyle yapılan deneylerde BA değerinin ortalama %89,53 oranında (M1 için %143,81, M2 için %91,18 ve M3 için %33,59 oranlarında BA azalması) azaldığı görülmüştür. 10 g/l TiO₂ tozu katkısı ise BA değerlerini M1 için %276,47 ve M2 için %114,28 oranlarında azaltırken, M3 için %66,55 oranında artırdığı tespit edilmiştir. Yine, elektrotu döndürmek BA değerleri üzerinde M1 işleme tipinde ortalama %22,87 artış sağlarken M2 işleme tipinde ortalama %45,53 ve M3 işleme tipinde ortalama %10,78 oranlarında artışlara sebep olmuştur.

Yine, hem sabit hem de döner elektrotla EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde R_a değerini azaltmıştır. Sabit elektrot kullanılarak yapılan EEİ deneylerinde TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde (M1, M2 ve M3) R_a değerlerini azaltmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %5,27, M2 için %8 ve M3 için %2,95 oranlarında azaltmıştır. Yine, 10 g/l TiO₂ tozu katkısı R_a değerlerini M1 için %8,15, M2 için %15,07 ve M3 için %6,21 oranlarında azalttığı tespit edilmiştir. Döner elektrotla yapılan EEİ deneylerinde ise, TiO₂ tozu katkısı her işleme tipinde R_a değerlerini benzer şekilde azaltmıştır. Dielektrik sıvıya 5 g/l TiO₂ tozu katkısı sayesinde her üç işleme tipinde R_a değeri için ortalama %7,87'lik bir azalma elde edilmiştir (M1 için %10,41, M2 için %8,85 ve M3 için %4,36 oranlarında azalma). Yine, dielektrik sıvıya 10 g/l TiO₂ tozu katkısıyla her üç işleme tipinde ortalama %13,04'lük bir R_a değeri düşüşü sağlanmıştır (M1 için %17,82, M2 için %11,76 ve M3 için %9,54 oranlarında azalma).

EEİ'de kabul edilebilir yüzey pürüzlülüğüne sahip makine parçalarını makul sürelerde debilmek için operasyon stratejisi belirlenmesi gerektiği sonucuna varılmıştır. Bunun için delinecek parçaların geometrik toleransları göz önünde bulundurularak öncelikle kaba işleme (M3), sonra orta işleme (M2) ve en sonunda hassas işleme (M1) yapılmasıyla beklentileri karşılayabilecek makine parçalarının üretilbileceği kanaatine varılmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, Kırşehir Ahi Evran Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'nce desteklenmiştir. Proje Numarası: MMF.A3.17.002. ("This work was supported by the Kırşehir Ahi Evran University Scientific Research Projects Coordination Unit. Project Number: MMF.A3.17.002"). Desteklerinden dolayı Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi'ne teşekkürlerimizi sunarız.

KAYNAKLAR

- [1] Jadhav, H. P., Mohanty, P. K., & Das, S. (2018). Numerical simulation of multi-spark electric discharge machining analysis for Ti6Al4V alloy drilling. *Materials Today: Proceedings*, 5, 28337–28346.
- [2] Marashi, H., Jafarlou, D. M., Sarhan, A. A. D., & Hamdi, M. (2016). State of the art in powder mixed dielectric for EDM applications. *Precision Engineering*, 46, 11-13.
- [3] Rajamanickam, S., & Prasanna, J. (2018). TOPSIS on High Aspect Ratio Electric Discharge Machining (EDM) of Ti-6Al-4V using 300 µm brass rotary tube electrodes. *Materials Today: Proceedings*, 5, 18489-18501.
- [4] Cyril, J., Parvasu, A., Jerald, J., Sumit, K., & Kanagaraj, G. (2017). Experimental investigation on performance of additive mixed dielectric during micro-electric discharge drilling on 316L stainless steel. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(6), 638-644.

- [5] Kumar, A., Mandal, A., Dixit, A. R., Das, A. K., Kumar, S., & Ranjan, R. (2019). Comparison in the performance of EDM and NPMEDM using Al₂O₃ nanopowder as an impurity in DI water dielectric. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100, 1327-1339.
- [6] Kliuev, M., Maradia, U., Boccadoro, M., Perez, R., Stirnimann, J., & Wegener, K. (2016). Experimental Study of EDM-Drilling and Shaping of SiSiC and SiC. *Procedia CIRP*, 42, 191-196.
- [7] Kliuev, M., Maradia, U., & Wegener, K. (2018). EDM Drilling of Non-Conducting Materials in Deionised Water. *Procedia CIRP*, 68, 11-16.
- [8] Munz, M., Risto, M., Haas, R., Landfried, R., Kern, F., & Gadow, R. (2013). Machinability of ZTA-TiC ceramics by electrical discharge drilling. *Procedia CIRP*, 6, 77-82.
- [9] Kumar, R., Kumar, A., & Singh, I. (2018). Electric discharge drilling of micro holes in CFRP laminates. *Journal of Materials Processing Tech.*, 259, 150-158.
- [10] Unses, E., & Cogun, C. (2015). Improvement of Electric Discharge Machining (EDM) Performance of Ti-6Al-4V Alloy with Added Graphite Powder to Dielectric. *Strojniški vestnik-Journal of Mechanical Engineering*, 61(6), 409-418.
- [11] Kumar, R., & Singh, I. (2019). A modified electrode design for improving process performance of electric discharge drilling. *Journal of Materials Processing Tech.*, 264, 211-219.
- [12] Rahman, S. S., Ashraf, M. Z. I., Bashar, M. S., Kamruzzaman, M., Amin, A. K. M. N., & Hossain, M. M. (2017). Crystallinity, surface morphology, and chemical composition of the recast layer and rutile-TiO₂ formation on Ti-6Al-4V ELI by wire-EDM to enhance biocompatibility. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 93, 3285-3296.
- [13] Rakwal, D., Heamawatanachai, S., Tathireddy, P., Solzbacher, F., & Bamberg, E. (2009). Fabrication of compliant high aspect ratio silicon microelectrode arrays using micro-wire electrical discharge machining. *Microsyst Technol.*, 15(5), 789-797.
- [14] Aliyu, A. A. A., Rani, A. M. A., Ginta, T. L., Rao, T. V. V. L. N., Selvamurugan, N., & Roy, S. (2018). Hydroxyapatite mixed-electro discharge formation of bioceramic Larkargite (CaZrO₃) on Zr-Cu-Ni-Ti-Be for orthopedic application. *Materials and Manufacturing Processes*, 33(16), 1734-1744.
- [15] Kumar, R., & Singh, I. (2018). Productivity improvement of micro EDM process by improvised tool. *Precision Engineering*, 51, 529-535.
- [16] Pragadish, N., & Kumar, M. P. (2015). Surface characteristics analysis of dry EDMed AISI D2 steel using modified tool design. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 29(4), 1737-1743.
- [17] Govindan, P., & Joshi, S. S. (2010). Experimental characterization of material removal in dry electrical discharge drilling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 50, 431-443.
- [18] Dhakar, K., & Dvivedi, A. (2017). Experimental Investigation on Near-dry EDM using Glycerin-Air Mixture as Dielectric Medium. *Materials Today: Proceedings*, 4, 5344-5350.
- [19] Dhakar, K., & Dvivedi, A. (2016). Parametric Evaluation on Near-Dry Electric Discharge Machining. *Materials and Manufacturing Processes*, 31, 413-421.
- [20] Bai, X., Yang, T., & Zhang, Q. (2018). Experimental study on the electrical discharge machining with three-phase flow dielectric medium. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2003-2011.
- [21] Hanash, E. A. H., & Ali, M. Y. (2017). Experimental study of electrical discharge drilling of stainless steel UNS S30400. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 290, 1-8.

- [22] Hourmand, M., Sarhan, A. A. D., & Sayuti, M. (2017). Micro-electrode fabrication processes for micro-EDM drilling and milling: a state-of-the-art review. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 91, 1023-1056.
- [23] Nanimina, A. M., Rani, A. M. A., & Ginta, T. L. (2014). Assessment of Powder Mixed EDM: A Review. *MATEC Web of Conferences*, 13, 4018-4023.
- [24] Mondal, G., Surekha, B., & Choudhury, S. D. (2018). Investigation on the influence of different Powder mixed Dielectric in Electric discharge Machining. *Materials Today: Proceedings*, 5, 18281-18286.
- [25] Wang, C., & Qiang, Z. (2019). Comparison of Micro-EDM Characteristics of Inconel 706 between EDM Oil and an Al Powder-Mixed Dielectric. *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-11.
- [26] Erdem, O., Çoğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., & Uslan, İ. (2016). Toz katkılı ve ısıtılmış dielektriğin elektro erozyon ile işlemede (EEİ) delik delme performansı üzerine etkisi. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 31(3), 531-544.
- [27] Li, C., Xu, X., Li, Y., Tong, H., Ding, S., Kong, Q., Zhao, L., & Ding, J. (2019). Effects of dielectric fluids on surface integrity for the recast layer in high speed EDM drilling of nickel alloy. *Journal of Alloys and Compounds*, 783, 95-102.
- [28] Shard, A., Shikha, D., Gupta, V., & Garg, M. P. (2018). Effect of B4C abrasive mixed into dielectric fluid on electrical discharge machining. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 554-565.
- [29] Patel, S., Thesiya, D., & Rajurkar, A. (2017). Aluminium powder mixed rotary electric discharge machining (PMEDM) on Inconel 718. *Australian Journal of Mechanical Engineering*, 16(1), 21-30.
- [30] Kuppan, P., Narayanan, S., Oyyaravelu, R., & Balan A. S. S. (2017). Performance Evaluation of Electrode Materials in Electric Discharge Deep Hole Drilling of Inconel 718 Superalloy. *Procedia Engineering*, 174, 53-59.
- [31] Beravala, H., & Pandey, P. M. (2018). Experimental investigations to evaluate the effect of magnetic field on the performance of air and argon gas assisted EDM processes. *Journal of Manufacturing Processes*, 34, 356-373.
- [32] Sahu, S. K., Jadam, T., Datta, S., & Nandi, G. (2018). Effect of using SiC powder-added dielectric media during electrodischarge machining of Inconel 718 superalloys. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40, 330-349.
- [33] Paul, B. K., Sahu, S. K., Jadam, T., Datta, S., Dhupal, D., & Mahapatra, S. S. (2018). Effects of Addition of Copper Powder in the Dielectric Media (EDM Oil) on Electro-Discharge Machining Performance of Inconel 718 Super Alloys. *Materials Today: Proceedings*, 5, 17618-17626.
- [34] Tiwary, A. P., Pradhan, B. B., & Bhattacharyya, B. (2018). Investigation on the effect of dielectrics during micro-electro-discharge machining of Ti-6Al-4V. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 95, 861-874.
- [35] Baseri, H., & Sadeghian, S. (2016). Effects of nanopowder TiO₂-mixed dielectric and rotary tool on EDM. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 83, 519-528.
- [36] Swiercz, R., & Swiercz, D. O. (2019). The Effects of Reduced Graphene Oxide Flakes in the Dielectric on Electrical Discharge Machining. *Nanomaterials*, 9, 335-351.
- [37] Tseng, K. H., Chang, C. Y., Chung, M. Y., & Cheng, T. S. (2017). Fabricating TiO₂ nanocolloids by electric spark discharge method at normal temperature and pressure. *Nanotechnology*, 28, 465701-465710.
- [38] Sindhu, M. K., Nandi, D., & Basak, I. (2018). Electric discharge phenomenon in dielectric and electrolyte medium. *Adv. Manuf.*, 6, 457-464.

- [39] Kou, Z., & Han, F. (2018). On sustainable manufacturing titanium alloy by high-speed EDM milling with moving electric arcs while using water-based dielectric. *Journal of Cleaner Production*, 189, 78-87.
- [40] Srinivas, V. V., Ramanujam, R., & Rajyalakshmi, G. (2018). A Review of Research Scope on Sustainable and Eco-Friendly Electrical Discharge Machining (E-EDM). *Materials Today: Proceedings*, 5, 12525-12533.
- [41] Almancinha, J. A., Lopes, A. M., Rosa, P., & Marafona, J. D. (2018). How Hydrogen Dielectric Strength Forces the Work Voltage in the Electric Discharge Machining. *Micromachines*, 9, 240-251.
- [42] Valaki, J. B., & P.P. Rathod, P. P. (2016). Assessment of operational feasibility of waste vegetable oil based bio-dielectric fluid for sustainable electric discharge machining (EDM). *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 87, 1509-1518.
- [43] Süzgünlü, M., & Kayır, Y. (2012). DIN 1.2311 ve 1.2738 kalıp çeliklerinin işlenebilirliği. 3. *Ulusal Talaşlı İmalat Sempozyumu*. 04-05 Ekim, Ankara, Türkiye, 132-142.
- [44] Davis, J. R. (1996). *ASM Specialth Handbook Carbon and Alloy Steels*. ASM International, New York, 731.
- [45] Erdem, O. (2016). *Elektro erozyon ile işlemede döner elektrot kullanılarak delik delmede dielektrik delik delmede dielektrik sıvısına karıştırılan tozların ve ısıtmanın işleme performansına etkisinin araştırılması ve multi fizik simülasyonu*. Doktora tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [46] Nas, E., Argun, K., & Zurnacı, E. (2018). AISI 1.2738 Çeliğinin Elektro-Erozyon Tezgaahında Grafit Elektrot ile İşlenmesinde İşleme Parametrelerinin Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin İncelenmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 6, 574-581.
- [47] Davis, J. R. (1998). *Metals Handbook 2nd Edition*. ASM International, New York, 2571.
- [48] Nas, E. (2020). Optimization of the EDM machinability of deep and shallow cryogenically treated corrosion-resistant superalloys. *Proc. IMechE. Part C: J. Mech. Eng. Sci.*, 0(0), 1-16.
- [49] Erdem, O. (2018). Nükleer enerji santrallerinde kullanılan östenitik çeliklerin elektro erozyon ile işleme (EEİ) performansları. *International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology (EurasianSciEnTech 2018)*. November 22-23, Ankara, Turkey, 203-211.
- [50] Tess-San Metal Yüzey İşlem Kimyasalları, 2020. <https://www.tess-san.com.tr/urun/eurolub-edm-er-100/> (26.03.2020).
- [51] Merck, 2020. https://www.merckmillipore.com/TR/tr/product/TitaniumIV-oxide,MDA_CHEM-100808 (26.03.2020).
- [52] Erdem, O., Çoğun, C., Uslan, İ., Urtekin, L., & Özerkan, H. B. (2013). Elektro Erozyon İle İşlemede Döner Elektrot İle Delik Delmede Dielektrik Sıvısına Karıştırılan Tozların Ve Isıtmanın İşleme Performansına Etkisi. *Makine İmalat Teknolojileri Kongresi*. 06-07 Aralık, Bursa, Türkiye, 1-9.
- [53] Erdem, O., Çoğun, C., Urtekin, L., Özerkan, H. B., & Uslan, İ. (2014). Toz Katkılı Dielektrikle Elektro Erozyon İşleme Performansı. *7th International Powder Metallurgy Conference & Exhibition*. June 24-28, Ankara, Turkey, 1-3.
- [54] Erdem, O. (2018). Gıda Sanayinde Kullanılan AISI304 ve AISI316 Paslanmaz Çeliklerin Elektro Erozyon ile İşleme (EEİ) Performanslarının Araştırılması. *The 6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science (ISITES2018)*. 09-11 November, Alanya-Antalya, Turkey, 56-65.